İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞSAL İŞ AKIŞI ESNEKLİĞİNE SAHİP HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Mustafa ÖZKIRIM

Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞSAL İŞ AKIŞI ESNEKLİĞİNE SAHİP HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mustafa ÖZKIRIM
(507842002)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Eylül 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Şubat 2006

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. M. Bülent DURMUŞOĞLU**
Diğer Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Murat DİNÇMEN (İ.T.Ü.)**
Prof.Dr. Gönül YENERSOY (Doğuş Ü.)
Prof.Dr. Güneş GENÇYILMAZ (İ.K.Ü.)
Doç.Dr. Tufan V. KOÇ (İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sırasında beni yönlendiren ve her zaman bilgi ve desteğini sunan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. M. Bülent DURMUŞOĞLU 'na, benim yetişmemde büyük emeği olan sevgili annem Zekiye ÖZKIRIM ile babam Ahmet Nuri ÖZKIRIM 'a ve tez yazımında yardımlarını esirgemeyen sevgili kardeşim Fügen (ÖZKIRIM) ÇETİN 'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı şu anda bizimle olamayan sevgili babam Ahmet Nuri ÖZKIRIM 'a ithaf ederim.

Şubat 2006

İSTANBUL **Mustafa ÖZKIRIM**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xx**
SUMMARY ..... **xxiv**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Üretim Yaklaşımları ve Hücresel Üretim 1
1.2. Değişken Ürün Karışımı Ortamındaki Hücresel Üretim Sistemlerinin Davranışı 11
1.3. Ürün Karışımındaki Değişiklik Sonucu Hücresel Üretim Sisteminin Performansında Oluşan Düşüşe Karşı Alınabilecek Önlemler 12
1.4. Çalışmanın Önemi ve Amacı 12

2. GRUP TEKNOLOJİSİ VE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ **16**
2.1. Giriş: Üretim Sistemleri 16
2.1.1. Akış Tipi Üretim Sistemi: Kitle Üretimi 16
2.1.2. Sürekli Proses Tipi Üretim Sistemi 17
2.1.3. Proje Tipi Üretim Sistemi 18
2.1.4. Atelye Tipi Üretim Sistemi 18
2.1.5. Hücresel Üretim Sistemi 20
2.2. Üretim Sistemlerinin Tasarımı ve Uygun Üretim Sistemi Seçimi 21
2.3. Grup Teknolojisi ve Çeşitli Tanımları 23
2.3.1. Grup Teknolojisinin Tarihçesi 25
2.3.2. Grup Teknolojisinin Uygulama Alanları 28
2.3.2.1. Grup Teknolojisinin Parça Sınıflandırma ve Kodlama Alanında Uygulanması 28
2.3.2.2. Grup Teknolojisi ve İşlem Planlaması 30

2.3.2.3. Grup Teknolojisi ve Hücresel Üretim 30
2.4. Hücresel Üretim Sistemleri 31
2.4.1. Atelye Tipi Üretim Hücreleri 33
2.4.2. Akış Tipi Üretim Hücreleri 34
2.4.3. Sanal ve Fiziksel Hücreler 35
2.5. Üretim Hücrelerinin Özellikleri ve Hücre İçindeki Yerleşim Planı 36
2.5.1. Grup Teknolojisi Akış Hattı 38
2.5.2. Grup Teknolojisi Hücresi 38
2.5.3. Grup Teknolojisi Merkezi 39
2.6. Hücresel Üretimin Faydalı ve Zayıf Yönleri 39
2.7. Hücresel Üretim ile Atelye Tipi Üretimin Karşılaştırılması 44
2.8. Hücresel Üretim Sistemlerinin Tasarımı 45
2.8.1. Karma Parça Kavramı 46
2.8.2. Makina Parça Matrisi 47
2.9. Hücresel Üretim Sistemi Tasarım Yöntemleri 48
2.9.1. Hücre Tasarımında Uzman Analizi Yöntemleri 51
2.9.2. Hücre Tasarımında Yapısal Yöntemler 52
2.9.2.1. Kümelendirme Analizi Yöntemleri 53
2.9.2.2. Benzerlik Katsayısı Yöntemleri 53
2.9.2.3. Grafik Teorisi Yöntemleri 55
2.9.2.4. Matematik Programlama Yöntemleri 55
2.9.3. Hücre Tasarımında Operasyonel Yöntemler 56
2.9.4. Diğer Hücre Tasarım Yöntemleri 56
2.10. Hücresel Üretim Sistemlerinin Uygulanması ve Benzetimi Alanında Yapılmış Çalışmaların İncelenmesi 57
2.11. Sonuç 60

3. ÜRETİM ESNEKLİĞİ VE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ESNEKLİK 62
3.1. Giriş 62
3.2. Üretim Esnekliği Kavramı ve Önemi 64
3.3. Üretim Esnekliğinin Çeşitleri ve Ölçülmesi 68
3.3.1. Makina Esnekliği 71
3.3.2. Malzeme Taşıma Esnekliği 72

3.3.3. Operasyon (İşlem) Esnekliği 73
3.3.4. Proses (İşleme) Esnekliği 73
3.3.5. Ürün Esnekliği 74
3.3.6. İş Akışı Esnekliği 74
3.3.7. Hacim Esnekliği 75
3.3.8. Genişleme Esnekliği 76
3.3.9. Program Esnekliği 77
3.3.10. Üretim Esnekliği 77
3.3.11. Pazar Esnekliği 78
3.3.12. Üretim Esnekliğinin Çeşitleri Alanındaki Diğer Yaklaşımlar 78
3.4. Üretim Esnekliğinin Hiyerarşik Yapısı ve Esneklik Tipleri Arasındaki İlişkiler 80
3.5. Üretim Esnekliği Alanındaki Diğer Çalışmaların İncelenmesi 87
3.6. Hücresel Üretim Sistemlerinde Esneklik 89
3.7. Hücresel Üretimde Esnekliğin Hiyerarşik Yapısı 92
3.8. Hücresel Üretim Sistemlerinde Esneklik Tipleri 93
3.8.1. Hücresel Sistemlerde Makina Düzeyindeki Esneklik Tipleri 94
3.8.2. Hücresel Sistemlerde Hücre Düzeyindeki Esneklik Tipleri 94
3.8.3. Hücresel Sistemlerde Sistem Düzeyindeki Esneklik Tipleri 95
3.9. Hücresel Üretimde İş Akışı Esnekliği ve İlgili Kavramlar 95
3.9.1. Hücresel Üretimde İş Akışı Esnekliğinin Tanımı 95
3.9.2. Seçenek İşlem Planları ve Üretim Planları 96
3.9.3. Seçenek İşlem Planları ve İş Akışı Esnekliğinin Hücresel Üretim Sistemleri için Önemi 98
3.9.4. Hücreler Arası Hareket Esnekliği ve Önemi 99
3.9.5. Hücreler Arası Akış Esnekliği ve Önemi 100
3.10. İş Akışı Esnekliğine Sahip Hücresel Üretim Sistemlerinin Tasarımı 102
3.10.1. İş Akışı Esnekliğine Sahip Hücresel Üretim Sistemi Tasarım Modelleri ve Özellikleri 104
3.10.1.1. Hücreler Arası Hareket Esnekliğine Sahip Hücresel Sistem Tasarımı Modeli 104
3.10.1.2. Hücreler Arası Akış Esnekliğine Sahip Hücresel Sistem Tasarımı Modeli 107

3.11. Hücresel Üretimde Esneklik Alanında Yapılmış Diğer Çalışmaların İncelenmesi 110

4. HÜCRESEL ÜRETİMDE ÇİZELGELEME 119

4.1. Giriş 119

4.2. Üretim Planlama ve Kontrol 119

4.2.1. Hücresel Üretimde Üretim Planlama ve Kontrol 122

4.2.1.1. Peryod Parti Kontrolu 123

4.2.1.2. Malzeme İhtiyaç Planlaması ve Hücresel Üretimde Uygulanması 124

4.2.1.3. Tam Zamanında Üretim Yaklaşımı ve Hücresel Üretim 128

4.3. Üretim Çizelgeleme 129

4.4. Geleneksel Atelye Çizelgeleme 130

4.5. Hücresel Üretimde Çizelgeleme: Grup Çizelgeleme 135

4.6. Tek Aşamalı Grup Çizelgeleme Problemi 137

4.7. Çok Aşamalı Grup Çizelgeleme 140

4.7.1. Akış Tipi Üretim Hücrelerinde Grup Çizelgeleme 140

4.7.1.1. Akış Tipi Hücrelerde Statik Grup Çizelgeleme 140

4.7.1.2. Akış Tipi Hücrelerde Dinamik Grup Çizelgeleme 142

4.7.2. Atelye Tipi Hücrelerde Grup Çizelgeleme 142

4.7.2.1. Atelye Tipi Hücrelerde Statik Grup Çizelgeleme 143

4.7.2.2. Atelye Tipi Hücrelerde Dinamik Grup Çizelgeleme 143

5. DIŞSAL İŞ AKIŞI ESNEKLİĞİNE SAHİP HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME İÇİN GELİŞTİRİLEN KURALLAR VE BENZETİM MODELLERİ 146

5.1. Giriş 146

5.2. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları 147

5.2.1. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Ana Koşulu 147

5.2.2. Uzman Hücre ve Seçenek Hücre Tanımları 148

5.2.3. Hücresel Sistem Üzerinde Etkili Olan Faktörler: Geliştirilen Modelin Bağımsız Değişkenleri 148

5.2.3.1. Yük Dengesizlik Seviyesi 150

5.2.3.2. İşlem Süresi Artış Yüzdesi 151

5.2.3.3. Hazırlık Süresi Artış Yüzdesi....152
5.2.4. Parti İşlem Süresi Tanımı....153
5.2.5. Hücrelerin Yüklenme Yöntemi ve Hücre Yükü Tanımı....154
5.2.6. Geliştirilen Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Tanıtımı....155
5.2.6.1. Birinci Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralı: Kural A....155
5.2.6.2. İkinci Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralı: Kural B....161
5.2.6.3. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanmama Durumu: BAZ Durum...164
5.2.7. Geliştirilen Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Genel Değerlendirmesi....164
5.3. Performans Ölçütleri: Geliştirilen Modelin Bağımlı Değişkenleri....166
5.3.1. Birincil (Ana) Performans Ölçütleri....167
5.3.1.1. Ortalama İş Akış Süresi....167
5.3.1.2. Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi....167
5.3.1.3. Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı....168
5.3.2. İkincil (Yardımcı) Performans Ölçütleri....168
5.3.2.1. Ortalama Sistem Kullanım Oranı....168
5.3.2.2. Ortalama Hücre Kullanım Oranları....169
5.3.2.3. Ortalama Parti Teslim Gecikme Süresi....170
5.3.2.4. Teslimi Geciken Parti Adedi....171
5.4. Çalışmada Geliştirilen Benzetim Modelleri....171
5.4.1. Modellerin Parametreleri....172
5.4.2. Benzetim Modellerinin Yapıları....177
5.4.3. Modeli Tasarlanan Hücresel Sistemin Dışsal İş Akışı Esneklik Yeteneği....180
5.4.4. Benzetim Modelinin Genel Varsayımları....181
5.5. Benzetim Modelinin Testi ve Geçerliliği....182

6. BENZETİM SONUÇLARININ ANALİZİ VE YORUMU....185
6.1. Giriş....185
6.2. Budama Noktasının Belirlenmesi....186
6.3. Tekrarlı Koşum Yönteminin Uygulanması....191
6.4. Deney Tasarımı ve Faktörlerin Seviyeleri....194
6.5. Eşleştirilmiş T Testi Yöntemi ile İstatistik Analizin Uygulanması....197

6.6. Birincil Performans Ölçütleri Benzetim Sonuçlarının Analizi ve Yorumu....204
6.6.1. Ortalama İş Akış Süresi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu....206
6.6.2. Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu....212
6.6.3. Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçlarının Analiz ve Yorumu....216
6.7. İkincil Performans Ölçütleri Benzetim Sonuçlarının Analizi ve Yorumu....220
6.7.1. Ortalama Sistem ve Hücre Kullanım Oranları Sonuçlarının Analiz ve Yorumu....221
6.7.2 Ortalama Parti Teslim Gecikme Süresi ile Teslimi Geciken Parti Adedi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu....224
6.8. Sonuç ve Genel Değerlendirme....229

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....234

KAYNAKLAR....241

EKLER....260
EK A....260
EK B....262
EK C....267
EK D....271
EK E....272
EK F....297
EK G....316
EK H....320

ÖZGEÇMİŞ....334

KISALTMALAR

BBÜ : Bilgisayar Bütünleşik Üretim
TZÜ : Tam Zamanında Üretim
TKY : Toplam Kalite Yönetimi
GT : Grup Teknolojisi
HÜ : Hücresel Üretim
PPK : Periyot Parti Kontrol
MİP : Malzeme İhtiyaç Planlaması
ÜKP : Üretim Kaynak Planlaması
EETT : En Erken Teslim Tarihi
ÖGÖÇ : Önce Gelen Önce Çıkar
KİZÖ : Kısa İşlem Zamanı Önce
SİGÖ : Sisteme İlk Gelen Önce
KOZÖ : Kısa Operasyon Zamanı Önce
KİGÖ : Kuyruğa İlk Gelen Önce
EKİSÖ : En Kısa İşlem Süresi Önce
EKİS : En Kısa İşlem Süresi
AEKİSÖ : Ağırlıklı En Kısa İşlem Süresi Önce
EKİZÖ : En Kısa İşlem Zamanı Önce
İGİİ : İlk Gelen İlk İşlenir
İGİÇ : İlk Giren İlk Çıkar
İGÖ : İlk Gelen Önce
OİAS : Ortalama İş Akış Süresi
OPİSD : Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi
OKDSO : Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı
OSKO : Ortalama Sistem Kullanım Oranı
OHKO : Ortalama Hücre Kullanım Oranı
OPTGS : Ortalama Parti Teslim Gecikme Süresi
TGPA : Teslimi Geciken Parti Adedi
H_0 : Sıfır Hipotezi
H_1 : Alternatif Hipotez
İSAY : İşlem Süresi Artış Yüzdesi
HSAY : Hazırlık Süresi Artış Yüzdesi
YDS : Yük Dengesizlik Seviyesi
YDY : Yük Dengesizlik Yüzdesi
DİAE : Dışsal İş Akış Esnekliği (İng.: External Routing Flexibility)
DİAEKK : Dışsal İş Akış Esnekliğini Kullanma Kuralı
İng : İngilizce
dk. : Dakika
prç. ad. : Parça adedi

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 : Grup teknolojisinin sağladığı faydalar ve kaydedilen yüzde iyileşmeler 5

Tablo 2.1 : Hücre tasarımında operasyonel yöntemler alanındaki sınıflandırma ve ilgili çalışmalar 57

Tablo 3.1 : İşlem safhalarının operasyonlar halinde gruplandırılması 97

Tablo 3.2 : Üretim esnekliği ve hücresel üretim sistemlerinde esneklik alanında faydalı olabilecek bazı çalışmalar 118

Tablo 5.1 : Parti hacmi dağılımı 174

Tablo 6.1. : Yük dengesizliği seviyelerine karşı gelen yük dengesizliği yüzdeleri ve YDS = f (YDY) foksiyonunun tanımı 196

Tablo 6.2. : Faktörler ve seviyeleri 197

Tablo 6.3. : Ortalama OSKO ile uzman ve seçenek hücre ortalama OHKO değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları 223

Tablo 6.4. : Ortalama OPTGS değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları 227

Tablo 6.5. : Ortalama TGPA değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları 228

Tablo E.1 : Kural A için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları.....272

Tablo E.2 : Kural B için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları.....276

Tablo E.3 : Kural A için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları.....280

Tablo E.4 : Kural B için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları.....284

Tablo E.5 : Kural A için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları.....288

Tablo E.6 : Kural B için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları.....292

Tablo E.7 : Baz durum için sonuçlar.....296

Tablo F.1 : Kural A ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....297

Tablo F.2 : Kural B ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....299

Tablo F.3 : Kural A ile Kural B ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....301

Tablo F.4 : Kural A ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....303

Tablo F.5 : Kural B ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....305

Tablo F.6 : Kural A ile Kural B ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....307

Tablo F.7 : Kural A ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranlarının (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....309
Tablo F.8 : Kural B ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranlarının (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....311
Tablo F.9 : Kural A ile Kural B ortalama katma değersiz süre oranlarının (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları.....313
Tablo G.1 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS değerleri.....316
Tablo G.2 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD değerleri.....317
Tablo G.3 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerleri.....318
Tablo G.4 : Baz Durum için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS, ortalama OPİSD ve ortalama OKDSO değerleri.....319
Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları.....320
Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları.....327

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Hazırlık sürelerindeki azalmanın parti hacmi ve maliyetler üzerindeki olumlu etkisi 4
Şekil 2.1 : Akış tipi üretim sistemi ya da kitle üretimi 17
Şekil 2.2 : Sürekli proses tipi üretim sistemi 17
Şekil 2.3 : Proje tipi üretim sistemi 18
Şekil 2.4 : Atelye tipi üretim sistemi 19
Şekil 2.5 : Atelye tipi üretimde bir parçanın işlem süresi bileşenleri 19
Şekil 2.6 : Hücresel üretim sistemi 20
Şekil 2.7 : Ürün hacmi ve çeşitliliğine göre seçilebilecek üretim sistemi tipleri 23
Şekil 2.8 : Karma parça kavramı 27
Şekil 2.9 : Atelye tipi üretim hücreleri veya grup teknolojisi hücresi 34
Şekil 2.10 : Akış tipi üretim hücreleri veya grup teknolojisi akış hattı 35
Şekil 2.11 : Sanal hücreler ya da grup teknoloji merkezi ve fiziksel hücreler 36
Şekil 2.12 : Temel hücre içi makina yerleşim düzenleri 38
Şekil 2.13 : Parça makina matrisinin ilk durumu 48
Şekil 2.14 : Parça makina matrisinin blok diyagonal durumu 48
Şekil 3.1 : Gelecekteki endüstriyel değişimin maliyet eğrisi 68
Şekil 3.2 : Üretim esnekliğinin çeşitleri ve aralarındaki ilişkiler 71
Şekil 3.3 : Üretim esnekliği gereksinimi ve ilgili faktörler 81
Şekil 3.4 : Üretim esnekliği hiyerarşisi 82
Şekil 3.5 : Kaynakların esnekliği ile tüm sistemin esnekliği arasındaki ilişki .. 84
Şekil 3.6 : Hücresel sistemi etkileyen değişimler ve sistem elemaları üzerindeki etkisi 91
Şekil 3.7 : Hücresel üretimde esnekliğin hiyerarşik yapısı 93
Şekil 4.1 : Bir üretim planlama ve kontrol sisteminin ana bileşenlerinin arasındaki ilişkiler 120
Şekil 4.2 : Üretim çizelgeleme hiyerarşisi 121
Şekil 4.3 : Periyod parti kontrolünün tek çevrimli yapısı 124
Şekil 4.4 : Malzeme ihtiyaç planlamasının yapısı 126
Şekil 4.5 : Bir ürüne ait ürün ağacı ve malzeme ihtiyaç listesi 127
Şekil 5.1 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının ana koşulu 149
Şekil 5.2 : Parti bindirmeli (paralel) işleme ve parti işlem süresi 153
Şekil 5.3 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının grafik gösterimi 157
Şekil 5.4 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A için Kontrol Noktası A-1, A-2 ve A-3' de uygulanan karar yapısının akış diyagramı ve karar kademeleri 158
Şekil 5.5 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının grafik gösterimi 162
Şekil 5.6 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B için Kontrol Noktası B-1 ve B-2'de uygulanan karar yapısının akış diyagramı ve karar kademeleri 163

Şekil 5.7 : Baz durum uygulamasının grafik gösterimi.....165
Şekil 5.8 : SIMAN yazılım düzeni.....173
Şekil 5.9 : Parti hacmi dağılımı.....174
Şekil 5.10 : Partilerin gelişleri arası sürelerinin dağılımı: Üstel dağılım.....175
Şekil 5.11 : Parça işlem sürelerinin dağılımı: Normal dağılım.....175
Şekil 5.12 : Simetrik beta dağılımı.....176
Şekil 5.13 : Benzetim modellerinin basitleştirilmiş akış diyagramı.....179
Şekil 6.1 : Çalışmadaki istatistik yaklaşımın ana kademeleri.....186
Şekil 6.2 : Çalışmadaki benzetim modellerinin performans ölçütü çıktılarının genel davranışı.....187
Şekil 6.3 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 10000 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği.....189
Şekil 6.4 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 1000 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği.....190
Şekil 6.5 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 200 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği.....190
Şekil 6.6 : Tekrarlı koşumlar ve gözlemlerin gruplandırılması yöntemleri.....191
Şekil 6.7 : T testi istatistiğinin örnek hacmi (n) ile değişimi.....193
Şekil 6.8 : Serbestlik derecesi n – 1 olan t dağılımı ve çift taraflı test için α anlamlılık düzeyi (veya 1 – α güven düzeyi).....200
Şekil 6.9 : Serbestlik derecesi n – 1 olan t dağılımı ve tek taraflı test için $\alpha / 2$ anlamlılık düzeyi (veya 1 – ($\alpha / 2$) güven düzeyi).....202
Şekil 6.10 (a) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....207
Şekil 6.10 (b) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....207
Şekil 6.10 (c) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....208
Şekil 6.10 (d) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....208
Şekil 6.11 (a) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....213
Şekil 6.11 (b) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....213
Şekil 6.11 (c) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....214
Şekil 6.11 (d) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....214
Şekil 6.12 (a) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....217

Şekil 6.12 (b) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....217
Şekil 6.12 (c) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....218
Şekil 6.12 (d) : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi.....218
Şekil 6.13 : Ortalama OSKO ile uzman ve seçenek hücre ortalama OHKO değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları.....222
Şekil 6.14 : Ortalama OPTGS değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları.....227
Şekil 6.15 : Ortalama TGPA değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları.....228
Şekil A.1 : Çalışmada geliştirilen SIMAN programlarının p_{ci} parti işlem süresini hesaplama algoritması ile ilgili Gantt Şeması.....261
Şekil F.1 : Kural A ile Baz Durum OİAS değerlerinin eşleştirilmiş t testi için çalışmada elde edilen Minitab Proje Raporu örnek parçası.....315

SEMBOL LİSTESİ

e_{ij} : j amacını gerçekleştiren makina i nin verimliliği
w_j : Amaç j nin önem derecesinin ağırlığı
$\overline{T}$: Tüm amaçlar kümesi
T : Tüm amaçlar kümesine ait herhangi bir amaçlar alt kümesi
G_e : Genişleme esnekliği
B : Gerçek sistemden uzun dönemde beklenen kar
S : Genişleme esnekliği olmaması durumu için sistemden uzun dönemde beklenen kar
I : İdeal sistemden uzun dönemde beklenen kar
k : Toplam K adet farklı parçadan herhangi bir tanesi
d_k : k numaralı parçanın talebi
p : k parçasına ait toplam P_k adet işlem planından herhangi bir tanesi
m : Toplam M adet farklı makina tipinden herhangi bir tanesi
b_m : m tipi bir makinanın ömrü ile belirlenen zaman cinsinden kapasitesi
c : Toplam C adet faklı hücreden herhangi bir tanesi
S : Bir (kp) kombinasyonuna ait toplam S(kp) adet operasyondan herhangi bir tanesi
l : Bir (kpc) kombinasyonuna ait toplam L(kpc) adet üretim planından herhangi bir tanesi
C_{mc} : m tipi bir makinayı satın almanın maliyeti
Z_{mc} : c hücresinde yerleştirilen m tipi makinaların adedi
Max_c : c hücresine yerleştirilebilecek maksimum makina adedi
$X(lkpc)$: p işlem planı ve l üretim planı kullanılarak c hücresinde üretilen k parçası adedi
$c_{ms}(lkp)$: Bir (kp) kombinasyonuna ait bir s operasyonu için m tipi bir makina kullanmanın maliyeti
$t_{ms}(kp)$: Bir (kp) kombinasyonuna ait bir s operasyonu için m tipi bir makinanın kullanılması durumunda gerekli işlem süresi
c^* : Toplam C adet faklı hücreden herhangi bir tanesi
$h_{cc^*}(k)$: k numaralı parçayı c hücresinden c* hücresine taşımanın maliyeti
$a_{ms}(lkpc)$: 1, bir (kpc) kombinasyonuna ait bir l üretim planındaki bir s operasyonuna m tipi bir makinanın atanması durumunda;
0, diğer durumlarda
$a_{mc^*s}(lkpc)$: 1, bir (kpc) kombinasyonuna ait bir l üretim planındaki bir s operasyonuna c* hücresindeki m tipi bir makinanın atanması durumunda;
0, diğer durumlarda
YDS : Yük dengesizlik seviyesi
YDY : Yük dengesizlik yüzdesi

G_u : Uzman hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi

G_s : Seçenek hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi

G_n : Hücresel sisteme gelen tüm partilerin gelişleri arasındaki normal ortalama gelişler arası süre (çalışmadaki tüm sistemlerin ortalama talep düzeylerinin aynı olabilmesi için G_n sabit kabul edilmiştir).

İSAY, isay : İşlem süresi artış yüzdesi

I_{ui} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan partiye ait bir parçanın uzman hücrenin i makinasındaki parça işlem süresi

I_{si} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan partiye ait bir parçanın seçenek hücrenin i makinasındaki parça işlem süresi

HSAY, hsay: Hazırlık süresi artış yüzdesi

H_{ui} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan parti için uzman hücredeki i makinasının hazırlık süresi

H_{si} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan parti için seçenek hücredeki i makinasının hazırlık süresi

c : Uzman veya seçenek hücre: c = u ise uzman hücre,
c = s ise seçenek hücre.

p_{ci} : i partisinin c hücresindeki parti işlem süresi

h_{ci1} : i partisinin c hücresi içinde işleneceği ilk makinadaki hazırlık süresi

h_{cij} : i partisinin c hücresi içinde işleneceği j makinasındaki hazırlık süresi

n_i : i partisindeki parça adedi

t_{cij} : i partisine ait bir parçanın c hücresinin j makinasındaki parça işlem süresi

S_{ci} : i partisinin c hücresinde işleneceği makinaların cümlesi.

y_c : Uzman veya seçenek c hücresinin yükü

$y1_u$: Uzman hücre (başlangıç) yükü

$y1_s$: Seçenek hücre (başlangıç) yükü

$y2_u$: Uzman hücre yeni yükü

$y2_s$: Seçenek hücre yeni yükü

p_{ui} : i partisinin u uzman hücresindeki parti işlem süresi (i = 1,2,3,....,m)

p_{sk} : k partisinin s seçenek hücresindeki parti işlem süresi (k = 1,2,3,....,n)

p^*_{ui} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin uzman u hücresindeki parti işlem süresi

p^*_{si} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin seçenek s hücresindeki parti işlem süresi

m : Uzman veya seçenek c hücresinin ana giriş kuyruğu ile c hücresi içindeki toplam parti adedi veya
Kural A uygulaması öncesi (başlangıçtaki) u uzman hücresi ana giriş kuyruğu ve u uzman hücresi içindeki toplam parti adedi

n : Kural A uygulaması öncesi (başlangıçtaki) s seçenek hücresi ana giriş kuyruğu ve s seçenek hücresi içindeki toplam parti adedi veya
bir üretim periyodunda hücresel sistemde üretilen parti adedi

n^*_i : Kural A uygulaması sonucu uzman hücre ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilerek seçenek hücrede üretilmek üzere alınan i partisindeki parça adedi

h^*_{uil} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin u uzman hücresi içinde işleneceği ilk makinadaki hazırlık süresi

h^*_{uij} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin u uzman hücresi içinde işleneceği j makinasındaki hazırlık süresi

t^*_{uij} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisine ait bir parçanın u uzman hücresi içinde işleneceği j makinasındaki parça işlem süresi

S_{ui} : i partisinin u uzman hücresinde işleneceği makinaların cümlesi (uzman ve seçenek hücrelerdeki makinalar karşılıklı benzer olduğu için bir i partisinin s seçenek hücresinde işleneceği makinaların cümlesi S_{si} ile u uzman hücresinde işleneceği makinaların cümlesi S_{ui} aynıdır)

yhs : Artan yeni hazırlık süresi

nhs : Normal hazırlık süresi

OİAS : Ortalama iş akış süresi

R_i : i partisinin işlenmek için hücresel sisteme geliş anı

C_i : i partisinin tüm işlemlerinin tamamalanıp hücresel sistemden çıkış anı

OPİSD : Ortalama proses içi stok düzeyi

Δt_i : Sistem içindeki toplam parça adedinin değişmediği i zaman dilimleri

N_i : Δt_i uzunluklu i zaman diliminde sistem içindeki toplam parça adedi veya i hücresindeki toplam makina adedi

M : Bir üretim periyodunda sistemdeki toplam parça adedinin değişim sayısı veya farklı tipteki toplam makina adedi veya sistemdeki toplam hücre adedi

N : Üretimi tamamlanan toplam parti adedi veya toplam hücre adedi.

OKDSO : Ortalama katma değersiz süre oranı

P_i : i partisinin parti işlem süresi

OSKO : Ortalama sistem kullanım oranı

k_{ij} : i hücresindeki j makinasının zaman ile değişen değerlerine ait indis

$I_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının $\Delta t_{k_{ij}}$ zaman dilimindeki durumunu gösteren 0 veya 1 tamsayı değişkeni:

$I_{k_{ij}}$: 1, i hücresindeki j makinası hazırlık veya işleme durumunda,

$I_{k_{ij}}$: 0, i hücresindeki j makinası diğer durumlarda

$\Delta t_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$'nin değişmediği k_{ij} zaman dilimlerinin uzunluğu

$L_{k_{ij}}$: Bir üretim periyodunda i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$'nin ve ilgili zaman dilimi $\Delta t_{k_{ij}}$'nin toplam değişim sayısı

T : Hücresel sistemdeki toplam makina adedi

$OHKO_i$: i hücresinin ortalama kullanım oranı

$OPTGS$: Ortalama parti teslim gecikme süresi

$TGPA$: Teslimi geciken parti adedi

N_g : Üretimi teslim zamanından daha geç bitirilen parti adedi

B_i : i partisinin (tüm paçalarının) üretiminin bitirilme zamanı

T_i : i partisinin müşteriye teslim zamanı

K : Sabit çarpan (K=1.5)

x^* : Simetrik ve ölçekli beta dağılımlı hazırlık süresi rassal değişkeni

x : tanım parametreleri $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$ olan simetrik beta dağılımlı rassal değişken

$Beta(\alpha_1,\alpha_2)$: SIMAN fonksiyon kütüphanesindeki beta dağılımına uygun rassal sayı x' i üreten fonksiyon

$DREY$: Dışsal iş akışı esneklik yeteneği

MY : Makina yoğunluğu

I_{ik} : 1, eğer i partisinin (işinin) k hücresinde üretilebilmesi olanaklı ise
0, aksi halde

J : Farklı tipteki toplam iş (parti) adedi

I_{jk} : 1, eğer j tipi makina k hücresinde mevcut ise
0, aksi halde

ΔG_{-u} : Uzman hücreye gelen partilerin normal ortalama gelişler arası süresindeki azalma oranı

ΔG_{+s} : Seçenek hücreye gelen partilerin normal ortalama gelişler arası süresindeki artış oranı

H_0 : Sıfır hipotezi

H_1 : Alternatif hipotez

μ_1 : Sistem 1' in ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri

μ_2 : Sistem 2'nin ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri

j : Benzetim koşumlarına ait j'inci tekrar (j = 1,2, . . . n)

n : Örnek hacmi; yani sistem 1'in ve sistem 2'nin koşumlarının tekrar adedi

X_{1j} : Sistem 1'in koşumunun j inci tekrarına ait ortalama performans ölçütü

X_{2j} : Sistem 2'nin koşumunun j inci tekrarına ait ortalama performans ölçütü

Z_j : j tekrarı için sistemlerin ortalama performans ölçütleri arasındaki fark

δ : Z_j nin beklenen değeri (üzerinde güven aralığı oluşturulacak olan değer; yani iki sistemin ortalama performans ölçütleri arasındaki gerçek fark)

S : Ortalama performans ölçütleri arasındaki farkların standart sapması (örnek standart sapması)

$\bar{Z}$: Ortalama performans ölçütleri arasındaki farkların ortalaması (örnek ortalaması veya δ değerinin kestireci)

t : T test istatistiği

$t_{n-1,\,1-\alpha/2}$: n-1 serbestlik dereceli t dağılımı $\alpha/2$ üst uç olasılıklı değeri

μ_A : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı A uygulanması durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri

μ_B : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı B uygulanması durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri

μ_R : Hiçbir kuralın uygulanmaması durumu olan baz durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri

L : Ortalama proses içi stok düzeyi

λ : Birim zamanda gelen eleman (parça) adedinin beklenen değeri

W : Ortalama iş akış süresi

DIŞSAL İŞ AKIŞI ESNEKLİĞİNE SAHİP HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME

ÖZET

Grup teknolojisi parçalar ve bu parçaların üretimi için gerekli işlemlerin temelinde yatan benzerlikleri belirleme ve ekonomik olarak kullanma hedefine yönelik bir üretim felsefesidir. Hücresel üretim ise grup teknolojisi prensiplerinin üretim sistemi tasarımı ve yönetimine uygulanmasıdır. Diğer bir ifade ile belirli parça ailelerinin işlemesine tahsis edilmek üzere üretim hücrelerinin oluşturulması ve yönetimi hususu hücresel üretim kavramının ana fikrini oluşturmaktadır. Üretim hücresi bir parça ailesinin üretimi amacı ile fonksiyonel bakımdan farklı makinaların biri birine yakın bir şekilde yerleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Bir parça ailesi ise biçimsel tasarım veya üretim özellikleri bakımından benzer parçalardan oluşan bir parça topluluğudur. Hücresel üretim parti üretimi alanında atelye tipi üretim karşısında bir seçenek sunmaktadır. Hücresel üretim kavramının uygulanması sonucu çok ürünlü ve ufak hacimli parti üretimi üzerinde kütle üretimi etkisi sağlanır. Hücresel yerleşim, işlevsel bakımdan benzer makinaların farklı tipteki parçaları üretmek için birbirine yakın yerleştirildiği, atelye tipi yerleşime tümü zıt bir yapıdadır. Hücresel üretimdeki yerleşim planı üretim donanımının yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir.

Grup teknolojisi doğru olarak uygulandığı zaman çok faydalı olduğu ispatlanmış bir yaklaşımdır. Hücresel üretimin sağladığı yararlar akademisyen ve konun uzmanları tarafından yayınlanan olay araştırmaları, incelemeler ve makalelerde belirtilmektedir. Hücresel üretimin pek çok faydası olmakla birlikte sağladığı ana faydalar aşağıda sunulmaktadır:

- Hazırlık sürelerinde kısalma.
- İş akış sürelerindeki kısalma sonucu daha çabuk teslim ve daha güvenilir bir dağıtım sağlanması.
- Üretim stok düzeyi ile bitmiş ürün stok düzeyinde azalma.
- Malzeme taşıma işlemlerinde azalma.
- Takım ve tertibat çeşidinde azalma.
- İşgücü maliyetlerinde azalma.
- Ürün tasarım çeşidinde azalma.
- Üretim planlama ve kontrolde iyileşme.
- Yerleşim alanı kullanımında iyileşme.
- İşgörenlerin uzmanlaşmasında sağlanan iyileşme.
- Çalışanların ilişkilerinde, iş tatmininde, moral ve iletişimlerinde iyileşme.
- Kalitede iyileşme.
- Maliyetlerin tahmininde iyileşme.
- İş akışının basitleşmesi.
- Sistem yönetiminde kolaylaşma.

Hücresel üretim sistemlerinin sakıncalı yönleri ise aşağıda sunulmuştur:

- İlk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Düşük makina kullanımı.
- Üretim esnekliğinde azalma.

Parti üretimi alanında faaliyet gösteren pek çok firma rekabette üstünlük sağlayabilmek için üretim esnekliğini geliştirmeyi yaşamsal öneme sahip bir üretim hedefi olarak değerlendirmektedir. Kütle üretiminin gelişkin performansına sahip olmak amacı ile makinaların parça ailelerini işlemeye tahsis edildiği hücresel sistemler üretim esnekliğinin oldukça düşük olduğu kararlı durumlar için tasarlanmıştır. Hücresel üretim sistemleri üretim esnekliğine sahip olacak şekilde tasarlanabilir ve saf grup teknolojisi hücrelerinden esnek hücrelere kadar uzanan geniş bir aralıkta yer alan değişik tiplerde üretim hücreleri mevcuttur.

Saf grup teknolojisi hücre sistemi ile esnek hücre sistemi arasındaki ana fark ise saf grup teknolojisi sisteminin bir hücresi içinde üretilen bir parçanın bu hücre içinde tamamı ile işlenme zorunluluğu ve bir diğer hücrede işlenememesidir. Bu tür bir sistemde her hücre sadece dar bir parça aralığındaki parçaları işleyebilmek için gerekli olan tip ve sayıdaki makinalara sahiptir. Saf grup teknolojisi sistemlerindeki parça akışı parçaların sadece ait oldukları hücrelerde tümü ile üretilmeleri sebebi ile basitleşmiş olmakla birlikte bu sistemler geniş bir parça aralığındaki parçaları ve diğer hücrelere ait parçaları üretebilmek için yeterli esnekliğe sahip değildir. Esnek hücre sistemleri geniş bir aralıktaki çeşitli parçaları üretebilme yeteneğindeki hücrelerden oluşmaktadır. Bu tür bir yaklaşım sonucu her bir hücrenin, bütçe olanakları dahilinde, hemen hemen tüm makina tiplerini barındırdığı bir yerleşim düzeni oluşur. İşlevsel olarak benzer hücrelerin oluşmasını gerektiren esnek hücre sistemleri doğal olarak daha iyi bir dışsal iş akışı esnekliği (İng: external routing flexibility veya external work flow flexibility) olanağı sunmaktadır. Hücreler arası trafiğin artması, akış basitliğinin azalması ve her bir hücre içinde tümü ile üretilen parça oranındaki azalma esnek hücre sisteminin sakıncalı yönleridir. Esnek hücresel sistemlerinin tasarımı aşamasında dışsal iş akışı ile iş akışındaki basitlik gibi çelişik iki amaç arasındaki dengenin sağlanması gerekir.

Hücresel üretimin öncüleri tamamen bağımsız hücreler oluşturma gereğinin önemini belirtmiştir. Yeni ve gelişmiş malzeme taşıma ve atölye alanı kontrol sistemleri ise bu gerekliliğin anlamını yitirmesine neden olmuştur. Hücreler mevcut parça karışımı, talep hacmi ve talep yapısını karşılayabilecek tarzda bağımsız olarak oluşturulabilir. Fakat çok dinamik ve rekabetçi olan günümüz üretim ortamında büyük bir hızla değişebilen pek çok faktör zamanla hücreler arasında iş akışının oluşmasına sebep olabilir. Bu duruma neden olan önemli bazı faktörler aşağıda sunulmaktadır:

- Parça karışımı veya parça ailelerine ait üretim miktarlarının değişmesi.
- Fonksiyonel olarak özdeş olan makinaların farklı hücrelere dağıtılması sonucu seçenek iş akış hatlarının oluşması.
- Farklı parça ailelerini işleyen darboğaz makinaların gerekli olması.
- Hücreler arasında parçaların taşınmasını sağlayan malzeme taşıma sistemlerinin ekonomik olarak uygulanabilir olması.
- Pahallı ve özel amaçlı makinaların yüksek kullanım oraları ile ekonomik olarak kullanılmasının gerekliliği.
- Bazı parçaların bazı işlemler için diğer üretim tesislerine gönderilme zorunluluğu.
- Makina arızaları, vs.

Bu çalışmada değişen içsel ve dışsal çevre şartlarında faaliyet gösteren hücresel üretim sistemleri için önerilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralarının uygulanmasının sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile çalışmada parça karışımındaki veya talep dağılımındaki değişimler sonucu oluşan hücreler arası iş yükü dengesizliğinin çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarını uygulamak sureti ile nasıl giderilebileceği incelenmektedir. Bu çalışmada "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır. Bu tezin organizasyonu ise aşağıdaki kısımlarda sunulmaktadır.

Birinci bölümde kısa bir giriş ve altyapı verilmiştir. Grup teknolojisi, hücresel üretim ve hücresel üretimde üretim esnekliğinin önemi gibi hususlar birinci bölümde kısaca sunulmuştur.

İkinci bölümde ise grup teknolojisi ve hücresel üretim alanındaki güncel konular ile ilgili yayınların incelenmesi oldukça ayrıntılı olarak sunulmaktadır. İkinci bölümü oluşturan ana konular aşağıdaki gibidir:

- Üretim sistemleri.
- Üretim sistemlerinin tasarımı ve üretim sistemi seçimi hususu.
- Grup teknolojisinin tanımı ve tarihçesi.
- Grup teknolojisinin uygulama alanları.
- Hücresel üretim sistemleri.
- Üretim hücrelerinin özellikleri ve hücre içindeki donanımın yerleşim düzeni.
- Hücresel üretim sistemlerinin faydalı ve sakıncalı yönleri.
- Hücresel üretim sistemlerinin atelye tipi üretim ile karşılaştırılması.
- Hücresel üretim sistemlerinin tasarımı ve tasarım metotları.
- Hücresel üretim sistemlerinin uygulanması ve benzetimi ile ilgili yayınların incelenmesi.

Üçüncü bölümde üretim esnekliği ve hücresel üretim sistemlerinde esneklik konuları incelenmiştir. İkinci bölümü oluşturan ana konular aşağıdaki gibidir:

- Üretim esnekliği kavramı ve önemi.
- Üretim esnekliğinin çeşitleri ve ölçülmesi.
- Üretim esnekliğinin hiyerarşik yapısı ve esneklik çeşitleri arasındaki ilişkiler.
- Üretim esnekliği alanındaki diğer araştırmaların incelenmesi.
- Hücresel üretim sistemlerinde esneklik.
- Hücresel üretim sistemlerinde esnekliğin hiyerarşik yapısı.
- Hücresel üretim sistemlerinde esneklik çeşitleri.
- Hücresel üretim sistemlerinde iş akışı esnekliği ve ilgili kavramlar.
- İş akışı esnekliğinin hücresel üretim sistemlerinde uygulanması.
- Hücresel üretim sistemlerinde esneklik alanında yapılmış olan diğer çalışmaların incelenmesi.

Dördüncü bölümde hücresel üretim sistemlerinde çizelgeleme konusunu incelenmiştir. Ayrıca atelye tipi üretimde çizelgeleme problemi de bu bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümün ana yapısı aşağıdaki gibidir:

- Üretim planlama ve kontrol.
- Üretim çizelgeleme.
- Geleneksel atelye çizelgeleme.
- Hücresel üretimde çizelgeleme ve grup çizelgeleme.

Beşinci bölümde araştırma konusuna ait problem ayrıntılı olarak açıklanmıştır ve araştırma konusunu incelemek ve tanıtmak üzere uygun modeller geliştirilmiştir. Problemin incelenmesi için matematik programlama modellerinin kurulmasının mümkün olabilmesi olasılığına karşın bu tür bir yöntem incelenen konunun karmaşık doğası sebebi ile oldukça yetersiz bir yaklaşım olacaktır. Öncelikle matematik programlama modellerinin çözülebilir olabilmesi için yapılan kısıtlayıcı varsayımlar nedeni ile bu tür modeller sistemin yapısını yeterince ayrıntılı olarak ifade edemeyebilir. Ayrıca bilgisayarların sınırlı kapasitesinin çizelgeleme problemlerinin kombinasyonsal yapısının büyüklüğü karşısında yetersiz kalması veya uygun olmayan algoritmalar ve çözüm teknikleri sebebi ile kesin bir çözüm elde edilmesi kabul edilemeyecek kadar uzun bir süre gerektirebilir veya tamamen olanaksız olabilir. Son olarak ise matematik programlama modelleri üretim ortamlarının ve çizelgeleme problemlerinin dinamik yapısını tam olarak ifade etmek bakımından yetersiz olabilir. Dolayısı ile bu çalışma konusunun incelenmesi için diğer bir seçenek olan sezgisel prosedürler ve üretim benzetimi modelleri kullanılmıştır.

Altıncı bölümde benzetim sonuçlarının analiz ve yorumu gerçekleştirilmiştir. Benzetim deneyleri sonuçlarının istatistik ve grafik analizinden anlaşıldığı üzere bu çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması neticesinde hücresel üretim sistemine ait ortalama iş akış süresi, ortalama proses içi stok düzeyi ve ortalama katma değersiz süre oranı performans ölçütlerinin değerleri önemli derecede iyileştirilebilir. Ayrıca sistem performansındaki bu iyileşmenin ise uygulanan kuralın yapısı ile yük dengesizliği düzeyi, işlem süresi artış yüzdesi ve hazırlık süresi artış yüzdesi faktörlerinin seviyelerine bağlı olduğu belirlenmiştir.

Son bölümde sonuçlar ve öneriler sunulmuştur. Bu çalışma ile hücresel sistemlerde parça karışımındaki değişimler sonucu oluşan hücreler arası iş yükü dengesizliğinin dışsal iş akışı esnekliğini kullanmak sureti ile giderilebileceği ve dengelenebileceği belirlenmiştir. Benzetim deneylerinden açıkça anlaşıldığı gibi bu çalışmada tasarlanan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması sonucunda performans ölçütlerinde iyileşme sağlanması olanaklı olmaktadır. Ayrıca ileride yapılabilecek olan çalışmalar için de hücreler arasında yük dengesizliği koşulunda faaliyet gösteren hücresel sistemlerde dışsal iş akışı esnekliğini kullanmanın performans ölçütlerini iyileştirme üzerindeki etkinliğinin daha ayrıntılı olarak incelenmesi önerilmektedir.

SCHEDULING IN CELLULAR MANUFACTURING SYSTEMS WITH EXTERNAL WORK FLOW FLEXIBILITY

SUMMARY

Group technology is a manufacturing philosophy which attempts to identify and economically exploit the underlying sameness of parts and manufacturing processes. Cellular manufacturing applies group technology principles to the design and management of a manufacturing system. In other words, the main idea of cellular manufacturing concept is the formation and operation of manufacturing cells dedicated to the processing of a set of part families. A manufacturing cell can be defined as a group of functionally dissimilar machines located in close proximity to one another to produce a part family. A part family is a collection of parts which are similar in terms of shape design, or manufacturing features. Cellular manufacturing systems are proposed as an alternative to the job shop systems in batch manufacturing environment. The application of cellular manufacturing concept results in the mass production effect to the multi-product, small-lot-sized batch manufacturing. Cellular layout is the opposite of shop layout where sets of functionally similar machines placed together and dedicated to producing dissimilar parts. It should be noted that the cellular manufacturing layout involves the physical arrangement of the production facilities.

Cellular manufacturing is a well-established approach which has been proven to offer many advantages when implemented correctly. The benefits of cellular manufacturing and group technology have been well documented in published case studies, surveys, and articles by the industrial exponents of the technique and the academicians. There are numerous advantages attributed to cellular manufacturing and the main advantages are the following:

- Reduced set-up time.
- Reduced throughput times which give faster response and more reliable delivery.
- Reduced work in progress and finished inventory level.
- Reduced material handling effort.
- A smaller variety of tools, jigs and fixtures.
- Reduced product design variety.
- Better production planning and control.
- Better space utilization.
- Improved operator expertise.
- Improved human relations, job satisfaction, morale and communication.
- Improved quality.
- Improved cost estimate.
- Simplified work flow.
- Improved system management.

There are also some disadvantages associated with cellular manufacturing as follows:

- Increased capital investment.
- Lower machine utilization.
- Reduced manufacturing flexibility.

In order to obtain a competitive advantage many firms engaged in batch production recently consider the improved manufacturing flexibility as a vitally important manufacturing objective. Cellular manufacturing, however, is aimed at stable situations in which manufacturing flexibility is reduced to some extent since the machines are dedicated to the production of part families in order to gain the improved performance of mass production. Manufacturing flexibility can be designed into cellular manufacturing systems and there are numerous types of manufacturing cells ranging from pure group technology cells to flexible cells.

The main difference between a pure group technology cell system and a flexible cell system is that any part produced in any cell of a pure group technology system must be fully completed in that cell and cannot be rerouted to another cell. In such systems each cell has the number and types of machines only necessary to process a narrow part range. Pure group technology cell systems offer part flow simplicity since the parts should be produced within the cell but does not have sufficient flexibility to manufacture wide range of parts and parts from other cells. Flexible cell systems compose of cells designed with the ability to process larger variety of parts. Machines of the same type are generally distributed to different cells in order to gain manufacturing flexibility. This approach would often give a layout where each cell contains almost all the machine types available within the budged. Flexible cell system configuration leads to functionally similar cells which together offer a better external work flow flexibility (or external routing flexibility). Increased intercellular traffic, decreased flow simplicity and reduced proportion of parts fully produced within each cell are the shortcomings of a flexible cell system. The conflicting objectives of external work flow flexibility and work flow simplicity should be considered and balanced when designing such systems.

The pioneers of cellular manufacturing may have promoted the importance of establishing the totally independent cells. New and improved material handling and shop floor control systems have, however, proven this necessity to be outdated. Cells may be designed to be independent to handle the current mix of parts, demand volumes and demand patterns. But many factors which can change very fast in nowadays' highly dynamic and competitive manufacturing environment can cause work flows among the cells to happen in the future. Some of these factors are as follows:

- Part mix changes or manufacturing quantity changes for part families.
- Availability of alternative routes for parts when functionally identical machines get distributed to different cells.
- Bottleneck machines serving two or more part families.
- Feasibility of using material handling systems to carry parts among cells.
- High utilization rate of expensive special machines.
- Parts visiting sub contractors for some operations.
- Machine failures, etc.

This work investigates and analyses the effects of implementation of external work flow flexibility (or external routing flexibility) on the performance of the cellular manufacturing systems when they may operate under the varying conditions of internal and external manufacturing environment. In the study, it has been realized that the main reason to execute the external work flow (or external routing) policies is particularly the workload imbalances between the cells caused by the changes in part mix and demand distribution. The organization of this thesis is summarized below.

In chapter one, a brief background and introduction is given. An overview of the related issues such as group technology, cellular manufacturing, the importance of manufacturing flexibility in cellular manufacturing systems, etc. are shortly presented.

Chapter two provides the concepts, current issues and literature review in the field of group technology and cellular manufacturing in a detailed manner to some extent. The main sections of chapter two are as follows:

- Manufacturing systems.
- Design of manufacturing systems and the manufacturing system selection.
- Definition and the history of group technology.
- The application areas of group technology.
- Cellular manufacturing systems.
- Characteristics of manufacturing cells and layout of the equipment within cells.
- Benefits and shortcomings of cellular manufacturing systems.
- The comparison of cellular manufacturing with job shop manufacturing.
- Design and design methods of cellular manufacturing systems.
- Review of literature related to cellular manufacturing applications and simulation.

Chapter three presents the manufacturing flexibility and flexibility in cellular manufacturing systems. The main subjects treated in chapter three are as follows:

- Manufacturing flexibility concept and its importance.
- The types of manufacturing flexibility and their measurements.
- Hierarchical structure of manufacturing flexibility and relations between various flexibilities.
- Review of other research efforts in the field of manufacturing flexibility.
- Flexibility in cellular manufacturing systems.
- Hierarchical structure of flexibility in cellular manufacturing.
- The types of flexibility in cellular manufacturing.
- Work flow flexibility in cellular manufacturing and related concepts.
- Design of external work flow flexibility into cellular manufacturing systems.
- Review of other research efforts in the field of flexibility in cellular manufacturing systems.

Chapter four describes the scheduling in cellular manufacturing systems and presents the scheduling issues in job shops. The overall layout of chapter four is as follows:

- Production planning and control.
- Production scheduling.
- Traditional job shop scheduling.
- Scheduling in cellular manufacturing and group scheduling.

In chapter five, the research problem described in detail and the appropriate models developed to present and investigate the research matter in hand. Although the formulation of mathematical programming models may be possible to investigate the problem it has some serious shortcomings due to the complex nature of the subject. Firstly, mathematical programming models may not explain the behavior of the system well enough since a number of constraining assumptions should be employed to make it tractable. Secondly, in many cases, exact solutions are difficult, time consuming or impossible to achieve owing to either the limitations of computers to manage the combinatorial structure of the scheduling problems or inappropriate algorithms and solution techniques. Lastly, the mathematical programming models cannot capture the dynamic nature of the manufacturing environments and scheduling problems. Therefore, as an alternative approach, this work considers some heuristic procedures and employs the manufacturing simulation models to investigate the research matter.

In chapter six the analysis and interpretation of the simulation results have been carried out. The statistical and graphical analysis of the results of simulation experiments have showed that the average throughput time, mean work-in-process inventory and mean non-value-added-time ratio performance measure of a cellular system can be improved to an important degree when the proposed decision rules exploiting the external work flow flexibility (or external routing flexibility) of the system is implemented. However the improvement seem to be related to the rules applied, the level of load imbalance, the level of percentage increase in operation time and the level of percentage increase in set up time.

The last chapter provides the conclusion of the work and the suggestions. In the study, It has been concluded that inefficiencies caused by part load imbalances between cells as a result of part mix changes in cellular manufacturing systems can be overcome and compensated by taking advantage of external work flow flexibility (or external routing flexibility) implementation. The simulation experiments have made it clear that some improvements in performance measures are possible when external work flow flexibility (or external routing flexibility) is exploited by applying the rules designed in the study. It is advised that further work should be carried out to determine and measure more precisely the effect of the work flow (or routing) flexibility implementation on the level of performance improvement in cellular systems operating under the conditions of the unbalanced load distribution between cells.

1. GİRİŞ

1.1. Üretim Yaklaşımları ve Hücresel Üretim

Son yıllarda artan uluslararası ve ulusal rekabet nedeni ile gelişmiş ülkelerdeki parti tipi üretim alanında faaliyet gösteren pek çok firma rekabet yeteneğini güçlendirmek için üretim sistemlerini yeniden düzenlemekte ve yeni teknolojileri üretim sistemlerine uygulamaya özen göstermektedir. Bu firmalar üretim sistemlerinin verimlilik, üretkenlik ve üretim esnekliğini özellikle iyileştirmeye çalışmaktadır. Son yıllarda üretim sistemlerinin etkinliğini iyileştirmek amacı ile iki önemli yaklaşım ve felsefe geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan bir tanesi olan ve ilk defa ABD 'de geliştirilen bilgisayar bütünleşik üretim (BBÜ, İng: computer integrated manufacturing, CIM) felsefesinin ana fikri; faaliyetlerin bilgisayarla yerine getirilmesi, veri tabanları ve bilgisayar ağları ile firma fonksiyonlarının birbirine bağlanması ve bütünleştirilmesi sureti ile üretimdeki iyileşmeyi gerçekleştirmek şeklinde ifade edilebilir. Japonya'da geliştirilen bir diğer yaklaşım olan tam zamanında üretim ve toplam kalite yönetimi (TZÜ ve TKY, İng: just in time manufacturing & total quality management, JIT ve TQM) felsefesi ise israfın önlenmesi, çalışanların katılımı ve malzeme akışının iyi düzenlenmesi sureti ile üretimde iyileşme sağlanabileceğini öne sürer. Tam zamanında üretim ve toplam kalite yönetimi felsefesi özellikle probleme yönelik ve tutarlı bir yaklaşımdır [1].

Bilgisayar bütünleşik üretim ile tam zamanında üretim arasında köprü kuran bir temel niteliğinde olan grup teknolojisi (GT, İng: group technology) felsefesi ise üçüncü bir yaklaşımdır. Grup teknolojisi ürün ve faaliyetler arasındaki benzerliklerden faydalanmak sureti ile farklılıkların yönetimini sağlayan bir üretim ve mühendislik yönetimi yaklaşımı şeklinde ifade edilebilir. Grup teknolojisi kavramı ilk kez 1930 'larda eski Sovyetler Birliği'nde geliştirildi. Daha sonra Doğu ve Batı Avrupa, Japonya ve ABD'de uygulama alanı buldu. Günümüzde grup teknolojisi yaygın bir şekilde ilgi çekmektedir ve dünyanın hemen her yerinde grup

teknolojisi uygulamalarına rastlamak olanaklıdır. Grup teknolojisi üretim ve tasarım bakımından benzer özelliklere sahip farklı parçaların aileler şeklinde gruplanmasını amaçlayan bir üretim felsefesi şeklinde tanımlanabilir.

Grup teknolojisinin üretim sistemlerinde uygulanışı üç şekilde olabilir. Hazırlık sürelerinin kısaltılması ile ilgili verimliliği sağlamak için parçalar arasındaki benzerliklerin doğal bir şekilde kullanılması, parti üretimi alanındaki, en yaygın ve basit grup teknolojisi uygulamasıdır. Parça ailelerinin oluşturulması ve fonksiyonel düzenlemedeki orijinal bölümlerinde kalmaları şartı ile makinaların bu ailelere tahsis edilmesi, bir diğer uygulamadır. Parti üretimi alanında en ileri düzeydeki grup teknolojisi uygulaması ise ilgili parça ailelerinin işleneceği hücreleri oluşturmak için makinaların fiziksel anlamda biri birine yakın olarak yerleştirilmesi şeklindeki hücresel üretimdir [2,3].

Grup teknolojisinin parti üretimi alanındaki uygulaması olan hücresel üretim (HÜ, İng: cellular manufacturing, CM) parça ailelerinin üretimi için tahsis edilen makina gruplarının yer aldığı üretim hücrelerinin tasarımı ve yönetimi ile ilgilidir. Akış tipi üretim hatları ve grup teknolojisinin temeli olan farklı yetenek ve işleme özelliklerine sahip makinaların benzer parçaları verimli olarak üretmek için biri birine yakın olarak yerleştirilmesi fikri, atelye tipi üretime karşı bir seçenek oluşturmuştur. Her bir üretim hücresi kendine ait parça ailesinin üretimi amacı ile fonksiyonel bakımdan farklı makinaların biri birine yakın bir şekilde yerleştirilmesi ile oluşturulur. Bir parça ailesi ise tasarım, şekil ve üretim yöntemi bakımından benzer parçalardan oluşan bir topluluktur.

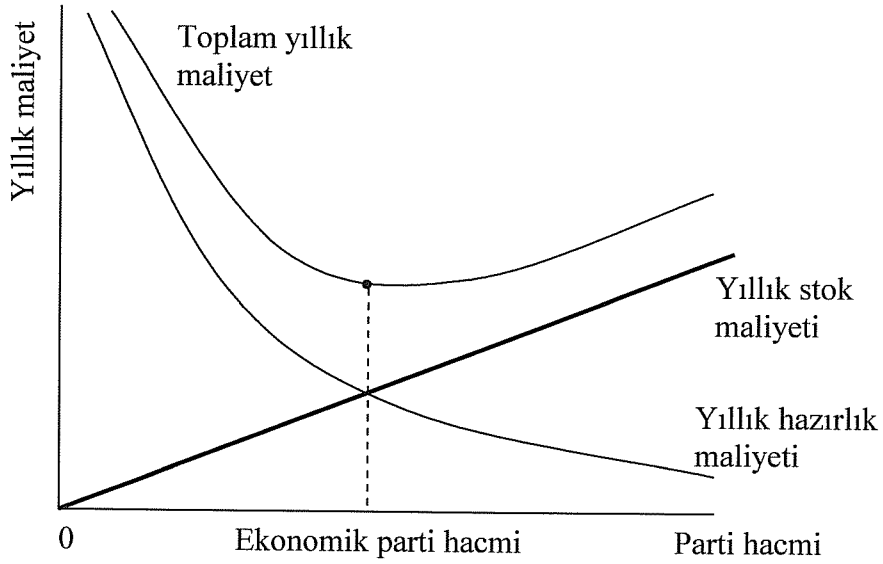
Hücresel üretim parti üretimi alanında atelye tipi üretim karşısında bir seçenek sunmaktadır ve hücresel yerleşim düzeni atelye tipi yerleşimden farklıdır. Hücresel yerleşim yaklaşımına tümü ile zıt bir tutum sonucu atelye tipi yerleşimde işlevsel bakımdan benzer makinalar farklı tipteki parçaları üretmek için biri birine yakın yerleştirilir. Orta düzeydeki üretim hacmi ile ürün yelpazesine sahip üretim ortamları grup teknolojisinin uygulanması için en uygun koşulları sağlar. Üretim hacminin çok yüksek olduğu ve ürünün çeşidinin oldukça az sayıda ise akış tipi hat yerleşimi en uygun seçimdir. Ürün yelpazesi çok geniş ve değişken olan üretim ortamları için işlevsel bölümlere sahip atelye tipi yerleşim önerilmesine karşın çok farklı üretim

koşullarındaki grup teknolojisi uygulamaları sureti ile önemli iyileşmeler sağlandığı belirlenmiştir [4].

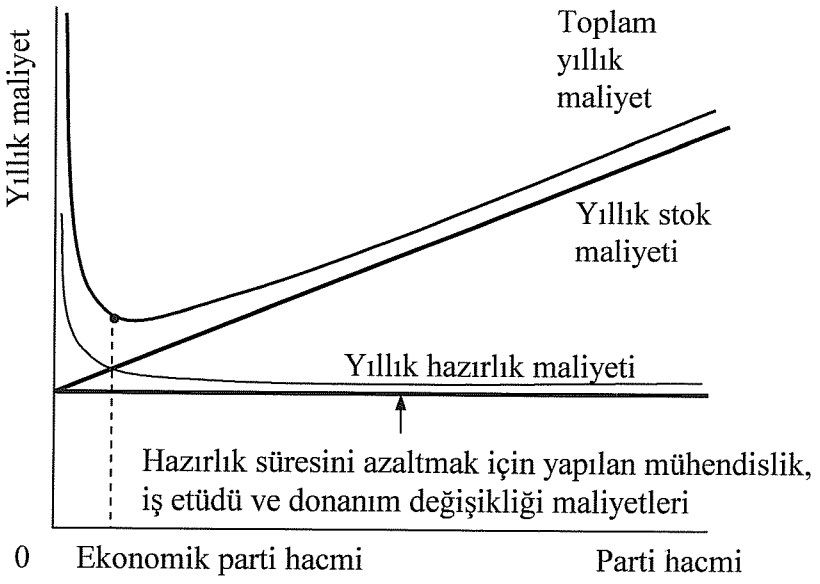
İşyerindeki yerleşiminin yeniden düzenlenmesini gerektiren hücresel üretimi, makinaların sadece belirli parça ailelerini işlemek üzere tahsis edilmesi şeklinde yorumlamamak gerekir. Hücreler benzer parçalardan oluşan parça ailelerinin üretimine tahsis edildiği için her hücredeki takım ile tertibat gereksinimi standart bir şekilde tasarlanabilir ve dolayısı ile hazırlık süreleri kısalır. Kısalan hazırlık süreleri ise daha ufak parti hacimleri, daha düşük üretim içi stok düzeyleri, daha kısa çevrim süreleri ve daha düşük üretim maliyetlerinin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlar (Şekil 1.1). Bu durum ise önemli stratejik faydalar sunar. Ufak boyutlu hücrelerin kontrolu nedeni ile hücresel üretim sistemlerinin yönetimi daha kolaydır. Hücresel üretim sistemlerinde iş tatminin daha iyi olması ise çalışanların veriminde artış sağlar. Hücresel üretim tam zamanında üretimin uygulanmasını kolaylaştırır.

Günümüz ağır rekabet koşulları içinde faaliyet gösteren ve ön plana çıkmak isteyen firmalarda karşılaşılan zor problemlerin çözümü için grup teknolojisi yaklaşımının etkin bir tarzda uygulaması gereğini bu sonuçlar açıkça ortaya koymaktadır. Hücresel üretimin sağladığı faydalar çeşitli çalışmalarda yaygın olarak belirtilmektedir ve bu faydalar topluca aşağıda sıralanmıştır [2, 3, 5, 6, 7, 8]:

- İş akış sürelerinde kısalma,
- Hazırlık sürelerinde kısalma,
- İşgücü maliyetlerinde azalma,
- Çalışanların iş tatmininde iyileşme,
- Stok düzeyinde azalma,
- Kalitede iyileşme,
- Üretim planlamada iyileşme,
- Malzeme taşıma maliyetlerinde azalma,
- Takım ve tertibat maliyetlerinde azalma,
- İş yeri alan ihtiyacının azalması,
- Maliyetlerin tahmininde iyileşme,
- İş akışının basitleşmesi,
- Sistem yönetiminde kolaylaşma.



(a) Hazırlık sürelerinin kısaltılmasından önceki durum



(b) Hazırlık sürelerinin kısaltılmasından sonraki durum

Şekil 1.1 : Hazırlık sürelerindeki azalmanın parti hacmi ve maliyetler üzerindeki olumlu etkisi

Wemmerlov ve Hyer [2] tarafından grup teknolojisi üretim sistemi uygulamasına geçen firmalar üzerinde yapılan bir araştırmanın sonucu Tablo 1.1' de verilmektedir. Bu çalışmada grup teknolojisi uygulamasına geçen firmaların değişik performans ölçütlerinde sağlanan ortalama, en yüksek ve en düşük iyileşmeler yüzde olarak ifade edilmektedir.

Tablo 1.1 : Grup teknolojisinin sağladığı faydalar ve kaydedilen yüzde iyileşmeler (Wemmerlov ve Hyer [2])

İyileşmenin Kaynağı	**Kaydedilen Yüzde İyileşme Oranı**		
	Ortalama	En Yüksek	En Düşük
İş akış süresi	45.6	90.0	5.0
Üretim içi stok	41.4	80.0	8.0
Malzeme taşıma	39.3	83.0	10.0
İş tatmini	34.4	50.0	15.0
Takım ve tertibat adedi	33.1	85.0	10.0
Hazırlık süresi	32.0	95.0	2.0
Alan gereksinimi	31.0	85.0	1.0
Kalite düzeyi	29.6	90.0	5.0
Bitmiş ürün stokları	29.2	75.0	10.0
İşçilik maliyeti	26.2	75.0	5.0
Makina kullanım oranı	23.3	40.0	10.0
Makina adedi	19.5	50.0	1.0

Tüm faydalı yönlerine karşın, grup teknolojisi yaklaşımının bir uygulaması olan, hücresel üretim sistemlerinin karşısında başka bir seçeneği olmayan, en gelişmiş, en iyi ve ideal sistemler olduğu gibi yanlış bir düşünce oluşmamalıdır. Grup teknolojisi yaklaşımına özgün olan felsefe gereği düşük üretim içi stoklar ile üretim yapılması ve gruplanan makina kapasitelerinin ürün grupları arasında paylaşılması sonucu; makina arızaları, işgücü performansındaki dalgalanmalar, aşırı yüklenme ve özellikle ürün karışımı veya ürünlerin talebindeki değişimlerin neden olduğu yük dengesizliği gibi, beklenmedik içsel ya da dışsal etkiler karşısında, grup teknolojisi ya da hücresel üretim sistemleri daha hassas ve zayıf konuma düşmektedir. Daha yüksek değerlerdeki üretim içi stok düzeyinde faaliyet gösteren ve seçenek iş akış hatlarını (İng: alternate routes) ya da seçenek makinalar ile kapasitelerini kullanma yeteneğine sahip atelye tipi üretim sistemlerinin içsel veya çevresel değişikliklere karşı hassasiyet düzeyi daha düşük ve tolerans kabiliyeti ise daha yüksek olmaktadır.

Dolayısı ile grup teknolojisi veya hücresel üretim sistemlerinin içsel ya da çevresel değişikliklere karşı daha dayanıklı olarak tasarımı için gerekli stratejik ve taktik yöntemler ile politikalar ve parametrelerinin araştırılması önem arz etmektedir. Hücresel üretimde makinaların parça ailelerine tahsis edilmesi sonucu üretim esnekliğinin olumsuz yönde etkilenmesi hususu, son yıllarda, araştırmacılar tarafından tartışılmaya ve incelenmeye başlanmıştır.

Parti üretimi yapan sistemlerde uygulanan çizelgeleme teknikleri ile ilgili benzetim çalışmaları özellikle atelye tipi üretimdeki çizelgeleme alanında yapılabilecekleri fazlası ile ortaya koymaktadır. Çalışmalarda tipik olarak ürün karışımının değişmediği kabul edilmekte ve benzetim deneyinin yapıldığı zaman dilimindeki ürün karışımı değişmemektedir. Bazı çalışmalarda karışımdaki her tip ürünün talep miktarını birlikte arttırmak veya azaltmak suretiyle ürün karışımında bir çeşit değişiklik göz önüne alınmasına gayret edilmesine karşın, gerçekte bu çalışmalarda ürün karışımı sabit tutulmakta ve sadece üretim biriminin yükleme seviyesi değiştirilmektedir. Bununla birlikte gerçek üretim ortamlarında ürün karışımı değişebildiği için Wagner [9] benzetim deneylerinden daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi amacı ile ürün karışımını etkileyen talep değişiminin modellerde dikkate alınması gereğini belirtmektedir. Aynı zamanda Wagner [9] üretimin gerçek doğasının daha etkin olarak incelenmesini sağlamak üzere kısıtlayıcı kabullerin gevşetilmesi gereğini de belirtmektedir.

Moiser ve Taube [10] Grup teknolojisi sistemlerinin benzetimi alanındaki çalışmaların oldukça yeni ve bu sistemler ile ilgili benzetim deneylerinin de yetersiz olduğunu belirtmektedir. Moiser ve Taube [10] hücresel üretim sistemlerindeki esneklik ile verimlilik özellikleri arasındaki karşıtlığı değerlendiren ve kapasite kısıtlamaları altında iş sıralama kurallarını inceleyen çalışmaların gereğini vurgulamaktadır.

Wemmerlöv ve Hyer [11] parça aileleri ile makina gruplarının oluşturulması ile hücrelerin tasarımı alanında yayınlanmış çok sayıda makale ve çalışma olduğunu, fakat ortam ve sistem parametrelerindeki değişimlere göre hücresel üretimin sağladığı performansı değerlendiren az sayıda çalışmanın olduğunu belirtmektedir. Sassani [12] ise çeşitli ekonomik ve yönetsel yararlarına karşın zamanla değişen talep

ve ürün karışımı gibi nedenlerle Hücresel üretimde yük dengesizliği oluştuğunu belirtir.

Bir uçta saf grup teknolojisi hücreleri diğer uçta esnek hücreler olmak üzere çok çeşitli hücresel üretim sistemleri vardır. Saf grup teknolojisi hücresel sistemlerinde, teorik olarak, herhangi bir hücrede işlenmesi planlanan bir parti ancak aynı hücre içinde tamamlanır ve bu parti işlenmek için başka bir hücreye gönderilemez. Bu tip bir sistemde, her bir hücre ancak dar bir parça dağılımına sahip aileleri işlemek için gereken tip ve sayıda makinaya sahiptir. Dolayısı ile bir saf grup teknolojisi hücresi hücre içinde işlenmek üzere planlanmış parçalar için sade ve basit bir iş akışı sağlar, fakat harici parçaların işlenmek için gereken esneklikten yoksundur. Esnek hücresel sistemlerde ise her hücre geniş bir aralıkta dağılmış olan parça çeşitlerini işleyebilecek yeteneğe sahip olacak tarzda tasarlanır. Bu sistemlerde aynı ya da benzer işlemleri gerçekleştirebilen makinalar farklı hücrelere yerleştirilebildiği için her hücrede hemen her işlemi gerçekleştirebilecek makinalar mevcuttur. Bu tarz bir düzenleme ile fonksiyonel açıdan benzer hücrelerin oluşturulması sağlandığı için sistem bütün olarak ileri düzeyde hücreler arası iş akışı esnekliğine (İng: routing flexibility) sahiptir [13].

Hücrelerin tümü ile biri birinden bağımsız olarak tasarlanması gereği hücresel üretimin öncüleri tarafından özellikle belirtilmiştir. Fakat modern malzeme taşıma ve üretim kontrol sistemleri bu gerekliliği geçersiz kılmıştır. Tasarım döneminde mevcut olan ürün karışımı, talep hacmi ve talep dağılımı koşullarına uygun bağımsız hücreler tasarlanabilir, fakat zaman içinde değişen koşullar nedeni ile hücreler arasında parçaların taşınması gerekli olabilir. Hücreler arasında parça akış ve/veya hareketlerine neden olabilecek bazı koşullar aşağıda verilmiştir [14]:

- Makina arızaları.
- Tek ve pahallı olan bir makinayı devamlı yüklü tutma gereği.
- Bazı işlemler için bazı parçaların diğer üreticilere gönderilmesi.
- Ürün karışımındaki değişimler.
- Parça ailelerine ve/veya parçalara ait talep ve üretim miktarlarındaki değişimler.
- Ekonomik nedenler ile iki ya da daha fazla parça ailesine ait parçaları işleyen darboğaz makinaların kullanma zorunluluğu.

- Hücreler arası malzeme taşıma sistemleri kullanımının ekonomikliği.
- Aynı tip makinaların değişik hücrelere atanması durumunda seçenek iş akış hatlarının (İng: alternate routes) kullanılabilmesi.

Sistem tasarımında dikkate alınması gereken değişkenler sistemin yapısı ve işletimi ile ilgili değişkenler şeklinde iki gruba ayrılabilir [15]. Uygulanması düşünülen hücresel sistemlerin benzetim yöntemi ile değerlendirilmesi için sistem yapısı ve işletimi ile ilgili değişkenlerin dikkate alınması gerekir. Makina sayısı gibi yapısal değişkenler ile makina kullanımı ve iş akış süresi gibi sistemin işletimi ile ilgili değişkenler arasında bir denge oluşturmaya özen gösterilmelidir [11].

Hücresel sistem tasarımı ve uygulamalarının değerlendirilmesinde kullanılan ölçütlerden bazıları aşağıdaki gibidir [11]:

1. İş akış süresinin en düşük değerde olmasının sağlanması.
2. Hazırlık sürelerinin en düşük değerde olmasının sağlanması.
3. Stok düzeyinin en düşük değerde olmasının sağlarması.
4. Makina ve işgücü gibi kaynakların kullanım oranın en yüksek değerde olmasının sağlanması.
5. Çıktı miktarının en yüksek değerde olmasının sağlanması.
6. Hücreler içinde ve arasındaki malzeme taşıma adedinin en düşük değerde olmasının sağlanması.
7. İşletim maliyetlerinin en düşük değerde olmasının sağlanması.
8. Yatırım düzeyinin en düşük değerde olmasının sağlanması.
9. Makinaların tekrar yerleştirilme maliyetinin en düşük değerde olmasının sağlanması.

Hücresel sistem tasarımı ve uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli bazı husus ve kısıtlar ise aşağıdaki gibidir [11]:

1. Makina adedi cinsinden ifade edilen hücre boyutlarının üst ve alt sınırları.
2. Uygun düzeyde esneklik.
3. Hücrelerin yaşam süresinin yeterince uzun olması.

Bu özellik ve amaçların bazıları arasında çelişki olması doğaldır. Yukarıdaki hücre özellikleri arsında esneklik ve hücrelerin yaşam süresi oldukça önemlidir. Hücresel sistemin ekonomik ve teknolojik yaşam süresi sistemin sahip olduğu esneklik düzeyi

ile yakından ilgilidir. Gelecekteki belirsizlikler ile ilgili riskleri azalttığı için esneklik üretim sistemlerinin tasarımı ve işletimin sırasında yönetsel açıdan dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir. Esnek üretim sistemleri ve programlanabilir otomasyonun son yıllarda önem kazanması ile birlikte esneklik kavramı yaygın olarak kullanılmaya başlandı. İş akış esnekliği (İng: routing flexibility), hacim esnekliği, malzeme esnekliği ürün karışımı esnekliği, ürün tadilatı esnekliği gibi değişik esneklik tipleri vardır. Sistemin yapısının ve işletiminin tasarımı ile ilgili kararlar sistemin esnekliği üzerinde etkilidir. Parçaların seçenek hücrelerde işlenebilmesini veya hücreler içindeki seçenek iş akış hatlarının (İng: alternate routes) kullanılabilmesini ifade eden iş akışı esnekliği (İng: routing flexibility) hücresel üretim sistemleri için oldukça önemlidir. Esnekliğin ölçümü ile tanımı halen kesin bir şekilde yapılamamıştır. Ayrıca, esneklik düzeyindeki bir birimlik azalmanın sistem performansında kaç birimlik bir azalma oluşturacağını ifade eden bir ilişki de henüz geliştirilememiştir. Esneklik gibi önemli bir kavramın anlaşılabilmesi ve yönetilebilmesi için üretim sistemlerinde esnekliğin incelenmesi alanında araştırmalar yapılması gereklidir [11].

Bazı makinaların kullanım oranı artar ise yük dengesizliği oluşur ve hücreler arasında ve içinde yük dengesi her zaman sağlanamaz. Yük dengesizliği düzeyi hücrelerin tasarımı, mevcut ürün veya parça karışımı ile hücrelerin çizelgelenme ve işgücünün atanma şekline bağlıdır [2]. Esnekliğin uygun düzeyde olması, yük dengesizliği düzeyinin en düşük değerde tutulması ve akış tipi hücrelerin oluşturulması hücre tasarımındaki önemli amaçlar arasındadır. Mevcut üretim birimlerinde üretilen mevcut parçaların iş akış hatları (İng: routes) uygun ve uyumlu değil ise iyi bir hücresel sistem tasarımı için parçaların iş akış hatları (İng: routes) yeniden düzenlenmelidir. Esnekliğin sağlanabilmesi için hücreler arasında ve hücreler içinde seçenek iş akış hatlarının (İng: alternate routes) oluşturulması gereklidir [11].

Wemmerlöv ve Hyer [2] hücresel üretim alanındaki araştırmalar arasında parça ailelerinin çizelgelemesi ile hücresel üretimde esneklik konularının incelenmesi gereğini özellikle belirtmiştir. Hyer ile Wemmerlöv [3] grup teknolojisi ve hücresel üretim ile ilgili çalışma alanlarını aşağıdaki gibi sekiz başlık altında gruplamıştır:

1. Genel
2. Sınıflandırma ve kodlama yöntemleri
3. Üretim hücrelerinin tasarımı
4. Malzeme ihtiyaç planlaması ve grup teknolojisi
5. Üretim planlama ve kontrol
6. Grup teknolojisinin işyeri sosyal yapısı üzerindeki etkisi
7. Vaka çalışmaları
8. Üretim hücreleri uygulamalarının incelenmesi ve hücresel üretimin evrimi

Geçmişte hücrelerin tasarımı ve değerlendirilmesi için ileri düzeyde gelişmiş karar modelleri mevcut değildi. Dolayısı ile hücrelere yerleştirilebilecek makina adedi veya kapasite dengesizliği gibi değerlendirmeler için deterministtik (İng: deterministic) ve statik yük hesaplamaları geçmişte sık sık kullanılan yöntemlerdi. Son dönemlerde ise ayrıntılı hücresel sistem tasarımlarını dinamik olarak değerlendirmek için analitik kuyruk modelleri ve stokastik (İng: stochastic) benzetim modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır Hücresel üretim sistemlerinin esnekliği, çizelgelenmesi, tasarlanması gibi değişik problemlerin incelenmesi için benzetim, kuyruk teorisi, sezgisel algoritmalar veya matematik programlama gibi çeşitli yöntemlerin uygulandığı modeller kullanılabilir. Hücresel üretim sistemlerinin performansı üzerinde esnekliğin etkisinin incelenmesi önemli bir araştırma konusudur [11].

Kang ve Wemmerlöv [16] seçenek iş akış hatlarını (İng: alternate routes) dikkate alan hücre tasarım yöntemlerinin oldukça yeni ve bu alandaki araştırmaların sayısının da az olduğunu belirtmektedir. Atelye tipi sistemlerin işlevsel esnekliği ile birlikte akış tipi üretimin verimlilik özellikleri gibi çelişen özelliklere sahip hücresel sistemlerin tasarlanabilmesi hususu genellikle araştırılmamıştır. Talepteki ve ürün karışımındaki değişimleri karşılayabilecek derecede esnek ve akış tipi üretim kadar verimli olabilecek hücresel üretim sistemlerinin tasarlanmasına ihtiyaç vardır [13].

Hücresel üretim ve grup teknolojisi doğru olarak uygulandığında birçok faydalar sağlayan köklü bir kavramdır. Bu tekniklerin endüstriyel uygulayıcıları tarafından yayımlanan çeşitli vaka çalışmalarında hücresel üretim ve grup teknolojisinin yararlı yönleri ortaya konmuştur. Sistem performansını iyileştirmek için hücresel üretim sistemleri yük dengesizliği karşındaki esnekliği önemli derecede az olan kararlı

durumlar için tasarlanmıştır. Bu kısımda çalışmaları kısaca incelenen çeşitli araştırmacıların belirttiği gibi hücresel üretim sistemlerinin yük dengesizliği koşullarındaki davranışı ve esnekliği alanında araştırma yapılması gereği vardır. Ayrıca rekabette lider olabilmek için günümüzde birçok firma esnekliği önemi gittikçe artan bir üretim hedefi olarak görmektedir.

1.2. Değişken Ürün Karışımı Ortamındaki Hücresel Üretim Sistemlerinin Davranışı

Hücresel üretim sistemleri atelye tipi üretime karşı diğer bir seçenektir. Atelye tipi üretim (fonksiyonel düzenleme) genelde değişken talep ve ürün karışım dağılımına uyum sağalmak amacı ile tasarımlanır, hücresel üretim sistemleri ise akış tipi üretimin sağladığı işlevsel faydalar ile birlikte atelye tipi üretimin esnekliğine de sınırlı ölçüde sahiptir. Özellikle uzun dönemdeki talep değişimlerinin karşılanabilmesi için hücrelerdeki donanıma yapılan yatırım ile esneklik düzeyindeki azalma arasında bir denge sağlanması gerekir. Değişen talep ve ürün karışım dağılımı koşullu altında faaliyet gösteren bir hücresel sistemi aşağıdaki davranışları sergileyebilir:

1. Talep dağılımındaki aşırı değişim makinalar arasındaki yük dağılımında dengesizliğe neden olabilir, makinaların boş kalma süreleri artabilir ve sistemin performansı olumsuz yönde etkilenebilir.
2. Hücresel üretim makina bozulmalarına, talep dağılım değişikliğine, işgücündeki aksamalara karşı atelye tipi üretime göre daha duyarlıdır.
3. Parça aileleri oldukça farklı ise, hücresel üretimin performansı düşebilir.
4. Ufak özel hücreler, çok amaçlı büyük hücrelere göre talep dağılımı değişiminden daha çok etkilenebilir.
5. Talep seviyesindeki artış teslimlerde gecikmeye neden olabilir.
6. Talep ve karışımındaki değişikler sonucu ortaya çıkan olumsuz etkileri giderebilmek için parçaların diğer hücrelerde işlenmesi, fazla mesai veya fason imalat yaptırma zorunluluğu oluşabilir.
7. Talep düzeyindeki aşırı artış makina bakımlarının ertelenmesine, satış kayıplarına ve satış fiyatı değişikliğine neden olabilir.

1.3. Ürün Karışımındaki Değişiklik Sonucu Hücresel Üretim Sisteminin Performansında Oluşan Düşüşe Karşı Alınabilecek Önlemler

Hücresel üretimde ürün karışımı değişikliği sonucu ortaya çıkan olumsuz etkileri gidermek için aşağıdaki önlemlerin alınması düşünülebilir:

1. Taşıma maliyeti artışı ve üretim kontrolunun zorlaşması olasılığına rağmen, dışsal iş akışı esnekliğinden (İng: external routing flexibility) faydalanmak. Bu durumda parçaların bazıları diğer bir aileye ait hücrede işlenecektir ve hücresel üretimin getirdiği kolaylıkların bir kısmının etkinliği azalabilir.
2. Talep düşük olduğu zaman fazla üreterek stoklamak ve talep artışı durumunda bu stoku kullanıp fazla talebi karşılama politikası uygulanabilir.
3. Makina kullanım oranın düşük olması olasılığını da kabul ederek, ileri derecede esnek bir hücresel sistem tasarımlanabilir.
4. Hücre yükleme yöntemlerini de dikkate alan kademeli sistem tekniği ile esnek hücresel sistemler tasarımlamak ve aynı zamanda makina kapasitelerinin en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak.
5. Parça talep dağılımındaki değişimin neden olduğu hücreler arası yük dengesizliğini gidermek amacı ile büyük parça ailelerine sahip büyük fakat daha az sayıda hücreden oluşan bir sistem tasarlamak.
6. Parçaları talep değişimlerine az bağımlı olacak şekilde gruplamak; örneğin özel müşterileri siparişlerini ayrı bir hücrede gruplandığı sistem tasarımı.

1.4. Çalışmanın Önemi ve Amacı

Hücresel üretim akış tipi üretime ait faydalara sahip olmakla birlikte bazı açılardan atelye tipi üretime göre daha zayıf özellikler arz eder. Hücresel üretim sistemlerinin esneklik yeteneği atelye tipi üretime göre daha düşük düzeydedir. Burada sözü edilen esneklik, mevcut parça karışımına ait farklı parçaların farklı hücrelerde tümü ile işlenebilmesi ve/veya parça karışımındaki uzun dönemli değişimlerin karşılanabilmesi anlamına gelmektedir. Hücresel sistemlerin esneklik düzeyindeki bu azalmanın, aşağıda belirtildiği gibi, iki ana nedeni vardır:

1. Hücre içindeki donanımın sadece tek ya da benzer parça ailelerinin işlenmesine tahsis edilmesi.

2. Parçaların olabildiği kadar atandıkları tek bir asıl hücre içinde işlenmesinin amaçlanması nedeni ile mevcut ürün karışımındaki parçalara ait üretim hacmi değişimlerinin karşılanabilmesi yeteneği parçanın atandığı asıl hücrenin üretim kapasitesi ile sınırlıdır ve bu parçaların üretimi için diğer hücrelerde mevcut olan kapasitenin kullanılmasına izin verilmez.

Yukarıda belirtilen özellikler sebebi ile ürün karışımına ilave edilen yeni bir parçanın tek bir hücre içinde tam olarak üretilebilme olanağı hücrelerde mevcut donanım grupları ile sınırlıdır. Ayrıca, bağımsız hücreleri oluşturmak için bazı makina tiplerinin farklı hücrelere yerleştirilmesi sureti ile birden çok kez kullanılması ise hücresel üretim sistemlerinin yatırım düzeyinde artışa neden olabilir. Dolayısı ile hücresel üretim uygulamalarında iş akış süresi ve üretim içi stok seviyesindeki azalma gibi işlevsel kazanımlar ile azalan esneklik yeteneği ve artan yatırım maliyeti gibi olgular arasında bir denge sağlamak için gayret edilmelidir.

Uzun dönemli talep dalgalanmalarının hücresel üretim sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek ya da tam anlamı ile gidermek için aşağıda belirtilen üç yöntem düşünülebilir:

1. İş akışı esnekliğinden (İng: routing flexibility) faydalanmak: Bu durumda her hücredeki makina grubu talep değişiminden önceki makina grubu ile aynıdır ve değişmez. Hücrelere olan talep düzeylerindeki değişimin doğuracağı olumsuzluklar, belirlenen bazı kriterlere göre ve dışsal iş akışı esnekliğinden (İng: external routing flexibility) faydalanarak, aşırı yüklü hücrenin yüklerinin bir kısmının fazla üretim kapasitesine sahip farklı bir hücrede işlenmesi sureti ile giderilebilir.
2. Hücresel sistemin kısmi olarak tekrar tasarımı: bu durumda bazı hücrelerdeki makina grupları ile hücrelere atanan parçalarda değişiklik yapılabilir. Kısmi tasarımdan etkilenmeyen hücrelerin işletiminde bir değişiklik yapılmaz. Talep değişiminden etkilenen parçalar yeniden tasarlanan hücrelerde işlenir.
3. Hücresel sistemin tamamı ile yeniden tasarımı: Bu yöntemin uygulanması sonucu bütünü ile yeni bir hücresel sistem tasarlanır. Tümü ile yeni bir hücresel sistemi uygulama kararının alınması için zaman, maliyet ve sağlanan fayda açısından, ilk iki yöntemi de dikkate alan, çok iyi bir değerlendirme yapılması gerekir.

Aşağıda belirtilen sebeplerden dolayı bu çalışmada yukarıdaki birinci seçenek olan iş akışı esnekliğinden (İng: routing flexibility) faydalanma yöntemi incelenmektedir:

1. İşgücünün tahsisinde karşılaşılabilecek sorunlar en hafif düzeydedir. Dolayısı ile işgücü verimi ve etkinliğinin olumsuz yönde etkilenme derecesi de en düşük seviyededir.
2. Talep değişiminin etkilemediği parçalar normal iş akış hatlarını (İng: routes) izler. Dolayısı ile hücrelerin yeni donanım gereksinimi en düşük düzeydedir.
3. Talep değişiminin hücresel üretim sistemi üzerindeki olumsuz etkileri ve iş akışı esnekliğinden (İng: routing flexibility) faydalanarak bu olumsuz etkilerin şiddetinin nasıl azaltılabileceği hususu daha iyi anlaşılabilecektir. Bu tür bir inceleme yapılması sureti ile hücresel üretim sistemlerinin esnekliği için önemli bir karşılaştırma noktası oluşturulacak ve diğer iki yöntemin fayda maliyet analizi de daha sağlıklı bir şekilde yapılabilecektir.

Dolayısı ile bu çalışmanın amacı; dışsal iş akışı esnekliğine (İng: external routing flexibility) sahip hücresel üretim sistemlerinde ürün karışımındaki veya talep dağılımındaki değişim sonucu ortaya çıkan hücreler arasındaki yük dengesizliğinin dışsal iş akışı esnekliği (İng: external routing flexibility) olanağını dikkate alan çizelgeleme teknikleri ile dengelenmesinin incelenmesi şeklinde ifade edilebilir. Bu çalışmadaki "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır. Bu çalışmanın konusu özellikle iki bakımdan önemlidir:

1. Pek çok işletme zaman içinde uzun dönemli talep dalgalanmaları ile karşılaşmak durumundadır.
2. Uzun dönemli talep dalgalanmalarını karşılayabilme yeteneği olan hücresel sistemlerin tasarımı için bu dalgalanmanın etkilerinin tahmin edilmesi gerekir. Gelecekte ortaya çıkabilecek olan maliyetler ile bileşenlerinin belirlenmesi sonucu yönetsel planlama ve kontrol gelişecektir.

Talep ya da ürün karışımı zaman içinde değişir ve gelen işler de ait oldukları ailelerin hücrelerinde işlenmek üzere çizelgelenir ise hücreler dengesiz yüklenir ve hücresel üretim sistemlerinin performans veya verimi azalır. Eğer hücresel sistem dışsal iş akışı esnekliğine (İng: external routing flexibility) sahip ise yük dağılımındaki dengesizliğin neden olabileceği sistem performansındaki kötüleşmeyi iyileştirebilme

amacı ile aşırı yüklenen hücrenin giriş kuyruğundaki iş partileri arasından uygun bir iş seçim kriterine göre seçilen bazı işler, ait oldukları aşırı yüklü asıl (uzman) hücre yerine, bu işlere ait gerekli tüm işlemleri yapabilecek donanıma ve fazla üretim kapasitesine sahip olan, farklı bir seçenek hücreye yüklenebilir.

Çalışma konusunun incelenebilmesi için uygulanabilecek değişik yöntemler vardır. Bu yöntemlerin yapıları bir yanda en uygun (İng: optimum) çözümü arayan tam sayılı programlama, doğrusal programlama ile dal ve sınır algoritması, diğer yanda ise sezgisel prosedürler ve üretim benzetimi şeklinde çeşitlilik arz eder. Optimumu arayan tekniklerin iyi yönü optimumu bulmalarıdır, kötü yönü ise çok uzun bilgisayar işlem süresi gerektirmeleri ve bu nedenle büyük ölçekli problemlerde çözümü sağlayamamalarıdır. Sezgisel prosedürler ve benzetim tekniği için tam tersi geçerlidir. Sezgisellerin kötü yönü optimum çözüm yerine iyi ya da optimuma yakın çözümü bulmasıdır, iyi yönü ise oldukça kısa bilgisayar işlem süresi içinde mutlaka bir çözüm sağlamasıdır. Ayrıca bilgisayar ile benzetim oldukça yüksek düzeyli bir modelleme olanağı sunmaktadır. Dolayısı ile bu çalışmada inceleme yöntemi olarak üretim benzetimi kullanılmıştır.

Sonuç olarak bir hücresel sistemin başarısı talep dağılımındaki dalgalanmalar karşısında yeterince esnek davranması ve uyum sağlamasına bağlıdır. Dolayısı ile bu çalışma, değişken ürün karışımının neden olduğu verimsizlikler ve yüklemedeki dengesizliğin giderilmesi için seçenek iş akış hatlarını (İng: alternate routes) dikkate almak sureti ile esnek olarak çizelgelenen dışsal iş akışı esnekliğine (İng: external routing flexibility) sahip hücresel üretim sistemlerinin performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Diğer bir ifade ile bu çalışma talep dağılımı veya ürün karışımı değişimi etkisindeki dışsal iş akışı esnekliğine (İng: external routing flexibility) sahip hücresel üretim sistemlerinde seçenek iş akış hatlarına (İng: alternate routes) dayalı çizelgelemenin uygulanması durumunda değişen sistem performansı ile aynı koşullar altında fakat seçenek iş akış hatlarını (İng: alternate routes) dikkate almadan çizelgelenen hücresel üretim sistemlerinin performansını, ayrık olaylara dayalı benzetim (İng: discrete event based simulation) tekniğini kullanarak, karşılaştırmak sureti ile incelemektedir.

2. GRUP TEKNOLOJİSİ VE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ

2.1. Giriş: Üretim Sistemleri

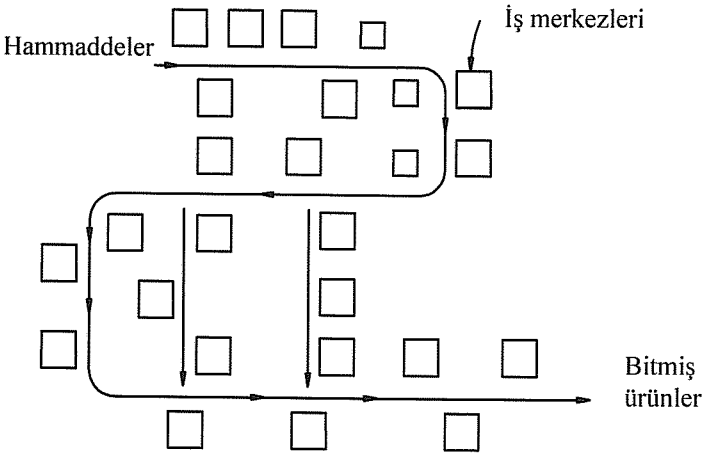
Üretim insan ihtiyaçlarını karşılayan mal ve hizmetlerin yapımı anlamında kullanılan bir ekonomi terimidir. Üretim fikri ve bedeni çabanın kullanılması sureti ile değer yaratılmasını ifade eder. Üretim ile ilgili işlemler üretim sistemini oluşturmak üzere bir arada toplanır. Üretim sistemi malzeme, bilgi, enerji, işgücü, makina ve para gibi girdileri kullanarak pazardaki müşteriler için ürünleri üretir [17,18].

Değişik kaynaklarda belirtildiği gibi makina ve donanımın fiziksel yerleşimine göre beş temel üretim sistemi yapısı vardır. Dolayısı ile üretim sistemleri görüldüğü gibi beş farklı sınıfa ayrılarak tanımlanır [5,17-27].

- akış tipi üretim sistemi ya da kitle üretimi
- sürekli proses tipi üretim sistemi
- proje tipi üretim sistemi
- atelye tipi üretim sistemi
- hücresel üretim sistemi

2.1.1. Akış Tipi Üretim Sistemi: Kitle Üretimi

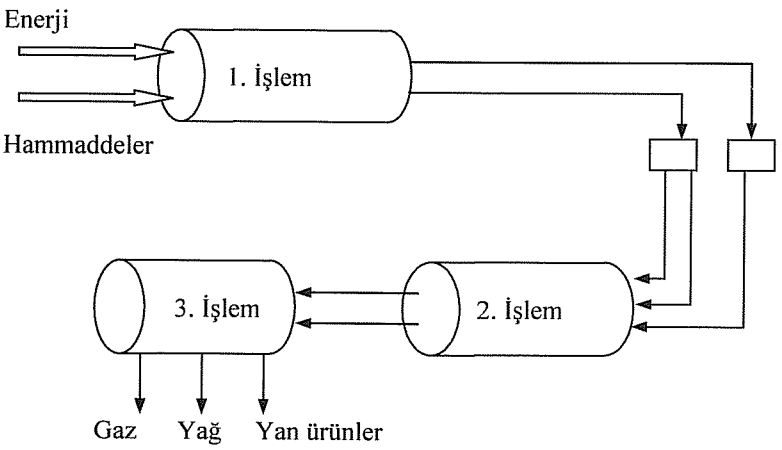
Akış tipi üretim sistemlerinde, üretilecek tek ya da az sayıdaki benzer ürünlerin üretimi için farklı tipteki makinalar Şekil 2.1 'deki gibi belirli bir hat boyunca yerleştirilir. Bu sistemler ürüne göre yerleşim olarak da tanımlanır ve tipik olarak oldukça yüksek üretim hacimlerini sağlarlar. Sistemdeki makina ve donanımlar ile özel bir ürün ya da birbirine çok benzer ürünler üretilir. Dolayısı ile bu sistemlerde oldukça benzer ya da aynı üretim sırasına sahip olan az çeşitteki parçalar yüksek üretim hacimlerinde üretilir. Otomobil montaj fabrikaları akış tipi üretime örnektir.



Şekil 2.1 : Akış tipi üretim sistemi ya da kitle üretimi

2.1.2. Sürekli Proses Tipi Üretim Sistemi

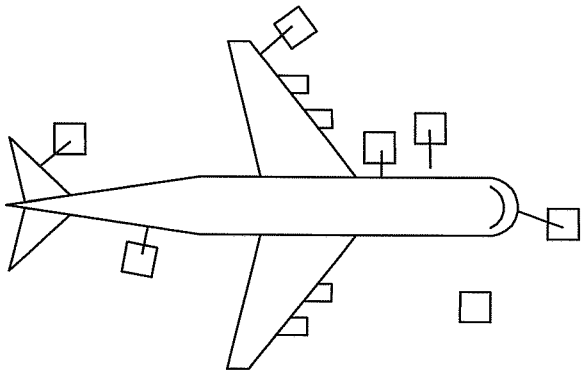
Bu sistemlerde ürünler Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi çeşitli işlemlerden geçerek ve üretim sistemi içinde akarak üretilir. Sürekli proses üretimi özellikle sıvı, gaz, toz ile gıdaların kimyasal proses tesislerinde ve petrolün rafinerilerde işlenmesi alanında uygulanmaktadır. Sıvı, gaz veya toz şeklindeki bu hammaddeler üretim süreci boyunca gerçek anlamda akarak sistem içinde ilerler. Sürekli proses tipi üretim en verimli fakat esnekliği en düşük düzeyde olan bir üretim sistemidir. Bu üretim sistemlerinde üretim içi stok düzeyi en düşük düzeyde olduğu için üretim kontrolu kolaydır. Dolayısı ile bu sistemler genelde en yalın ve sade üretim sistemleridir



Şekil 2.2 : Sürekli proses tipi üretim sistemi

2.1.3. Proje Tipi Üretim Sistemi

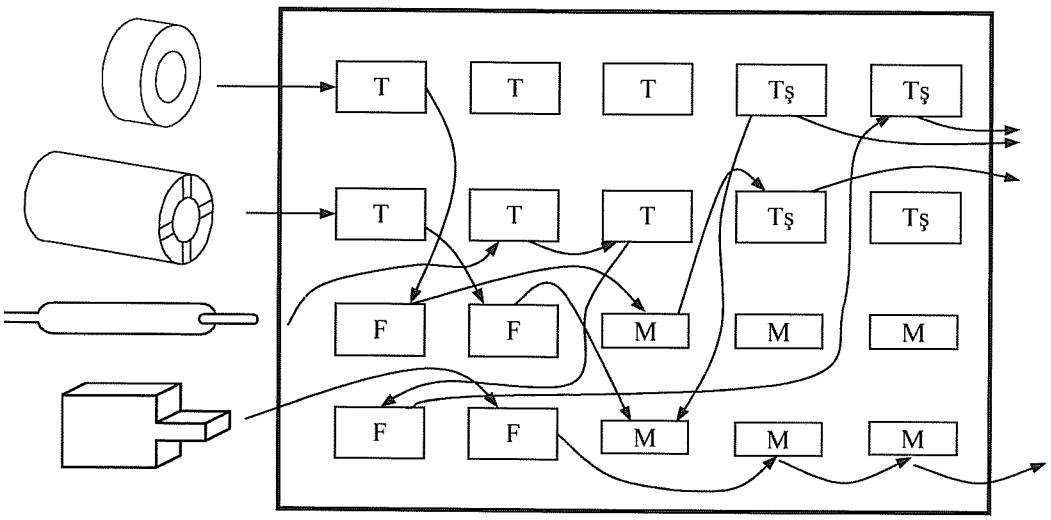
Üretim işlemlerini yerine getirilebilmek için parçaların makinalar arasında hareket ettiği diğer üretim sistemlerinden farklı olan proje tipi üretim sistemlerinde ürün sabit bir yerde durmaktadır ve malzeme, donanım ve işgücü ürünün bulunduğu yere getirilerek üretim yapılır (Şekil 2.3). Proje tipi üretim genellikle yer değiştirmesi olanaksız veya zor olan büyük ürünlerin üretiminde uygulanır. Proje tipi üretim lokomotif üretimi, gemi yapımı, büyük uçak yapımı ve yapı endüstrisi gibi alanlarda uygulanır.



Şekil 2.3 : Proje tipi üretim sistemi

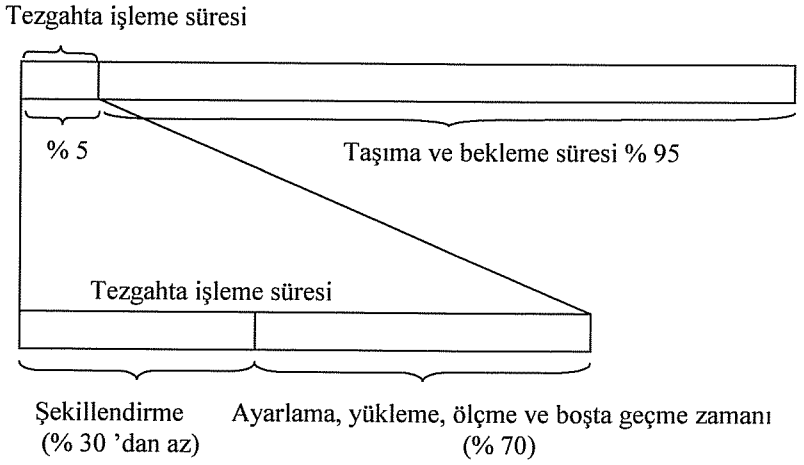
2.1.4. Atelye Tipi Üretim Sistemi

Bu sistemlerde genellikle ufak partiler halinde, çok çeşitli ürünler üretilir. Çok çeşitli ürünler üretildiği için bu sistemler oldukça esnektir. Atelye tipi üretimde tezgahlar gerçekleştirdikleri işlemlere göre bölümler (departmanlar, İng: departments) halinde düzenlenir; yani torna tezgahları, freze tezgahları, taşlama tezgahları gibi tezgahlar ayrı ayrı bölümlerde toplanır, Şekil 2.4. Bu düzenleme şekli fonksiyonel (işlevsel) düzenleme olarak da adlandırılır. Atelye tipi üretimin bir alt gurubu olan üretim atelyesi ise 50 ile 200 parçadan oluşan yüksek hacimli partileri düzenli aralıklar ile üretir. Büyük atelye tipi üretim sistemlerini, özellikle geniş üretim atelyelerini, yönetmek oldukça zorlaştığı için iş akış süreleri uzar ve çalışma ya da üretim içi stok düzeyi yükselir.



Şekil 2.4 : Atelye tipi üretim sistemi

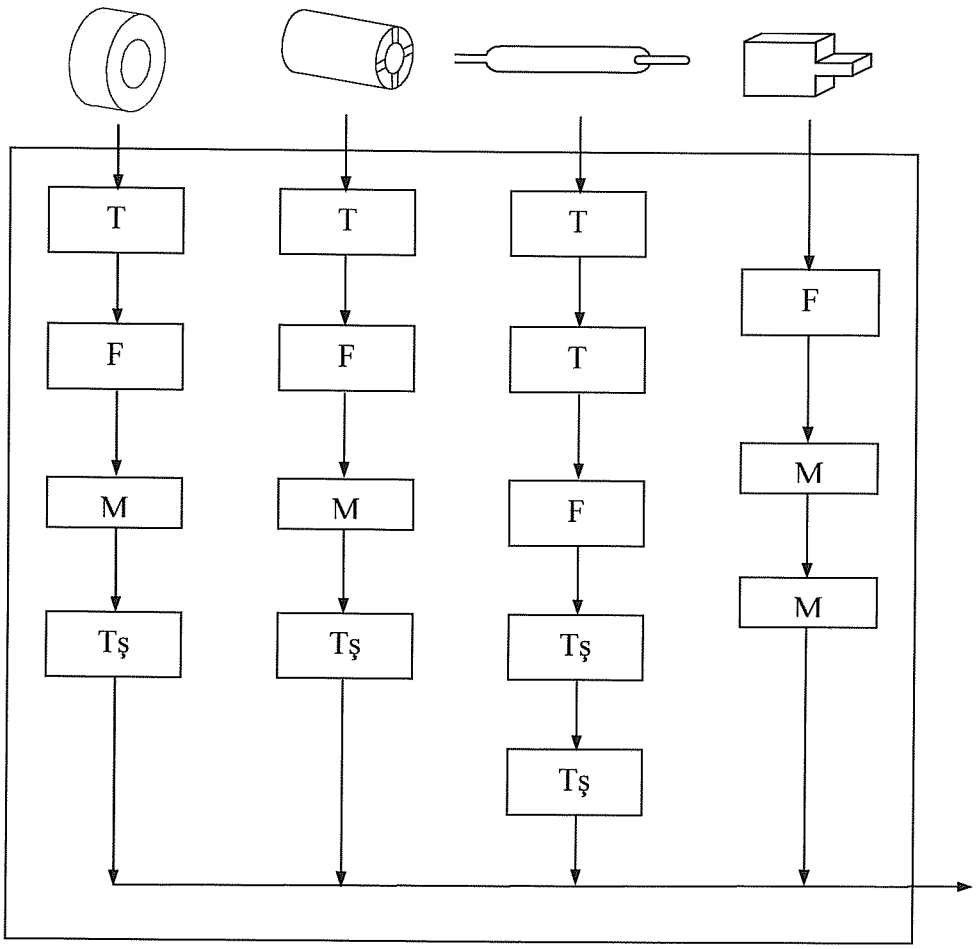
Atelye tipi üretim sistemlerinde, Şekil 2.5 'de görüldüğü gibi, parça akış sürelerinin % 95 gibi oldukça önemli bir kısmı kuyrukta bekleme ile tezgahlar arası taşıma süreleri ve geri kalan zamanın % 5 gibi küçük bir kısmı ise makina üzerindeki işlem süreleri için tüketilir. Ayrıca parçanın makina üzerinde işlenmesi sırasında geçen % 5 düzeyindeki akış süresinin ancak % 30 ile % 40 gibi bir kısmı gerçek üretim için kullanılır ve geri kalan sürenin % 70 ile % 80 gibi bir bölümü de yükleme, boşaltma, kontrol, ayar, hazırlık gibi faaliyetler için tüketilir. Dolayısı ile atelye tipi üretimde verimli olarak kullanılabilen süre akış süresinin ancak % 1.5 ile % 2 düzeyindeki bir kısmıdır [6,17,18,28].



Şekil 2.5 : Atelye tipi üretimde bir parçanın işlem süresi bileşenleri

2.1.5. Hücresel Üretim Sistemi

Bu üretim tipi en son geliştirilen düzenleme şeklidir. Hücresel üretim benzer işlemlerden geçen parçaların parça aileleri şeklinde gruplandırılması ile her bir aileyi üretmek için gerekli makinaların belirlenmesi ve hücreler (İng: cells) içine yerleştirilmesi prensibine dayanmaktadır, Şekil 2.6. Hücreler ufak olup sadece ilgili aileye ait parçaların üretimi için kullanılır. Hücreler genelde ayrı ve tek bir iş merkezi şeklinde çizelgelenir ve kontrol edilir. Hücre içindeki iş akışı oldukça tek yönlü ve düzgün olmakla birlikte hücresel üretimin düzenlenmesi ile ilgili farklı yaklaşımlar vardır. Değişik çalışmalarda belirtildiği gibi uygulamada iki temel hücre yapısı uygulanmaktadır. Bu iki değişik hücre uygulaması ise atelye tipi hücreler ve akış tipi hücreler şeklindeki düzenlemelerdir. İleride de açıklanacağı gibi bu iki farklı hücre düzenindeki iş akışı ve kontrol yapıları farklıdır.



Şekil 2.6 : Hücresel üretim sistemi

2.2. Üretim Sistemlerinin Tasarımı ve Uygun Üretim Sistemi Seçimi

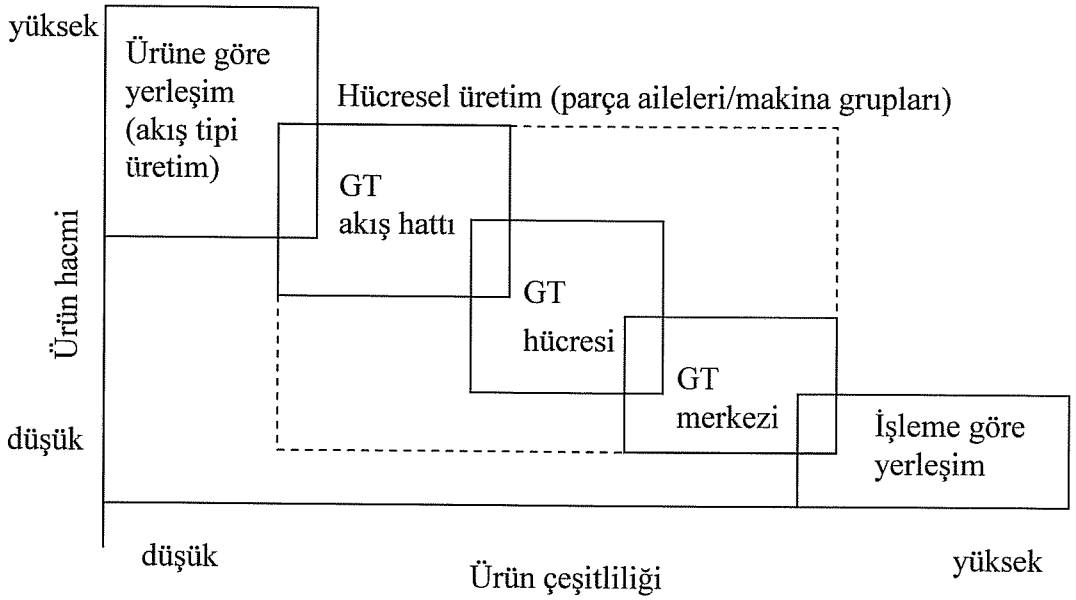
Üretim sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi birçok faktörün değerlendirilmesini gerektiren ve çeşitli amaçları içeren karmaşık bir süreçtir. Üretim sistemi seçim ve tasarımında üretilecek ürün ve üretim için gerekli işlemler dikkate alınmalıdır. Ayrıca bilgisayar sistemlerinde olduğu gibi üretim sistemi teknolojisini de donanım ve yazılım olarak iki kısımda düşünmek gerekir [19]. Dolayısı ile üretim sistemi tasarımı ile ilgili kararlar aşağıdaki gibi iki genel karar gurubunda toplanabilir:

1. Makina yükleme, parti hacmini belirleme ve iş sıralama gibi kontrol yapısının tasarımı ile ilgili kararlar: Bu kararlar sistemin yazılım kısmını oluşturur ve tam zamanında üretim, malzeme ihtiyaç planlaması periyot parti kontrolu, optimum üretim tekniği, işe göre yük gönderme ile toplam kalite kontrolu gibi üretim yönetim metotlarını kapsar.
2. Donanım seçimi ile fiziksel yerleşiminin tasarımı için gerekli kararlar: Bu kararlar sistemin yapılandırılması için gerekli malzeme taşıma donanımı, makina donanımı ve iletişim donanımı gibi elemanların belirlenmesi ile fonksiyonel (işlevsel) düzenleme, ürüne göre düzenleme ve karma düzenleme gibi sistem donanımı yerleşim şekilleri ile ilgilidir.

Mevcut üretim sistemlerinin büyük çoğunluğu yukarıda yapılan sınıflandırma kapsamındaki beş farklı sistemin birbiri ile etkileşimli alt sistemler şeklinde bir araya getirilmesinden oluşan karma (İng: hybrid) sistemlerdir [11]. Üretici firmalar pazarda ürüne olan talebi karşılamak amacı ile üretim sistemi çeşitleri içinden birini seçmek durumundadır. Bunlar geleneksel atelye tipi üretim sistemi (İng: process layout veya functional layout), hücresel üretim sistemleri (grup teknolojisi üretim sistemleri, İng: cellular manufacturing systems, group technology manufacturing systems), akış tipi üretim (kitle üretimi, ürüne göre düzenleme veya transfer hatları, İng: mass production, product layout veya transfer line), proje tipi üretim (İng: project shop), sürekli proses üretim sistemi (İng: continuous processing systems), esnek üretim sistemi (EÜS, İng: flexible manufacturing systems, FMS), bilgisayar bütünleşik üretim sistemleri (İng: computer integrated manufacturing systems, CIM) ile bunların birleşiminden oluşan karma (İng: hybrid) sistemler şeklindedir.

Üretim sistemi tasarım sorununu çözümlerken, seçilecek sistemi belirleme kararı bazı durumlarda oldukça kolaydır. Üretilecek ürünün fiziksel boyutu, şekli veya tipine bağlı olarak proje tipi veya sürekli proses tipi üretim düzenleme arasındaki seçimi belirlemek göreceli olarak kolaydır. Atelye tipi üretim ile akış tipi üretim arasında seçim yapmak daha zor olmasına karşın, üretim hacmi gibi tek bir etmen karar vermek için yeterlidir. Eğer talep karışımı ufak ile orta düzey arasında çeşitli ürünlerden oluşuyor ise akış tipi kitle üretim sistemini uygulamak uygun olmaz [29]. Çünkü bu durumda talep karışımının çeşitli ürünlerden oluşması ve üretim hacminin yeterince yüksek olmaması nedeni ile çok fazla sayıda makinaya gerek vardır ve maliyeti fazladır. Karmaşık otomasyon sistemleri, karmaşık malzeme taşıma sistemleri ve özel işletim teknikleri gereksinimi nedeni ile esnek üretim sistemleri ve bilgisayar bütünleşik üretim sistemleri ise yüksek maliyetli ve önemli miktarda yatırım gerektiren geniş kapsamlı projelerdir [1,26,30,31]. Orta ve ufak hacimli çeşitli ürünlerin üretildiği parti üretimi koşullarında bu ileri sistemlerin uygulanabilmesine karşın son derece pahallı ve ileri teknoloji ile bilgiyi gerektiren bu iki sistemin parti üretimi için çözüm olarak seçilme olasılığı oldukça azdır. Dolayısı ile parti üretimindeki ekonomik seçimler atelye tipi veya hücresel üretim sistemleri ile bu iki sistemin karışımı olan karma sistemlerdir. Atelye tipi üretim ile hücresel üretim arasında seçim yapmak ise oldukça zordur, çünkü bu iki sistem de düşük hacimli, çok çeşitli ürünlerin üretilmesinde uygulanan parti üretimi için faklı iki seçenek sistemdir. Şekil 2.4 'de atelye tipi üretime ait fonksiyonel (işlevsel) düzenlenen bölümler ve Şekil 2.6 'da hücresel üretim sisteminin ürüne göre düzenlenen hücre yapıları görülmektedir.

ABD 'de yapılan bir araştırmanın sonuçlarına göre karmaşık metal ürünleri alanında yaratılan gelir ya da katma değerin % 70 oranından daha fazla bir kısmı parti üretimi faaliyetleri ile sağlanmaktadır [32]. Değişik parçaların aynı anda üretildiği parti üretimi tüm üretim faaliyetlerinin % 60-80 oranındaki bir kısmını kapsamaktadır [5]. Parti üretiminde üretilen parçaların % 75 oranı civarındaki bir kısmı 50 adet veya daha az sayıdaki parçadan oluşan ufak partiler halinde üretilmektedir [18]. Uygun bir üretim sistemi seçimi için içsel ve dışsal tüm gereksinimlerin değerlendirilmesi gereklidir [5]. Üretim hacmi ve ürün çeşitliliğine bağlı olarak seçilebilecek üretim sistemi tipleri Şekil 2.7 'de görülmektedir.



Şekil 2.7 : Ürün hacmi ve çeşitliliğine göre seçilebilecek üretim sistemi tipleri

2.3. Grup Teknolojisi ve Çeşitli Tanımları

Grup teknolojisi çeşitli araştırmacılar tarafından farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Grup teknolojisi için farklı tanımlar yapılmasında araştırmacıların deneyim ve uzmanlık alanlarının farklı olması etkili olmaktadır. Araştırmacıların konuya bakış açıları ise geniş kapsamlı kavramlar ile çok özel uygulamalar arasında değişmektedir [6]. Grup teknolojisinin değişik araştırmacılar tarafından yapılan tanımlarından bazıları bu kısımda verilmektedir.

Grup teknolojisi parçalar ve bu parçaların üretimi için gerekli işlemlerin (İng: processes) temelinde yatan benzerlikleri belirleyen ve kullanan bir üretim felsefesidir [28]. Parçalar, işlemler, donanım, takımlar, tertibatlar, insan ya da müşteri istekleri gibi unsurları arasındaki benzerlikleri belirlemek; bu benzerliklere bağlı olarak bu unsurları aileler şeklinde gruplandırmak ve benzerliklerin sağladığı faydaları kullanmak sureti ile bu unsurların yönetilmesindeki etkenliği ve etkinliği güçlendirmek için disipline edilmiş bir yaklaşım şeklindeki bir grup teknolojisi tanımı ise Shunk [33] tarafından ifade edilmiştir.

Grup teknolojisi ilişkili veya benzer parçaların ve işlemlerin belirlenerek bir araya getirilmesi ile tasarım ve üretimin tüm aşamalarında mevcut olan benzerliklerden

yararlanmak gibi oldukça basit bir kavrama dayanan bir üretim felsefesi ya da prensibidir. Eugene Merchant, Cincinnati Milacron firması araştırma bölümü eski müdürü, bilgisayar bütünleşik üretim sistemleri (İng: computer integrated manufacturing systems, CIMS) ile ilgili organizasyonsal prensibin temelini grup teknolojisinin oluşturduğunu belirtmiştir [7].

Grup teknolojisi bir firmanın hangi ürünleri ve nasıl üreteceği sorusuna cevap bulmasına yardımcı olan bir üretim felsefesi ve stratejisidir. Grup teknolojisi parça ve işlemlerin temelinde yatan benzerlikleri belirlemek ve kullanmak için bir yöntem sağlar. Benzer parçaların parça ailesi şeklinde gruplanarak işlenmesi, harcanan gayretlerin gereksiz yere artmasını önlemek için tekrarlı ve yakından ilişkili faaliyetlerin standartlaştırılması ve basitleştirmesi ile aynı problemi tekrar tekrar çözme zahmetinden sakınabilmek için devamlı karşılaşılan problemlere ait bilgileri saklama ve istenildiğinde bu bilgilere tekrar ulaşma olanağının etkinleştirilebilmesi ancak yukarıda belirtilen bu benzerliklerin belirlenmesi sonucu sağlanabilir. Bir firmanın üretimle ilgili genel müdür yardımcısı, grup teknolojisini üretilecek parçaları ve üretim işlemlerini basitleştirmek ve standart hale getirmek sureti ile insanların bunları rahatlıkla kavrayabilmesini sağlayan bir araç olarak tanımlar. Bu kavrama işlemi başarıldığı zaman da üretimdeki fire önlenir ve verim ile üretkenlik artışı sağlanır [34].

Üretkenlik bir kaç şekilde ifade edilebilir; genelde, birim üretim zamanı diliminde elde edilen çıktıdaki artış ya da üretilen birim ürün başına düşen maliyetteki azalma olarak düşünülebilir. Grup teknolojisi üretkenliği arttırmak amacı ile benzer kavramları, prensipleri, problemleri ve teknolojileri bir arada toplayarak gruplandırmak şeklinde de tanımlanabilir. Başka bir tanımlama da şu şekilde yapılabilir; grup teknolojisi işlemsel (İng: operational) sorunlara çözüm bulmak için harcanan zaman ve çabadan tasarruf etmek üzere ürüne ait bilgilerin sınıflandırılmasıdır.

Hyer ve Wemmerlov [3] grup teknolojisini süreklilik arz eden farklı derecelerdeki yapılar şeklinde tanımlar. En basit seviyedeki grup teknolojisi yapısı bir makinada işlenen benzer parçaların, belirli bir kurala bağlı olmadan, sıralarının belirlenmesi ile ilgilidir. Orta seviyede grup teknolojisi yapısı tasarım ve/veya üretim benzerlikleri

esasına bağlı olarak parça ailelerinin oluşturulması ve bu parçaların üretimi için makinaların tahsis edilmesi ile ilgilidir. Grup teknolojisinin en gelişmiş ve kurallaşmış yapısı ise yukarıda açıklanan yöntemle oluşturulan parça ailelerine tahsis edilen makinaların üretim hücreleri şeklinde gruplandırılmasını ifade eder.

Yapılan bu çalışmanın amacına uygun olan bir grup teknolojisi tanımı ise parça ailelerine ait parçaların işlenmesine tahsis edilen makinaların fiziksel olarak gruplanması şeklindedir. Hyer ve Wemmerlov [3] tarafından ifade edilen en gelişmiş düzeydeki grup teknolojisi kavramı ile yukarıda benimsenen tanım aynı anlamı taşımaktadır. Oluşturulan bu makina grupları üretim hücreleri olarak adlandırılır ve parça ailesi adedine eşit sayıda üretim hücresi vardır.

2.3.1. Grup Teknolojisinin Tarihçesi

Grup teknolojisinin üretim tesislerindeki pratik uygulaması ilk gelişme dönemi olan 1960'lardan itibaren ülkelere ve zamana göre oldukça farklı olmuştur. ABD, Almanya ve Japonya gibi teknolojik bakımdan en gelişmiş ülkeler grup teknolojisinin üretkenliğin arttırılmasına esas katkıyı sağladığını ve robotik (İng: robotics), bilgisayar destekli üretim (İng: computer-aided manufacture, CAM) ve bilgisayar destekli tasarım (İng: computer-aided design, CAD) uygulamalarında ise doğal olarak faydalı olduğunu kabul etmektedir [7].

Benzer şekillere sahip parçaların özel bir tarzda gruplanmış makinalar ile üretimi fikri yeni değildir. Bu ana fikir bu yüzyılın büyük bir kısmı boyunca endüstri tarafından bilinmektedir. R. E. Flanders 1925 de Amerikan Makina Mühendisleri Derneği (İng: American Society of Mechanical Engineers, ASME) için hazırladığı bir makalede tanımladığı üretim yöntemi günümüz grup teknolojisi kavramına çok benzemektedir ve bu girişim kronolojik açıdan da grup teknolojisinin doğum tarihidir [6,4]. Flanders bu makalesinde tezgah üreten bir firmanın üretim ile üretim kontrolu alanında karşılaştığı güçlükleri günümüzde grup teknolojisi olarak bilinen yaklaşımı kullanarak nasıl aşabileceğini belirtmektedir. Bu yaklaşım ürünlerin standartlaştırılması, işlemler yerine ürüne göre bölümlerin düzenlenmesi, malzeme taşıma işleminin ez az düzeye indirilmesi ve işlerin kayıtlar ile uzaktan kontrolu yerine göz ile yerinde kontrolu gibi esaslara dayanmaktaydı [7]. Bu yaklaşım Jones

ve Lamson Makina Şirketi tarafından üretim ve kontrolundaki problemleri çözümlemek için kullanıldı [6]. Bu yüzyılın başlarında endüstriyel olarak gelişmiş her ülkede yayınlanan makaleler ayrıntılı olarak incelendiği zaman bu kavramın benzer örnekleri görülebilir [7].

J. C. Kerr 1938 yılında Üretim Mühendisleri Kuruluşu (İng: Institution of Production Engineers) için atelye tipi üretim yapan bir firma hakkında bir makale sundu. Kerr bu çalışmasında tezgahların gruplar halinde bölümlere yerleştirilmesini ele almıştır. Kerr'in yaklaşımı, tek bir ürünün üretildiği tesisler de olduğu gibi, üretim akışının düzgünleştirilmesi amacı ile belirli ve standart iş miktarlarının tezgahlar tarafından belirli bir sıraya göre işlenmesi şeklinde ifade edilebilir. Kerr'in makalesinin yayınlandığı sıralarda grup teknolojisinin gelişimi ile ilgili bir diğer önemli olay daha vuku buldu. Rusya'da A. P. Sokolovskiy grup teknolojisinin önermelerini (İng: postulates) 1937 yılında ortaya koydu. Sokolovskiy benzer şekil ve özelliklere sahip parçaların standart işlemler kullanılarak işlenmesi ile parti tipi üretim durumunda da akış tipi üretimin uygulanabileceğini önermiştir. Sokolovskiy parçaların aşağıdaki gibi alt gruplara ayrılabileceğini ileri sürmek sureti ile işlemlerin tipik olarak sınıflandırılabilmesi için bir temel oluşturmuştur [6]:

Parçalar

Sınıflar : ortak işlev, yapı, şekil, ortak yöntemler.

Alt Sınıflar : ortak şekil, birbiri ile yakından ilgili işlemler.

Gruplar : şekil elemanları ve işlem sayısına göre ayrılırlar.

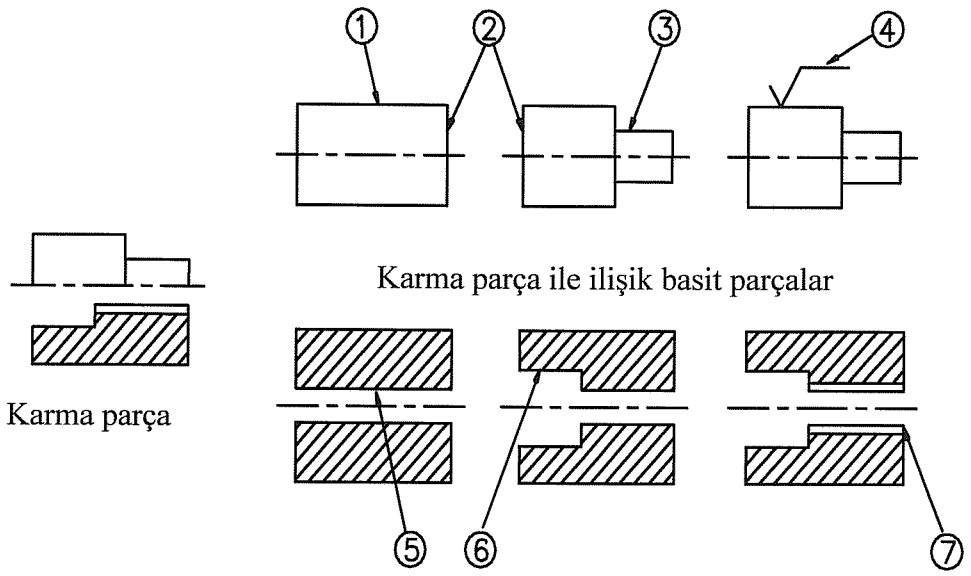
Tipler : benzer operasyonlar gerektiren parçaların kümesi.

Sokolovskiy bu yapıyı önermiş ve daha ileri düzeyde incelememiştir. Fakat bu yaklaşım daha sonraları vatandaşı Mitrofanov tarafından yapılan çalışmanın ana düşüncesini oluşturmak bakımından oldukça önemli bir yere sahiptir [6].

Grup teknolojisinin gelişme tarihi ile ilgili bir örnek de Arn Korling tarafından 1949 yılında yayınlanmıştır. İsveç'teki Scania-Vabis A/C kamyon ve otobüs firmasında görevli Korling grup üretimi olarak adlandırdığı yöntemi kullanmak sureti ile işletmede gerçekleştirilebilecek kapsamlı bir yeniden organizasyon faaliyetini tanımlamıştır. Korling parti üretimi yapan imalat sistemleri için akış tipi üretim uyarlanmasının grup üretimi olduğunu belirtmiştir. Özel bir parça kategorisinin

üretiminde gerekli makina, donanım ve diğer tertibatı barındıran ufak ve bağımsız üretim birimlerinden oluşan köklü bir merkezkaç sistemin grup üretimi açısından önemi Korling tarafından ifade edilmiştir [6].

Mitrofanov 'un bir kitabının 1959 yılında Rusya 'da ve Opitz 'in ve diğerlerinin bir çalışmasının 1960 yılında Almanya 'da grup teknolojisi ile ilgili olarak yayınlanması büyük ilgi çekmiştir. Grup halinde düzenlenmiş makinalarda parça ailelerinin işlenmesi yöntemi ile bir parça ailesinin tüm özelliklerini temsil eden Şekil 2.8 'deki karma parça (İng: composite part) kavramının geliştirilmesi Mitrofanov tarafından ileri sürülen fikirler arasındadır. İngiltere 'deki bazı firmalar grup teknolojisini ilk uygulayanlar arasındadır. İngiliz sınıflandırma (İng: cassification) uzmanları çalışmalarını teknik bakımdan geliştirmiş ve İngiliz araştırmacı John L. Burbidge 1975 yılında bu konuda üzerine kapsamlı bir kitap yazmıştır. Rusya ile eski Doğu Avrupa ve Batı Avrupa ülkelerinin bazılarında bu konu üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. ABD 'de ise sınıflandırma ve kodlama (İng: classification and coding) oldukça erken ilgi çekmesine karşın grup teknolojisi daha geç ilgi toplamıştır [7].



Şekil 2.8 : Karma parça kavramı

Otuzlu yılların sonunda benzer özelliklere sahip parçaların sınıflandırılarak standart işlemler ile topluca üretildiği sistemler üzerinde Sokolovskiy tarafından yapılan çalışmalar ve atmışlı yıllarda da Burbidge'nin sistematik üretim planlama ve kontrolu yaklaşımları sonucu, grup teknolojisi atelye yerleşim tekniğinden daha ileri düzeydeki bir üretim felsefesi konumunu kazanmıştır [4]. Grup teknolojisine olan

ilginin artması ise ülkelerin üretim sektöründeki gelişmişliği ile ilgilidir. 1950 - 1960 arası ABD dünyadaki en güçlü ekonomi ve üretim sektörüne sahipti. Dolayısı ile grup teknolojisi kavramı ilk oluşturulduğu süre içinde ABD 'de çok önemsenmedi. İngiltere, Rusya, Almanya ve Japonya gibi gelişmiş diğer ülkeler grup teknolojisine erken ilgi gösterdi. Zaman içinde Alman ve Japon üretim sektörünün ilerlemesi ve bunların yanında ABD'nin üretimde gerilemesi üzerine ABD'de grup teknolojisine olan ilgi arttı. Alman ve Japon endüstrilerindeki bu gelişmenin bir nedenlerinden birisi de grup teknolojisi kavramının bu ülkelerde çok iyi uygulanmasıdır [11]. Günümüze kadar yayınlanmış olan birçok makalede grup teknolojisinin faydaları belirtilmekledir. Grup teknolojisinin çeşitli alanlarda sağladığı en önemli ekonomi ve faydalar Tablo 1.1'de topluca görülmektedir [2,3,8].

2.3.2. Grup Teknolojisinin Uygulama Alanları

Grup teknolojisinin ana uygulama alanları genelde aşağıdaki gibi üç sınıfta toplanabilir [6,8,35]:

1. Ürün tasarımı alanındaki parça sınıflandırma ve kodlama için grup teknolojisi uygulamaları.
2. Üretim Mühendisliği alanındaki işlem planlaması ve üretim planlaması için grup teknolojisi uygulamaları.
3. Hücresel üretim sistemlerinin tasarımı için grup teknolojisi uygulamaları.

2.3.2.1. Grup Teknolojisinin Parça Sınıflandırma ve Kodlama Alanında Uygulanması

Grup teknolojisinin ürün tasarımına uygulanması genelde parça sınıflandırma ve kodlama (İng: parts classification and coding) sistemlerinin tanıtımı ve gerçekleştirilmesi şeklindedir. Sınıflandırma ve kodlama sistemleri tasarımcının ortak özelliklere sahip olan tasarımları kolaylıkla belirleyebilmesini sağlar ve gereksiz tasarımların yapılmasını önlemek sureti ile ürün tasarımındaki etkinliği ve verimi yükseltir. Sınıflandırma elemanların benzerlik, farklılık ya da bu iki ölçütün de uygulanması ile gruplara ayrılması işlemidir. Sınıflandırma genellikle ürün tasarım özellikleri ve/veya ürünlerin üretimi için gerekli işlemlere göre gerçekleştirilir. Kodlama sınıflara ayrılan ürünlere, her bir karakteri ürüne ait değişik

bir özellikle ilgili bir bilgiyi içeren sembollerin verilmesi işlemidir. Bilgisayarlı ayıklama teknikleri kullanılarak yeni üretilecek bir parçanın daha önce tasarımlanan ya da üretilen bir parça ile benzerliği araştırılır ve belirlenir. Bu şekilde sisteme yeni bir parçanın ilavesi kontrol altına alınır ve yeni parça ilavesi ile ilgili işlemler için geçen süre kısalır. Sınıflandırma ve kodlama sistemi tasarımcının benzer özelliklere sahip tasarımları kolaylıkla belirlemesini sağlar ve gereksiz işlemlerin azalması sonucu ürün tasarımındaki verim artar.

Grup teknolojisi alanında parça sınıflandırması ve kodlama araştırmacılar tarafından kapsamlı olarak incelenmiştir. Parça kodlamada amaç ortak tasarım özelliklerinin veya ortak işlemlerin belirlenerek bir araya toplanmasıdır. Mevcut kodlama sistemlerinin ufak bir kısmını bile tanıtmak bu çalışmanın kapsamını aşmaktadır. Kodlama sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

a) Tasarıma dayalı kodlama sistemleri,

b) İşlemlere dayalı kodlama sistemleri,

c) Tasarım ve işlemlere dayalı kodlama sistemleri.

d) Hiyerarşik kodlama sistemleri,

e) Tablo şeklindeki kodlama sistemleri.

Ayrıca kullanılan kodlar ise aşağıdaki gibi üç türlü olabilir:

a) Sayısal kodlar

b) Alfa nümerik kodlar

c) Sayısal ve alfa nümerik kodların karışımı olan kodlar.

Kodlama alanında yapılan kapsamlı çalışmalar sonucu her üretim sistemine ait parçaların iyi bir şekilde kodlanması için gerekli teknoloji geliştirilmiştir. Bu alanda yaygın olarak kullanılan ticari yazılımlar arasında MICLAS, DCLASS, MULTICLASS, CODE MDSI sayılabilir. Birçok firma kendi sistemlerini geliştirir ya da ticari yazılımları bazı değişikliklerle uygular. Daha sonra bu sistemler hücresel üretim gibi grup teknolojisi uygulamalarına ilişkin parça ailelerini belirlemek, parça tasarım veri tabanı oluşturmak ve standardizasyon amacı ile kullanılır. Birçok firma grup teknolojisi tasarımında bilgisayar destekli tasarım (BDT, İng: computer aided design, CAD) yazılımlarından da yararlanmaktadır [8]. Benzer parçaların daha etkin olarak tasarlanabilmesi, yeni tasarımların eski benzer tasarımlardan kolaylıkla elde

edilebilmesi ve tasarım için harcanan sürenin kısaltılması iyi bir sınıflandırma ve kodlama sisteminin sağladığı faydalar arasındadır [36].

2.3.2.2. Grup Teknolojisi ve İşlem Planlaması

İşlem planlama (İng: process planning) bir ürünü, ekonomik ve pazarda rekabet edebilecek şekilde üretme metotlarını sistematik olarak belirlemektir. İşlem planlamacı ham madde halinden son ürüne dönüştürülen her bir parça için gerekli işlemlerin sırasını saptar. Makinalar gerçekleştirebildikleri işlemlere göre tipler halinde sınıflandırılır. Bir işlem faklı tiplerdeki makinalarda gerçekleştirebilir. Gerekli takım ve tertibat, makina kapasitelerinin yeterliliği ile işlenecek parçanın kalitesi gibi üretim etmenleri dikkate alınmak sureti ile her bir işlem için kullanılabilecek makinalar seçilir. İşlemler ile makinaların bu şekilde eşleştirilmesi sonucu parça makina matrisi belirlenir.

Üretim Mühendisliğinde grup teknolojisi uygulaması ise parça ailelerinin oluşturulması, parça aileleri için standart iş akış hatlarının geliştirilmesi, işlem planlarının hazırlanması, ortak olarak kullanılabilen takım ile tertibatın geliştirilmesi, sayısal kontrolu tezgah programı hazırlanması, üretim planlama ve iş çizelgeleme ile iş sıralamanın gerçekleştirilmesi şeklinde olmaktadır. Özellikle üretim planlamasında grup teknolojisi uygulaması, ortak işlem sıralarını kullanma esasına göre parça ailelerinin oluşturulması sureti ile grup çizelgeleme tekniklerinden faydalanma amacına yöneliktir.

2.3.2.3. Grup Teknolojisi ve Hücresel Üretim

Hücresel üretim grup teknolojisi prensiplerinin üretim sistemi tasarımı ve yönetimine uygulanmasıdır. Hücresel üretimindeki esas amaç her biri belirli bir parça ailesini işlemek için tahsis edilmiş olan hücrelerin belirlenmesi ve oluşturulmasıdır. Hücresel üretim sistemlerinin tasarımı için geliştirdiği bir dizi kuraldan oluşan üretim akış analizi tekniğini geliştiren Burbidge hücresel üretimin tanıtımında önemli bir yere sahiptir.

2.4. Hücresel Üretim Sistemleri

Grup teknolojisinin diğer bir uygulaması olan hücresel üretim son zamanlarda ilgi çekmeye başladı. Hücresel üretim ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda görülmeye başladı ve 1970'lerin ortalarında bu konudaki çalışmalar arttı. Hücresel üretim, grup teknolojisi ilkelerinin parti tipi üretim sistemlerinin tasarım ve yönetimine uygulanması olarak tanımlanabilir. Hücresel üretim benzer işlemleri gerektiren parçaların, parça aileleri şeklinde gruplandırılması ve her bir aileyi üretmek için gereken makinaların belirlenerek makina hücreleri içinde gruplar halinde toplanması esasına dayanmaktadır. Benzer işlemlere sahip olan parça ailesini oluşturan parçalar doğal olarak benzer makinaları, takım ve tertibatları gerektirip, tasarım ve şekil bakımından da benzerdir. Diğer bir deyimle, hücresel üretimde, benzer işlemler ile üretilen parçalar gruplar halinde toplanarak parça ailelerini oluştururlar ve bu parça ailelerinin üretiminde kullanılan makinalar da hücreleri oluşturmak üzere bir araya getirilirler.

Parça aileleri ile bu parça ailelerinin işlendiği üretim hücrelerinin belirlenmesi ve oluşturulması hücresel üretimin temel ilgi alanı içindedir. Burbidge hücresel üretim sistemlerinin tasarımı için üretim akış analizini geliştirdi ve hücresel üretim sistemlerinin tasarımına önemli katkılarda bulundu [5-7,18,37,38]. Üretim olanaklarının tümüyle özel hücrelere bölünememesi durumunda, % 30 - % 40 oranındaki parça gurubu büyük ve genel amaçlı artık ya da destek hücre olarak adlandırılan bir hücreye yerleştirilir [39]. Hücreler genelde 3 ile 15 makinadan oluşan ufak birimler olup, sadece ilgili aileye ait parçaların üretimi için kullanılır ve sanki tek bir iş merkezi olarak çizelgelenip kontrol edilir.

Yayınlanan bazı araştırmalarda, hücresel üretimin parti tipi üretime uygulanması ile önemli yararların sağlanacağını belirtilmektedir. Bunlar arasında en önemlileri sistemde kalma süresinde azalma, üretim içi stoklarda azalma, hazırlık zamanı ve taşıma süresinin kısalması olarak sıralanabilir. Diğer yararları ise işlem planlamada kolaylık, kalite kontrol ve standartlardaki iyileşme olarak belirtilmektedir. Ayrıca hücresel üretimin, esnek üretim sistemi (EÜS) ve bilgisayar bütünleşik üretim (BBÜ) gibi ileri teknolojilerin uygulanması için geçiş kademesi olması nedeniyle çok faydalı bir teknik olduğu da yapılan çalışmalar tarafından ortaya konmuştur. Bununla beraber

son yıllarda yapılan bazı araştırmalar ise HÜ 'nün, donanımları parça ailelerinin üretimleri için hücreler halinde ayırması nedeniyle üretim esnekliğini olumsuz etkilediğini tartışmaktadır.

Fonksiyonel (işlevsel) olarak farklı makinaların bir parça ailesini üretmek üzere bir araya getirilmesi şeklinde düzenlenen hücrelerden oluşan hücresel üretim sistemi atelye tipi üretime karşı bir diğer seçenektir. Hücresel üretim farklı ürünleri üretmek üzere benzer makinaların bölümler halinde toplandığı atelye tipi üretimin fonksiyonel (işlevsel) olarak düzenlenmiş yapısının karşıtı olmaktadır (Şekil 2.4 ve Şekil 2.6). Hücresel üretimde makinaların hücreler halinde düzenlenmesinin amacı akış tipi üretimdeki verimliliği sağlamaktır ve bu bağımsız hücreler fonksiyonel olarak düzenlenmiş atelye tipi üretime göre, oldukça basit ve sade parça akışı ile birlikte, üretim etkinliğinin daha iyi olmasını sağlar.

Hücresel üretimin sağladığı yararlara karşın, günümüzde endüstride en fazla rastlanan üretim şekli ise geleneksel parti tipi üretim sistemi olan atelye tipi üretimdir. Atelye tipi üretimde parçalar partiler halinde makinaların fonksiyonel (işlevsel) olarak gruplandığı bölümler arasında işlenmek üzere taşınırlar ve bölümler önündeki kuyruklarda beklerler. Uzman işçiler özel makinaları çalıştırır ve aynı işlemi farklı parçalara uygularlar. Bu tip üretimin özelliği çeşitli ürünleri küçük veya orta büyüklükteki partiler halinde işleyebilme esnekliğidir. Fakat sistem büyüdükçe parçaların büyük partiler halinde taşınması sistemde kalma süresinin uzamasına neden olur, büyük partiler ve uzun kuyruklar partilerin bölünmesine, hazırlık süresinin uzamasına, geç teslime, üretim içi stokun artmasına, işleme hatalarının düzeltilmesi ile oluşan zaman kaybına ve değişken kaliteye neden olur.

Gelişmiş ülkelerde birçok firma mevcut üretim olanaklarını geleneksel atelye tipinden hücresel üretim sistemine dönüştürmektedir. Atelye tipi üretimi hücresel üretime dönüştürme işlemi, sistem ve donanım düzeyinde, detaylı araştırma ve planlamayı gerektirir çünkü ilk yatırım maliyeti yüksektir ve personel ile yönetimin yeniden yapılandırılması söz konusudur. Bu nedenle yapılmakta olan araştırmaların, hücresel üretimin fonksiyonel (işlevsel) olarak düzenlenmiş geleneksel atelye tipine göre daha verimli olarak çalışacağı koşulların yöneticiler tarafından belirlenebilmesi için karar destek sistemi olarak kullanılması işlevini de yerine getirmesi önemlidir.

Parti üretiminde, makinaların düzenlenmesi ve yerleştirilmesi ile işlere ait parçaların oluşturduğu partilerin akışı tarafından belirlenen üretim ortamı aşağıdaki dört farklı tipte olabilir.

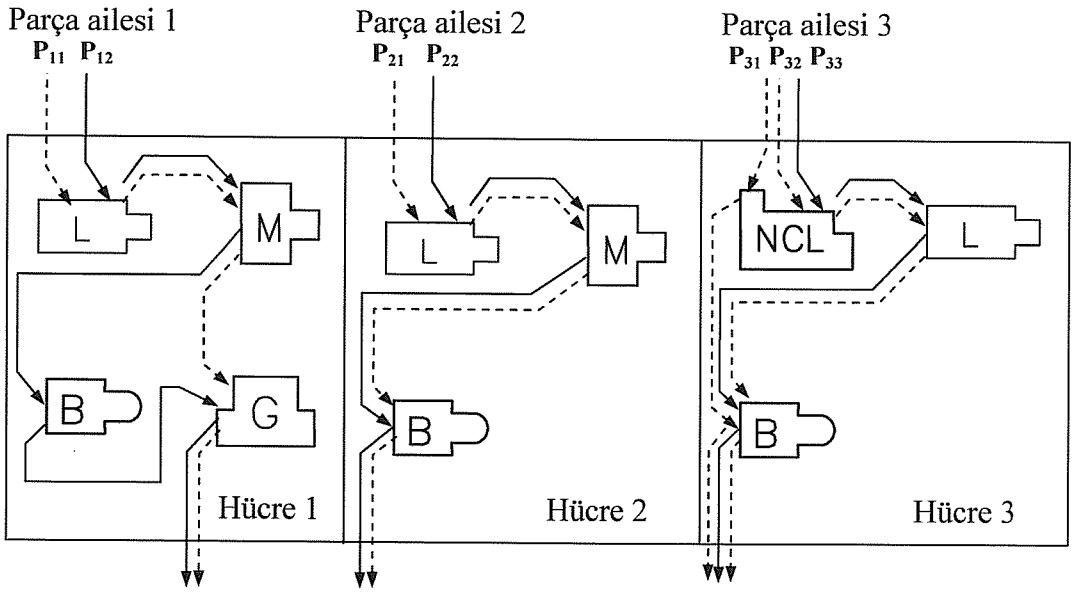
- Saf atelye (İng: pure job shop): Partilerin sisteme giriş noktası, iş akış hatları ve çıkış noktaları açısından bir sınırlama yoktur.
- Atelye (İng: job shop): Partilerin sisteme giriş noktaları, iş akış hatları ve çıkış noktaları açısından bazı sınırlamalar vardır.
- Akış hattı (İng: flow shop): Parti iş akış hatları üzerinde az sayıda geri dönüş ve sınırlı sayıda giriş ve çıkış noktaları olabilir. İş akış hatları üzerinde bulunmayan makina sayısı oldukça sınırlıdır.
- Saf akış hattı (İng: pure flow shop): Tüm makinalar işlenen partinin ileri yönlü iş akış hattı üzerinde olmalıdır.

Bağımsız tek bir hücre bu dört tip üretim ortamına ait özelliklerin birçoğuna sahip olabilir. İdeal hücresel üretim sisteminin bu ortamlardan hangisine daha yakın olduğunu söylemek kolay değildir. Saf akış hattının en iyisi olduğu düşünülse bile bu düzenleme çok fazla sayıda aynı tip tezgahın farklı hücrelerde bulunmasını gerektirdiği için ekonomik değildir. Gerçek uygulamadaki hücre ortamı ise, hücreye ait ailedeki parçaların bazılarının tüm makinaları kullanmaması nedeni ile akış hattı ve atelye düzenlemesi arasında bir yerde bulunmaktadır. Hücre içi akış atelye düzenindeki gibi karışık veya akış hattındaki gibi düzgün ve bazen de tek bir iş merkezi etrafında yoğunlaşmış olabilir. Tarihsel olarak uygulamada atelye tipi hücreler ile akış tipi hücreler olmak üzere iki ana hücre tipi vardır. Wemmerlöv ve Hyer [11] esnek üretim sistemlerinin (EÜS) atelye tipi hücreler ve montaj hatları ile transfer hatlarını ise akış tipi hücreler olarak tanımlar. Takip eden kısımlarda açıklandığı gibi bu iki ana üretim hücresi tipinin kontrol yapıları farklıdır.

2.4.1. Atelye Tipi Üretim Hücreleri

Atelye tipi üretim hücreleri uygulamalarında parça ailelerinin üretimi için tahsis edilmek üzere makinalar fiziksel olarak hücreler şeklinde gruplandırılır. Bu tip hücreler içindeki iş akışı çok yönlüdür (Şekil 2.9). Hücrelerdeki iş çizelgeleme ve işleme atelye tipi üretimdeki gibidir. Parti işleneceği ilk makinaya yüklenir ve partideki bütün parçalar işlenince, parçalar parti halinde bir sonraki makinaya taşınır.

Bu işlem partinin iş akış hattı üzerindeki tüm işlemleri için tekrarlanır ve parti iş akış hattı üzerindeki son makinada işlenip hücreden ayrılır. Atelye tipi hücresel sistemde farklı iş akış hatlarına sahip partiler belirli makinalardan hücreye girer ve sınırlı sayıdaki farklı iş akış hatlarını izler ve belirli makinalardan hücreyi terk eder. Halbuki atelye tipi üretimde ise, işler herhangi bir makinadan atelyeye girebilir, teknolojik bakımdan olası, fazla sayıdaki, herhangi bir iş akış hattını izleyebilir ve herhangi bir makinadan atelyeyi terk edebilir. Wemmerlöv ve Hyer [11] esnek üretim hücreleri (EÜH) ve esnek üretim sistemlerinin (EÜS) atelye tipi hücrelerin ileri derecede otomasyon uygulanmış şekli olduğunu belirtmektedir.



Şekil 2.9 : Atelye tipi üretim hücreleri veya grup teknolojisi hücresi

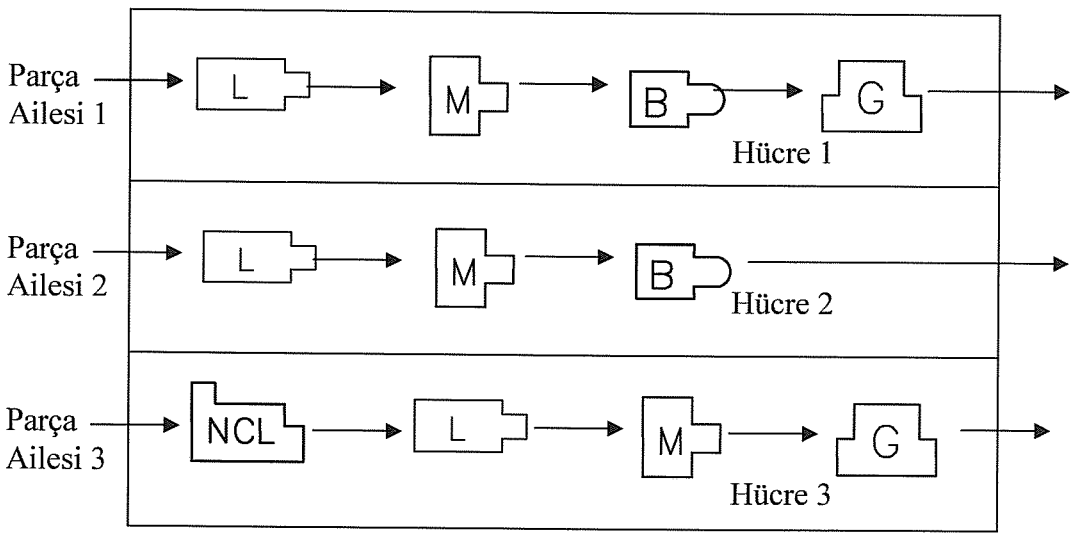
2.4.2. Akış Tipi Üretim Hücreleri

Akış tipi üretim hücreleri uygulamasında makinalar parça ailelerini işlemek üzere hücreler şeklinde fiziksel olarak gruplandırılır. Akış tipi üretim hücreleri içindeki parça hareketleri oldukça düzgün ve tek yönlüdür (Şekil 2.10). Bir hücrede işlenecek olan parçalar transfer partileri olarak adlandırılan daha ufak alt partilere bölünür. Bu transfer partileri işlem sırasına göre ilgili hücredeki ilk makina üzerinde işlenmeye başlar ve bir önceki makinadaki işlemleri bitince bir sonraki makinaya işlenmek üzere taşınır ve son işlem de tamamlanınca hücreyi son makina üzerinden terk eder. Parti bölmeli çizelgeleme (parti bindirmeli çizelgeleme veya paralel parti işleme) ve kontrol yapısı olanağı nedeniyle işlem sürelerinin kısaltılmasını sağlar. Benzer işlem

sırasına sahip parçalar daha dikkatli bir şekilde gruplanır ve çizelgelenir. Akış tipi hücre yapısı tam zamanında üretimde (TZÜ, İng: just in time manufacturing, JIT) oldukça önemlidir [1,17]. Transfer hatları ve montaj hatları akış tipi hücreler olarak düşünülebilir [11].

Atelye tipi hücrelere ile karşılaştırılır ise akış tipi hücreler aşağıda belirtilen faydaları sağlar [40] :

- Malzemelerin taşımasında kolaylık ve basitlik sağlanması.
- Hücre içi faaliyetlerin kontrolünün iyileşmesi.
- Bantlı taşıyıcıların kullanımı için daha uygun bir ortam sağlanması.
- Daha ufak parti hacimleri ile çalışmaya olanak sağlaması.
- Hücreye giren ve çıkan işlerin daha kolay izlenebilmesi.

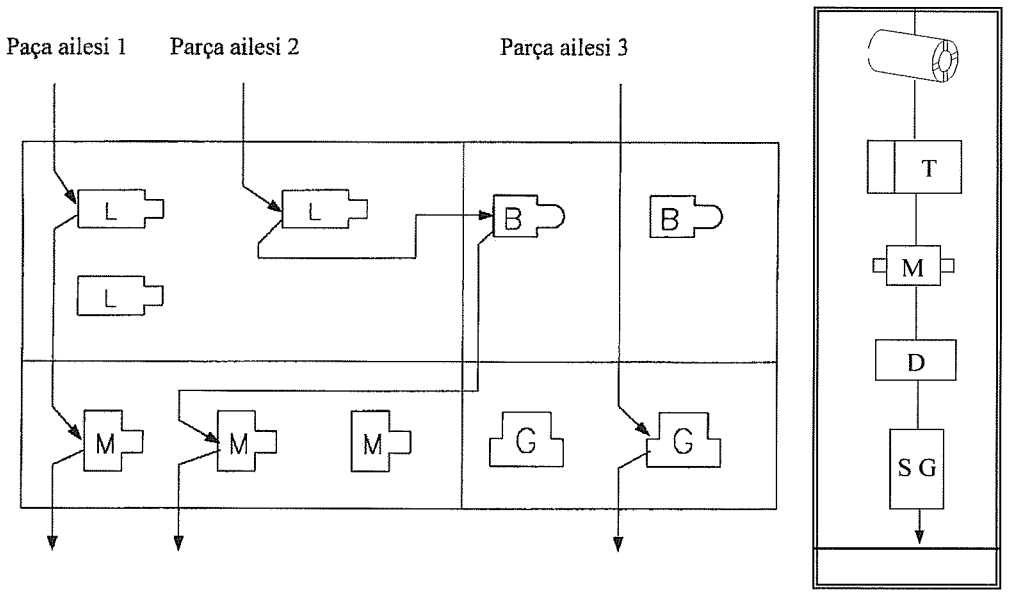


Şekil 2.10 : Akış tipi üretim hücreleri veya grup teknolojisi akış hattı

2.4.3. Sanal ve Fiziksel Hücreler

Grup teknolojisinin hücresel üretime uygulanmasında parçalar makinalardaki işlemlerin benzerliğine göre aileler şeklinde gruplara ayrılır ve bu parça ailelerini işleyecek makinalar belirlenir. Makinaların gruplanması ise sanal (veya mantıksal) makina hücreleri (İng: logical veya virtual cells) ve fiziksel (veya formal) makina hücreleri (İng: physical veya formal cells) şeklinde olabilir [5,6]. Sanal makina hücrelerinde makinalar parça ailelerine göre gruplandırılır, fakat makinaların

fonksiyonel (işlevsel) olarak tiplerine göre ayrı ayrı gruplar halinde bulundukları atelye tipi düzenlemeye ait bölümler içindeki konumları değiştirilmez (Şekil 2.11). Fiziksel makina hücrelerinde ise akış tipi üretimin sunduğu olanakları ve verimi sağlamak için parça ailelerine tahsis edilen makina grupları fiziksel (veya gerçek) anlamda hücreler içine yerleştirilir. Yukarıda açıklanan akış tipi, atelye tipi üretim hücreleri ile bu iki tip arasındaki diğer hücre tipleri fiziksel hücreler sınıfında yer almaktadır.



(a) sanal hücreler veya grup teknolojisi merkezi (b) fiziksel hücre

Şekil 2.11 : Sanal hücreler ya da grup teknoloji merkezi ve fiziksel hücreler

2.5. Üretim Hücrelerinin Özellikleri ve Hücre İçindeki Yerleşim Planı

Hücresel üretimde maksimum faydayı sağlamak üzere kaç adet hücrenin oluşturulması gerektiğini belirleyen bir yöntem yoktur. Bazı araştırmacılar atelyenin 1/3 nün geleneksel tipte fonksiyonel (işlevsel) olarak düzenlenmesi ile oluşturulan karma (İng: hybrid) sistemin daha uygun olduğunu belirtmektedir. Hücredeki makina adedi genelde 3 ile 15 arasında değişen oldukça düşük değerdedir. Bir hücredeki ortalama makina adedi ise genelde 6 olmaktadır ve hücresel üretimi uygulayan firmaların yarısına yakın kısmında kurulu hücrelerdeki makinaların sayısı da 4 ile 6 adet arasında değişmektedir [41,42]. Belirli bir hücreye atanamayan makinalar ise

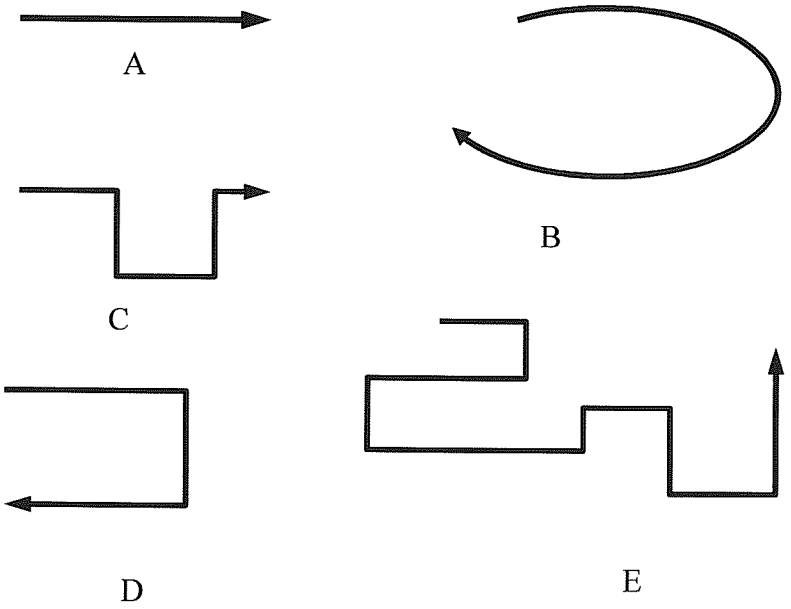
destek hücre olarak tanımlanan bir hücreye yerleştirilir [39]. Eğer teknik ve ekonomik açıdan olanaklı ise destek hücrede genelde her makina tipinden en az bir adet bulunması tercih edilmelidir. Bu hücre, aynı zamanda, aşırı talebi karşılamak ya da parçanın ait olduğu hücrede herhangi bir nedenle tüm işlemlerinin gerçekleştirilememesi durumunda da kullanılır.

Hücresel üretimin düşük makina kullanım oranı ile talep ve ürün karışımı değişimlerine uyum sağlama esnekliğinin göreli olarak az olması gibi iki zayıf yönünün olduğu bilinmektedir. Hücrelerin parça ailelerini işlemek üzere tasarlanması nedeni ile hücresel üretim sistemlerinde toplam makina sayısı genelde fonksiyonel (işlevsel) düzenlemeye göre daha fazla olabilir ve makina kullanım oranı düşebilir. Düşük makina kullanım oranı aslında çok önemli değildir, çünkü hücresel üretimde paçaların hazırlık sürelerinin kısalması nedeni ile gerçek işlemler için daha uzun bir süre kullanılabilme olanağı vardır. Diğer bir deyişle, hücresel üretimde hazırlık sürelerinin daha kısa olması nedeni ile makina kullanım oranı düşük gözükebilir, fakat gerçekte kullanılabilir makina kapasitesinde artış olmaktadır. Ayrıca bazı makinalar, üretim kontrolunun zorlaşması ve hücresel üretimin yaralarından bir kısmından fedakarlık edilmesine karşın, iki ayrı hücre tarafından paylaşılmak suretiyle makina kullanım oranında ve esneklikte artış sağlanabilir.

Hücrelerdeki makinaların yerleştirilme planı ürünün özelliklerine, üretim hacmine, üretilen parçalara ait işlemlere bağlıdır. Emniyetli, konforlu ve parçaların üretimine uygun olmak koşulu ile olabildiği kadar küçük alana yayılan yerleşim planı tercih edilmelidir. Hücre içindeki yerleşim için makinalardaki işlemlerin, kalite kontrolün, stok alanlarının ve malzeme taşıma sisteminin dikkate alınması gereklidir. Temel hücre içi makina yerleşim düzenleri Şekil 2.12 'de görüldüğü gibi doğrusal, dairesel, U şeklinde, S şeklinde ve rasgele yönlü olabilir [20, 43]. Üretim hücreleri içinde makinaların yerleşim düzeni için grup teknolojisi yerleşim planı uygulanır. Grup teknolojisi yerleşim planları aşağıda açıklandığı gibi üç sınıfa ayrılabilir [5,28]:

1. Grup teknolojisi akış hattı,
2. Grup teknolojisi hücresi,
3. Grup teknolojisi merkezi.

Üretim hacmi ve ürün çeşitliliğine bağlı olarak üretim hücresi yerleşim planın seçimi ise Şekil 2.7 'de görülmektedir.



Şekil 2.12 : Temel hücre içi makina yerleşim düzenleri

2.5.1. Grup Teknolojisi Akış Hattı

Eğer parti ailesindeki hemen her parça aynı iş akış hattına sahip ise Şekil 2.10'da görülen grup teknolojisi akış hattı yerleşim planı uygundur [5,28]. Bu yerleşim düzeninde parçaların makinalardaki işlenme süreleri yaklaşık olarak aynı olmalıdır. Grup teknolojisi akış tipi yerleşim planı akış tipi üretim veya da kitle üretiminin özelliklerine sahiptir ve grup teknolojisi prensiplerinin en iyi derecede uygulanmasını sağlar. Bu plan değişik ürünlerin üretildiği montaj hatları uygulamasında kullanılır. Bu sistemdeki parçaların iş merkezleri arasında taşınması için otomatik transfer hatları kullanılabilir. Daha önce açıklanan akış tipi üretim hücreleri bu yerleşim planına benzer şekilde düzenlenir.

2.5.2. Grup Teknolojisi Hücresi

Bu düzenlemede parçalar makinalar arasında bir kısıtlama olmadan hareket edebilir ve bu hareketler, tek yönde olmanın tam aksine, çok yönlüdür [5,28]. Bir ya da daha fazla sayıdaki parça ailesine ait parçalar grup teknolojisi hücreleri içine yerleştirilen makina grubu kullanılarak üretilir. Bu yerleşim düzeninde bir parçanın üretimi için olası her işlem sıralaması veya esnek işlem sıraları kullanılabilir. Makinalar hücrelerin içinde biri birine yakın yerleştirildiği için malzeme taşıma mesafeleri

kısadır. Şekil 2.9 'da bu düzenleme şematik olarak gösterilmiştir. Daha önce açıklanan atelye tipi üretim hücreleri bu yerleşim planına benzer şekilde düzenlenir.

2.5.3. Grup Teknolojisi Merkezi

Bu düzenleme Şekil 2.11(a) 'da görüldüğü gibi makinaların mantıksal olarak düzenlenmesini ifade eder [5,28]. Grup teknolojisi merkezindeki makinalar atelye tipi fonksiyonel (işlevsel) düzenleme şeklinde yerleştirilir, fakat bu makinalar parça ailelerinin işlenmesine tahsis edilmek üzere mantıksal olarak gruplanır. Ürün karışımının sık sık değiştiği koşullarda bu tip yerleşim düzeni oldukça uygun olmaktadır. Bu yerleşim şeklinde doğal olarak malzeme hareketleri fazladır ve hareket mesafeleri uzundur Atelye tipi fonksiyonel (işlevsel) yerleşim düzeni şeklindeki bu plan için grup teknolojisi prensiplerinin uygulanma derecesi en alt düzeydedir. Daha önce açıklanan sanal hücreler bu yerleşim planına benzer şekilde düzenlenir.

2.6. Hücresel Üretimin Faydalı ve Zayıf Yönleri

Hücresel üretim ve grup teknolojisinin yararları çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir [2,3,5-8,17,18,34,35,37,39,41,44,45]. Hücresel üretim ve grup teknolojisinin bu çalışmalarda belirtilen faydaları aşağıda açıklanmaktadır:

1. Hazırlık süresinde azalma: Hücresel üretimde parçaların aileler şeklinde gruplanması sonucu hücrelerde işlenen parçalar aynı ya da oldukça benzer tipte olduğu için her bir hücredeki takım ve parça bağlama düzenlerinin (tertibatların) standartlaştırılarak kontrollerinin kolaylaşması, çeşit ve miktarlarının azalması sonucu, önemli stratejik yararlar sağlanır. Bu durumda makinalarda bir parçanın işlenmesinden, ardışık bir diğer parçanın işlenmesine geçişteki hazırlık süreleri sıfır ya da çok kısa olmaktadır [3,36,46]. Dolayısı ile hazırlık zamanı ve maliyeti minimumdur. Hücrede işlenen parça sayısının sınırlı olması nedeniyle siparişleri, sıraya bağlı hazırlık sürelerini azaltacak şekilde sıralamak kolaydır. Ayrıca işleme takımları ve takım bağlama aparatlarındaki standartlaşma sureti ile bu elemanların atelye tipi üretim alanı düzenlemesindeki gibi bir merkezi takım ve aparat deposuna

gerek olmaksızın sadece hücreler içinde depolanması ise ilgili kontrol, stoklama ve taşıma işlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

2. Taşıma adet, süre ve maliyetlerinde azalma: Siparişler fonksiyonel (işlevsel) düzenlemede olduğu gibi bölümler arasında taşınmaz, aksine hücrelerin içinde işlenir. Eğer hücre akış tipinde ise parçalar genellikle konveyör ile taşınır. Atelye tipi hücre yapısı durumunda ise hücre içinde makinaların iyi düzenlenmesi (yerleştirilmesi) nedeniyle makinalar arası mesafe kısa olup, siparişlerin taşınma hareketi en aza indirilir. Bazı durumlarda hücreler arası parti hareketleri kaçınılmaz olabilir. Bu hücreler arası hareketler önemli derecede zaman ve mesafeyi gerektirse bile hücresel üretimdeki taşıma işlemleri önemli oranda hücreler içindeki tezgahlar arasında gerçekleşir. Hücresel üretimde makinaların parça ailelerini üretmek üzere hücreler halinde gruplanması nedeni ile partilerin makinalar arasındaki hareket adedi minimum olmakta, taşıma mesafesi ve süresi kısalmaktadır. Taşıma mesafe ve süresinin kısmen de olsa bir fonksiyonu olan malzeme taşıma maliyetleri hücresel üretim için daha düşüktür [3,36].
3. Ufak parti hacimleri, düşük stok seviyesi ve akış süresinde kısalma: Parti hacmi hesabında hazırlık süreleri dikkate alınmakta ve ortalama hazırlık süresi değiştiği zaman parti hacmi de değişmektedir. Hücresel üretimdeki hazırlık sürelerinin kısa olması nedeni ile parti hacmi ufak olur ve parti işleme süreleri azalır. Ufak parti hacimleri ve kısa işlem süreleri ise çizelgelemede kolaylık ile esneklik, daha az darboğaz, makina kullanım oranında artış, üretim içi stok seviyesinde azalma ve ortalama akış süresinde kısalma sağlar. Malzeme taşıma süresinin kısalması, hazırlık süresinde kısalma, uzman işgücü ve sağlıklı çizelgeleme gibi diğer etmenler (faktörler) de üretim içi stok seviyesi ve akış süresinin düşük olmasını sağlar [3,44,36,46,47]
4. Sistem yönetiminin kolaylaşması ve planlamada iyileşme: Hücredeki işgücünün iyi eğitilmesi nedeni ile iş dağıtımı daha kolaydır ve iş akışındaki aksamalar daha azdır. Ufak parti hacimleri daha düşük üretim içi stok ve ortalama akış süresi ile birlikte daha az darboğaz, çizelgelemede kolaylık ve esneklik sağlar. Parça ailesindeki benzer parçaların iş akış hatları hücrede bu parçaları işlemek üzere gruplanan makinalarla sınırlandığı için makinalarda

çizelgelenen parçalar birbirinden çok farklı değildir. Hücresel üretimde parça ailelerinin belirli ve ufak hücresel birimlerde üretilmesi dolayısı ile üretim planlama ve kontrolü basitleşir [3]. Üretim planlama ve kontrolünün basitleşmesi ile birlikte daha iyi maliyet tahmini yapabilme olanağı da ortaya çıkmaktadır.

5. İşgücü maliyeti ve çalışan sayısında azalma: Hücrelerdeki işler birbirleri ile bağlı olduğu için tek bir çalışanın yapabileceği işlerin çeşitliliği artar, üretim içi stok düzeyindeki azalma ve işyerindeki taşıma işleminin basitleşmesi sonucu çalışma koşulları ve iş güvenliği iyileştir [47]. Makinaların hücrelerde gruplanması ile çalışanların aynı anda birden fazla makinayı kullanabilme olanağı ortaya çıkmaktadır. Bu durumda işgücü düzeyindeki azalma ile birlikte maliyetler azalır [3].
6. İş gücünün uzmanlaşması ve kalitede iyileşme: Hücresel üretimde hücre ustabaşı ve çalışanlar hücrede parça ailesi ile ilgili olarak çeşitli tiplerdeki makinalarda gerçekleştirilebilecek değişik işlemler konusunda uzmandır, buna karşın atelye tipi üretimde çalışanlar sadece bölümdeki aynı tip makinalarda yapılabilecek işlemler konusunda uzmandır. Hücre çalışanları üretilen parçalardan hep birlikte sorumlu olduğu ve hücre parça ailesine ait parçaların işlenmesinde uzmanlaştığı için parçalardaki üretim hataları ve hatalı parçaların hangi hücreden kaynaklandığı daha kolay belirlenebilir. Dolayısı ile toplam kalite yönetimi gibi teknikler rahatlıkla uygulanabilir ve en yüksek kalite standardı elde edilebilir. Atelye tipi hücrelerde ise, hata farklı bölümlerden kaynaklanabilir ve bölümlerden hiçbiri hatanın kendilerine ait olduğunu kabul etmeme eğiliminde olabileceği için, iyi bir kalite programı uygulayarak kaliteyi yükseltmek oldukça zordur [47].
7. Düşük yatırım maliyeti: Makinaların parça ailelerinin üretimi için ürüne göre düzenlenmesi nedeni ile bazı makinalarda fazla kapasite oluşabilir ve örneğin çok amaçlı bir torna tezgahı, parça ailesinin ilgili hücrede işlenmesi için daha uygun olan, basit bir torna tezgahı ile değiştirilebilir. Yani karmaşık makinaların yerine daha basit olanlarının yerleştirilmesi yatırım maliyetini azaltır. Ayrıca üretim içi stok düzeyinin az olması, daha düzgün iş akışı ve malzeme taşımada basitleşme ve bunların sonucu atelye için gerekli alanın

azalması da hücresel üretimde maliyetlerin düşük olmasını sağlayan diğer faktörlerdir [3,36].

8. Çalışanların yaptıkları işlerden daha fazla tatmin olması, yapılan işlerin çeşitlendirilmesi ve insan ilişkilerinde iyileşme: Hücresel üretimin sosyolojik olarak faydalı yönleri de incelenmiştir. Parça ailesi hücrede çalışan grup tarafından üretildiği ve çalışanlar hücrede üretilen parçalardan birlikte sorumlu olduğu için grup halinde çalışma duygusu ve insan ilişkileri gelişir. HÜ çalışanların takım halinde birlikte çalışmaları, sorumluluk ile hücre yönetiminin çalışanlara devri ve toplu ödüllendirme gibi nedenlerle daha iyi iş tatmini sağlanmakta ve çalışma verimi artmaktadır. Aynı zamanda çalışanların birden fazla makina kullanabilmeyi öğrenmesi ve işlemleri dönüşümlü olarak gerçekleştirilebilmesi ise iş çeşitliliğini arttırmaktadır [3].

Yukarıda belirtildiği gibi iş tatmininde, insan ilişkilerinde ve işlerin çeşitlendirilmesinde hücresel üretimin olumlu etkileri olabileceği görüşüne karşıt olan görüşlerde vardır ve bunlar aşağıda açıklanmaktadır:

Leonard ve Rathmill [48] hücresel üretimde iş tatmini duygusunun daha az olduğunu belirtmektedir. Parçaların aileler halinde gruplanması nedeni ile hücre çalışanları benzer parçaları işlemektedir ve devamlı olarak aynı işi yapma duygusu oluşabilir. Hücredeki grup çalışması, çalışanlardan bazılarının yavaş çalışması nedeni ile diğerlerinin prim kazancını sınırlar ve teşvik sisteminin uygulanmasını zorlaştırır. İşlerin dönüşümlü olarak yapılması verimliliği veya çalışanların gelişmesini sağlayamayabilir. Kalifiye işçiler daha az yetenek gerektiren işleri yapmaları durumunda statülerinde düşme olduğu duygusuna kapılabilir ve dolayısı ile yaptıkları işten tatmin düzeylerinde düşüş olabilir. Fazakerley [47] parça ailelerindeki parça çeşidinin doğal olarak az olmasının, hücre çalışanlarının yaptıkları işlerdeki çeşitliliği azalttığını savunur.

HÜ nün yukarıda belirtilen yararları yanında bazı zayıf noktaları da vardır ve bunlar aşağıda açıklanmıştır [34,39]:

1. İlk yatırım maliyetinin yüksekliği: Hücresel üretimin yararları arasında daha önce yatırım maliyetinin düşük olabileceği belirtilmiş olmasına rağmen aşağıda yapılan açıklamalardan da anlaşılacağı gibi bu konu tartışmaya açıktır. Hücresel üretimin zayıf noktalarından en önemlisi sistemin

geliştirilmesi sırasında yapılan masrafların yüksek olmasıdır [39]. Hücresel üretimde parçaların kodlanması ve verilerin toplanması zaman alıcı ve pahallı bir uğraştır. Makinaların hücreler halinde düzenlenmesi de işlerin belli bir süre için durdurulmasını gerektirdiği için yatırım maliyeti yükselir. Hücresel üretimde makinalar hücrelere dağıtılır ve her bir hücre kendi parça ailesindeki parçaları işleyebilecek tüm makinalara sahip olmalıdır. Eğer gerekli makinalardan bazıları hücrede bulunmaz ise bazı partiler işlenmek üzere bir diğer hücreye gider ve bu durumda hücresel üretimin verimi azalır. Parçaların hücreler arasında hareket etmesini önlemek için eksik olan makinanın hücreye ilave edilmesi halinde yatırım maliyeti artar.

2. Düşük makina kullanım oranı ve esneklik: Hücresel üretimde hücrelerin birbirinden bağımsız olması için toplam makina sayısında artış olmaktadır. Bu durumda makina kullanım oranı atelye tipi üretime göre daha düşük olur. Makina kullanım oranını etkileyen bir diğer nokta daha vardır. Hücreler sabit ürün karışımına sahip parça ailelerini işlemek üzere tasarlanır. Ayrıca hücrelerin maksimum sayıda farklı parçayı işleyebilecek şekilde tasarlanabilme olanağı da hücresel üretimin esnekliğini arttırmak için dikkate alınmalıdır. Fakat diğer taraftan hücresel üretimin yararlarını tam olarak gerçekleştirmek için ise hücrelerin esnekliğinin sınırlı olması gerekir. Belli zaman dilimi içinde oluşan ürün karışımındaki değişiklik hücrelerin yüklenmesinde dengesizliğe neden olur. Bu durumda hücresel üretim prensipleri gereği makinaların gruplanması ve uzmanlık, eğitim gereksinimi, sendikal sınırlamalar gibi diğer nedenler ile işgücü ve parçaların hücreler arasında hareket etmesine izin verilmez ise sistemin esnekliği azalır. Bazı hücrelerdeki makinaların daha az kullanılması nedeni ile bu makinaların kullanım oranları düşer. Makina kullanım oranının düşmesi ve esnekliğin azalması sonucu hücre yükleme ve hücre içindeki makinaların çizelgelenmesinin zorlaşması ile akış sürelerinin uzar ve bitmiş ürünlerin tesliminde gecikmeler ortaya çıkar.

Esnekliği azaltan ve makina kullanım oranının düşmesine neden olan diğer noktalar da şu şekilde sıralanabilir:

- Hücresel üretimde benzer tipteki makinaların hücrelere dağıtılması sonucu farklı hücrelerdeki iki ya da daha fazla sayıda aynı tip makina aynı zaman diliminde faklı düzeylerde dengesiz olarak yüklenebilir.
- Hücresel üretimde hücrelerdeki makina sayısı çalışan sayısından daha fazla olabileceğinden makina kullanım oranı atelye tipi üretim sistemine göre daha düşük olabilir.
- Hücre yapısı bazen ileri derecede uzmanlaşmış bazen de yeterince uzmanlaşmamış üretim bölgeleri oluşturabilir.

2.7. Hücresel Üretim ile Atelye Tipi Üretimin Karşılaştırılması

Hücresel üretim ve atelye tipi üretim sistemi birbirinden oldukça farklıdır ve bu iki sistem arasındaki farklar şu şekilde sıralanabilir:

1. Hücresel üretim benzer parçalardan oluşan parça ailelerini işlemek üzere farklı tipteki makinaların hücreler halinde gruplanması ile oluşur, yani torna, freze gibi farklı tip tezgahlar aynı hücreye ilgili parça ailesini işlemek üzere yerleştirilir. Atelye tipi (fonksiyonel veya işlevsel) yerleşimde ise aynı tipte makinalar sadece ilgili işlemi yapmak üzere bölümler halinde toplanır, yani tornalar, frezeler gibi aynı tip tezgahlar ayrı ayrı bölümlere yerleştirilir.
2. Hücresel üretimde parça ailelerindeki parçaların benzer olması nedeni ile hazırlık süreleri atelye tipi üretimdeki hazırlık sürelerine göre ortalama olarak daha kısadır. Geleneksel bir tezgahta iki benzer parça arasındaki hazırlık için geçen süre birkaç dakika gibi kısa olabilir, fakat parçalar birbirinden oldukça farklı ise hazırlık süresi yarım saat ve belki de daha fazla bir süre gerektirebilir. Buna karşın atelye tipi üretimde parça aileleri yoktur ve her makina o makinada üretilebilecek herhangi bir parçayı işleyebilir. Dolayısı ile atelye tipi üretimde makinalar çok çeşitli parçaları işlemek durumundadır ve ortalama hazırlık süreleri göreceli olarak daha uzundur. Optimum makina yükleme sırasının seçimi gereklidir. Atelye tipi (fonksiyonel veya işlevsel) yerleşimde hazırlık sürelerinin kısaltılmasını dikkate alan en uygun (optimum) sıralamanın bulunması oldukça zordur. Hücresel üretimde ise bu sıralamayı elde etmek oldukça kolaydır.

3. Hücresel üretimde ufak veya orta hacimli partilere karşın atelye tipi üretimde büyük hacimli partiler söz konusudur.
4. Hücresel üretimde çalışanlar hücrelerinde bulunan birden fazla tipteki makinaları kullanabilecek yetenektedir, atelye tipi üretimde ise çalışanlar bölümlerinde tek tip olan makinaları kullanabilecek yetenektedir.
5. Hücresel üretimde parçalar hücreler içinde hareket eder, atelye tipi üretimde ise parçalar bölümler arasında hareket eder. Atelye tipi üretim sistemlerinde, farklı bölümlerde bulunan makinalar arasındaki mesafelerin uzun olması nedeni ile en ekonomik malzeme taşıma metodu çatallı yükleyici (İng: forklift) gibi pahallı araçlar ile parçaların partiler halinde taşınmasıdır. Hücresel üretim de ise konveyör ve robot gibi sistemlerle parçalar hücre içinde sürekli olarak ve/veya tek tek taşınabilir.
6. Hücresel üretim programlanabilir tezgahlar (CNC ve DNC) ve robot kullanımına daha uygundur, atelye tipi üretimde ise geleneksel tezgahların kullanımı daha yaygındır.
7. Hücresel üretim sistemleri ekonomik ve teknolojik değişikliklere rahatlıkla uyum sağlar. Atelye tipi üretimde emek yoğun üretim ve düşük nitelikli işgücü ortamına karşın hücresel üretimde birden fazla yeteneğe sahip yüksek derecede yetenekli işgücü gerektiren üretim ortamına dönüşüm olmaktadır.
8. Her yeni sistemin uygulanmasında olduğu gibi, hücresel üretimin ilk kez uygulandığı firmalarda, başlangıç aşamasında bazı güçlüklerin olması doğaldır. Personelin yeniden organize edilmesi ve eğitimi, hücresel üretimin ekonomik ve işlevsel açıdan değerlendirilmesi ile işyerinin ürüne göre hücresel birimler halinde düzenlenmesi karşılaşılabilecek önemli sorulardır.

2.8. Hücresel Üretim Sistemlerinin Tasarımı

Diğer üretim sistemleri tasarımında da olduğu gibi hücresel üretim sistemlerinin tasarımında 4 ana kademe vardır:

1. Her bir hücrede işlerin gruplandırılması
2. Her bir hücrede kapasitenin planlanması
3. Her bir hücrenin yerleşim düzeninin belirlenmesi
4. Her bir hücrede üretimin çizelgelenmesi

İşlerin gruplandırılması tasarım benzerliği veya işlemlerin benzerliği dikkate alınarak gerçekleştirilebilir. Bu şekilde hücrelerin her biri için belirlenen parça aileleri hücrelerin oluşturulabilmesi için yeterli miktarda yük oluşturmalıdır. Hücrelerdeki makina tipleri ve her bir makina tipine ait gerekli makina sayısının belirlenmesi için kapasitenin planlanması hücre yerleşim düzenlemesinden önce yapılmalıdır. Makinaların sayısının en azından fonksiyonel (işlevsel) yerleşim düzenindeki kullanım oranlarını sağlayacak şekilde belirlenmesi tercih edilmelidir. Yerleşim düzenlemesinde ayrıca malzeme taşıma maliyetinin minimize edilmesi, malzeme akışının düzgün olması gibi amaçları gerçekleştirmek gerekir. İşlerin hücrelere atanmasından sonra hücreler çizelgelenir. Çizelgeleme ve hücre düzenleme birbiri ile yakından ilgilidir, bunlardan hangisinin öncelikle irdelenmesi gerektiği açık değildir ve genelde bu iki problem birlikte değerlendirilir.

Benzer boyut, şekil ve işlevlere sahip parçaların her zaman aynı gruptaki tezgahlarda işlem göreceği söylenemez. Araştırmacılar 1950'lerin başlarında ortak üretim olanaklarını paylaşan parçaların mutlaka aynı tasarım özelliklerine sahip olmadığını fark etti ve Mitrofanov tarafından 1959 'da, takip eden kısımda açıklanan, karma parça (İng: composite part) kavramı geliştirildi. Benzer işlemlere ve iş akış hatlarına sahip parçaların oluşturduğu ailelerin işlenmesi için makinaların gruplanması ve ortak olarak kullanılan takım gruplarının oluşturulması sureti ile hazırlık sürelerinin azaltılmasını sağlayan bir teori olarak hücresel üretim geliştirildi. Hücresel üretim sistemlerinin tasarımında parçaların iş akış hatları üzerinde işlendikleri makinaları ifade eden makina parça matrisi kavramı, özellikle, çok önemlidir.

2.8.1. Karma Parça Kavramı

İlk defa Mitrofanov tarafından 1959'da geliştirilen karma parça (İng: composite part) kavramı oldukça önemlidir. Karma parça kavramı parça ailesi kavramı ile yakından ilgilidir. Parça ailesi benzer tasarım ve üretim özelliklerine sahip parçaların oluşturduğu bir küme olarak tanımlanır. Karma parça ise parça ailesindeki her parçaya ait tüm tasarım ve üretim özelliklerine sahip olan düşünsel bir parça şeklinde tanımlanır [6,7,18]. Bir karma parça örneği Şekil 2.8'de görülmektedir ve karma parçaya ait uygun özelliklerden faydalanmak sureti ile parça ailesindeki her bir parçayı türetmek olanaklıdır. Parça ailesini temsil eden karma parçaya ait tüm

işlemleri gerçekleştirebilecek kapasitedeki makina ve donanımın biri birine yakın olarak yerleştirilmesi sureti ile üretim hücreleri oluşturulur [6,7,18].

2.8.2. Makina Parça Matrisi

Hücresel üretimin uygulanmasındaki ilk adım parça makina matrisinin belirlenmesidir. Makina parça matrisi genelde makina hücreleri ve parça ailelerini belirlenmesine temel oluşturan bilgi ve verileri içerir. Örneğin üretim akış analizi (İng: production flow analysis, PFA) parça iş akış hatlarını ve işlem kartlarını kullanarak bu matrisi oluşturur. Daha sonra benzer parçaları ayırır, yeniden düzenler ve gruplandırır. Bu şekilde parça aileleri ve makina grupları belirlenir. Benzerlik katsayıları metodunda ise makina parça matrisi, makina benzerlik matrisini oluşturmak için temel olarak kullanılır. Makina parça matrisinin sağladığı yararlar şunlardır:

1. Operasyonları gerçekleştiren makinaların ve parçaların birlikte gösterimini sağlar.
2. Blok diyagonal haline dönüştürüldüğünde makina hücreleri ve parça ailelerini belirler.
3. Blok diyagonal halinde istisnai elemanları belirler.
4. Makina parça gruplarını belirleme ve benzerlik katsayıları hesaplanma gibi işlemler bilgisayarda programlanmak sureti ile gerçekleştirilebilir.

Makina parça matrisinin zayıf noktası ise veri sayısının artması ile matrisin gözle incelenmesinin zorlaşmasıdır. Ayrıca sıfır bir formatlı matris operasyonlar hakkında kısıtlı bilgi sunar, fakat Gupta ve Tompkins [49] gibi bazı araştırmacılar makina kapasitesi, parçanın işlem süresi ve parti hacmi gibi bilgilerinde matrise ilavesi ile bu mahsurun giderilebileceğini belirtmektedir.

Bir makina parça matrisinin blok diyagonal hale dönüştürülmeden önceki durumu Şekil 2.13 'de görülmektedir. Sol düşey kolon makina ya da operasyon tipini belirtir ve her bir makina tipi birden fazla aynı tip eşdeğer makinaları gösterebilir. Üst yatay satır ise parça tiplerini belirtir. Aynı matrisin blok diyagonal hali Şekil 2.14 'de görülmektedir. Blok diyagonal matriste makina hücrelerinin ve parça ailelerinin bağımsız ve açık olarak belirlenmesi ideal olarak istenen bir durumdur. Bununla

beraber blok diyagonal dışındaki istisnai eleman sayısı artıkça matrisin etkinliği azalmaktadır. Matrisin etkinliği istisnai elemanların sayısı ve bu durum sonucu oluşan hücreler arası yük hareketlerine bağlıdır.

Makina (m) \ Parça (p)	1	2	3	4	5
1	1	0	1	0	0
2	0	1	1	0	1
3	1	0	0	1	0
4	0	0	1	0	1

Şekil 2.13 : Parça makina matrisinin ilk durumu

Makina \ Parça	1	4	3	5	2
1	1	0	(1) İstisnai eleman		
3	1	1			
2			1	1	1
4			1	1	0

(a) istisnai elemanlı blok diyagonal durum

Makina \ Parça	1	4	3	5	2
1	1	1			
3	1	1			
2			1	1	1
4			1	1	1

(b) ideal blok diyagonal durum

Şekil 2.14 : Parça makina matrisinin blok diyagonal durumu (son durum)

2.9. Hücresel Üretim Sistemi Tasarım Yöntemleri

Parti üretiminde hücresel üretim uygulanması için öncelikle parçaların ve makinaların belirlenmesi gerekir. Bu süreç ise hücrelerin mevcut makinaların yeniden düzenlenmesi ya da yeni makinaların satın alınması sureti ile düzenlenmesi koşuluna göre farklılık gösterir. Mevcut donanım yeniden düzenlenmesi ile oluşturulan hücrelerde, genelde, iş gücü kullanımı önemli olmaktadır ve hazırlık işlemi, parça işleme, malzemelerin taşınması ve hatalı parçaların belirlenmesi gibi işlerin gerçekleştirilmesinden çalışanlar sorumludur. Hücreler yeni ve belirli düzeyde esnek otomasyona sahip ileri teknoloji ürünü makinalar ile donatılacak şekilde tasarlanabilir. Bu tip hücreler genelde insansızdır ve insanların hücre işletimindeki görevi ise parça yükleme ile boşaltma, takımların değiştirilmesi, sistemin bakımı ve hatalı parçaların belirlenmesi ile sınırlıdır [15]. Mevcut ya da yeni makinalar

kullanılması kararına bağlı olmaksızın hücresel sistem uygulamalarında çözülmesi gerekli ilk sorun bir hücre tasarım yönteminin belirlenmesidir.

Hücresel üretimin uygulanmasındaki en önemli aşama parça ailelerinin ve bu ailelerin işleneceği ilgili makina hücrelerinin tasarlanmasıdır. Bu işlem makina parça gruplaması (İng: machine-part grouping) olarak adlandırılır. Makina parça gruplama algoritmalarının birçoğu makina parça matrisindeki verilerden yararlanır. Hücre tasarımı parça aileleri ve bu parça ailelerini işleyecek makina gruplarını belirleme işlemidir. Hücre tasarımı problemi, üretimi gerçekleştiren makinaların adedi, tipleri ve kapasiteleri ile üretilecek parçaların adedi, tipleri, iş akış hatları ve makina standartlarının bilinmesi durumunda makinaların ve parçaların hücreleri oluşturmak üzere gruplandırılması şeklinde tanımlanabilir [50].

Hücresel üretim alanındaki araştırmaların çoğu parça ailesi ve makina gruplandırması olarak da bilinen hücre tasarımı teknikleri ile ilgilidir. Bazı hücre tasarımı teknikleri operasyonları içeren detaylı verileri dikkate alır. Singh ve Rajamani [5], Kusiak ve Chow [51], Wemmerlov ve Hyer [15], Gallagher ve Knight [7] ile King ve Nakornchai [52] gibi araştırmacılar hücre tasarımı teknikleri ile ilgili çeşitli çalışmaları topluca incelemiştir.

Hücre tasarımında belirli makina gruplarının işleyebileceği parça ailelerinin (kümelerinin) var olduğu kabul edilmektedir. Bu varsayımın sağlanabilmesi için parçalar ile makina grupları arasında parça iş akış hatları gibi temel ilişkilerin olması gerekir. Aynı makina grubunda işlenebildikleri için bir parça ailesindeki parçalar arasında ilişki vardır. Benzer şekilde aynı parça ailesini işleyebilen makinalar grup olarak aralarında ilişkilidir. Hücre oluşturma prosedürlerinin büyük bölümü belirtilen bu ilişkiyi temel almaktadır. Hücre oluşturma problemi üç temel kararı içerir [15]:

1. Parça ailelerinin belirlenmesi,
2. Makina hücrelerinin belirlenmesi,
3. Parça ailelerinin ilgili hücrelere atanması ve/veya hücrelerin ilgili parça ailelerine tahsis edilmesi.

Bu üç karar birbiri ile etkileşim halindedir, aralarındaki sınırları belirlemek zordur ve hücre oluşturma problemine ait alt problemlerdir.

Hücre oluşturma metotları çeşitli kıstaslara göre sınıflandırılabilir [5,7,15,18]. Genel metotlara göre yapılan sınıflandırma şu şekildedir:

1. Tanımsal prosedürler (İng: descriptive procedures)
2. Kümeleme analizi (İng: cluster analysis) metotları
4. Benzerlik katsayısı (İng: similarity coefficient) metotları
3. Grafik teorisi (İng: graph theory) metotları
4. Matematik programlama (İng: mathematical programming) metotları
5. Karma (İng: hybrid) metotlar
6. Çok amaçlı (İng: multi-objective) metotlar
7. Diğer yaklaşım teknikleri
    a) Yapay zeka (İng: artificial intelligence) yaklaşımı
    b) Sinir ağları (İng: neural networks) yaklaşımı
    c) Genetik algoritmalar (İng: genetic algorithms)
    d) Tavlama benzetimi (İng: simulated annealing)

Diğer bir açıdan ise hücre oluşturma teknikleri üç guruba ayrılabilir:

1. Uzman analizleri (İng: expert analysis)
2. Yapısal yaklaşımlar (İng: structural approaches)
3. Operasyonel yaklaşımlar.(İng: operational approaches)

Bu iki gruplandırma yöntemi birbiri ile örtüşmektedir ve son gruplandırmadaki uzman analizleri ile ilk gruplandırmadaki tanımsal prosedürler birbirinin aynıdır, yapısal yaklaşımlar ilk gruplandırmadaki tanımsal prosedürler hariç diğerlerini kapsar ve operasyonel yöntemler ise ileride daha iyi açıklanacağı gibi yapısal yaklaşımların parçaların makinalardaki işlemleri ile ilgili ilave verileri de dikkate alan daha kapsamlı ve geliştirilmiş hücre oluşturma yöntemleridir. Bu iki örtüşen gruplandırmayı bir arada ele almak suretiyle, bu alandaki tekniklerin çalışmada incelenmesi açısından, aşağıdaki gruplama şekli uygundur:

1. Uzman analizleri ya da tanımsal prosedürler
2. Yapısal yaklaşımlar
    a) Kümeleme analizi
    b) Benzerlik katsayıları metotları
    c) Grafik teorisi
    d) Matematik programlama

3. Operasyonel yaklaşımlar
    a) Kümeleme analizi
    b) Benzerlik katsayıları metotları
    c) Karma metotlar
    d) Çok amaçlı (İng: multi-objective) metotlar
    e) Matematik programlama
4. Diğer yaklaşım teknikleri
    a) Yapay zeka (İng: artificial intelligence) yaklaşımı
    b) Sinir ağları (İng: neural networks) yaklaşımı
    c) Genetik algoritmalar (İng: genetic algorithms) yaklaşımı
    d) Tavlama benzetimi (İng: simulated annealing) yaklaşımı

Yeni hücre oluşturma teknikleri genelde eski yöntemlerin geliştirilmiş halidir. Fakat yöneticileri hücre oluşturma teknikleri arasında en uygun olanını seçebilmeleri konusunda yönlendiren kurallar yetersizdir [11]. Hücre oluşturma da önemli olan diğer noktalar ise her hücredeki makinalar için gerekli işleme takımlarının seçimi, malzeme taşıma araçlarının seçimi ve işyerinin düzenlenmesi gibi problemlerdir. Hücresel üretim sistemlerinin en uygun şekilde tasarımı için tüm bu noktaları dikkate almak gereklidir.

2.9.1. Hücre Tasarımında Uzman Analizi Yöntemleri

Uzman analizi yöntemleri (veya tanımlayıcı yöntemler) bilgisayarların yaygın olarak kullanılmaya başlanmadığı dönemde geliştirildi. Bu yöntemler parça makina gruplarının el yardımı ile oluşturulduğu tekniklerdir ve makina parça matrisindeki verilerin el ile adım adım uygun şekilde düzenlenmesini gerektirir. Bu yöntemler parça ailelerini ve ilgili makina hücrelerini geliştirmek için iş akışı kartlarındaki bilgilerden yararlanır ve hücresel üretim sisteminde parça ailelerinin ve ilgili makina gruplarının oluşturulması için kapsamlı tekniklerdir.

Burbidge tarafından geliştirilen üretim akış analizi (ÜAA, İng: production flow analysis, PFA) hücresel sistemlerin tasarımında parça ailelerinin oluşturulması için ilk geliştirilen sistemli yaklaşımlar arasındadır [5,6,7,18,36,38]. Üretim akış analizi; iş akış analizi, grup analizi, hat analizi ve takım analizi olarak dört seviyeden oluşur.

İş akış analizi ana parça ailelerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Grup analizi makina hücrelerine atanacak alt grupların oluşturulması ile ilgilidir. Hat analizi her hücredeki makinaların yerleşim düzeni ile ilgilidir. Takım analizi ise her parça ailesi içinde benzer ya da aynı takımları kullanan parçaları belirlemek için uygulanır. Takım analizi her gruptaki işlerin hazırlık süresini kısaltacak şekilde üretilmek üzere sıralanarak çizelgelenmesinde faydalıdır.

Uygulayıcıya bağlı öznel değerlendirmelere gereksinimin çok fazla olması Üretim Akış Analizinin en zayıf noktasıdır. Çözümün başarılı olması analizi yapan uygulayıcının yetenek ve uzmanlık derecesine oldukça bağlıdır ve sonuçlar analizi yapan uzmanlara göre değişiklik arz eder. Büyük sistemlerin analizi ise çok uzun bir süreci gerektirir. Dolayısı ile hücresel üretim alanındaki pek çok çalışma daha nesnel ve analitik metotlar ile üretim akış analizinin gerçekleştirilmesi yönündedir.

2.9.2. Hücre Tasarımında Yapısal Yöntemler

Parça ailesi ve makina gruplandırma probleminin yapısal yaklaşımlar ile çözümü parçaların iş akışı bilgileri üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım teknikleri üretim akış analizinin kapsamlı yapısından faydalanamaz. Bu yöntemler grupların belirlenmesine yönelmiştir ve hücrelerin yerleşimi ya da hücrelerdeki makinaların yerleşimi göz önüne alınmamaktadır. Bu metotlar parça makina matrisi üzerinde geliştirilmiştir. Standart matris Şekil 13 'de görüldüğü gibi bir 0-1 matrisidir ve 1 rakamı parçanın belli bir makinada işlendiğini gösterir. Matrisin kolon vektörlerindeki 1'ler her bir makinada hangi parçaların işleneceğini gösterir, matrisin satır vektörleri her bir parçayı işlemek için gerekli makinaları belirtir. Matrisin analizi veya satır ve kolonlarının aşamalı olarak yerlerinin değiştirilmesi yolu ile Şekil 2.14 'deki gibi diyagonal bir hat boyunca 1 ile gösterilen elemanların topluca dizilmesi sonucu parça ailesi ve makina grupları oluşturulur. Yapısal analiz yönteminde hücre içi hareketlerin (İng: intra-cell movements) ve hücreler arası hareketlerin (İng: inter-cell movements) minimuma indirgenmesi de dikkate alınabilir. Yapısal yaklaşımlar daha önce belirtildiği gibi kümeleme analizi, benzerlik katsayıları analizi, grafik teorisine dayalı yaklaşımlar ve matematik programlama yöntemi olarak 4 grupta toplanır ve bunlar aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

2.9.2.1. Kümelendirme Analizi Yöntemleri

Makina parça grupları oluşturma yöntemleri de olarak adlandırılan bu teknikler parça makina matrisinin satır ve kolonlarının yeniden düzenlenmesi sureti ile makina grupları ve parça ailelerinin elde edilmesini sağlar. Bu alanda geliştirilen prosedürlerin hepsi parça makina matrisinin satır ve kolonlarının sistematik bir şekilde birbirine paralel olarak kaydırılması sureti ile blok diyagonal yapıyı oluşturan sezgisel metotlardır. Kümelendirme analizi tekniklerinden kademe sıralı kümelendirme (İng: rank order clustering, ROC) [52,53] ile doğrudan kümeleme algoritması (İng: direct clustering algorithm, DCA) [54] algoritmaları yaygın olarak kullanılan algoritmalardır. Bağ enerjisi algoritması [55] ile küme belirleme metodu [51] bu alandaki diğer önemli yöntemler ve çalışmalardır. Bütün yapısal yöntemlerde olduğu gibi kümelendirme algoritmalarının zayıf noktası parça işlem süresi ve hacmi gibi önemli üretim verilerinin dikkate alınmamasıdır.

2.9.2.2. Benzerlik Katsayısı Yöntemleri

Benzerlik katsayıları metodu nesneler arasındaki benzerliği nesnelerin özelliklerine bağlı olarak analiz edilmesi yöntemidir. Nesnelerin dikkate alınan özelliğinin sayısal olarak ifade edilebilmesi durumunda bu yöntem kullanılabilir. Benzerlik katsayıları metodu özel algoritmaların uygulanması ile nesnelerin ilgili özelliğe sahip olma derecesini nicel olarak belirler ve sınıflandırılmalarını sağlar. Bu tekniğin aşağıda açıklandığı gibi üç aşaması vardır:

1. Verilerin gösterimi: İncelenen özelliğin varlığını belirlemek için veriler matris şeklinde düzenlenir. Hücre uygulamasında dikkate alınan özellik bir makinada işlenen değişik tipteki parçaların adedi olmaktadır. Bu veriler her parçanın işlendiği makinaları ya da iş akış hatlarını, belirten makina parça matrisi kullanılarak topluca gösterilir.
2. Benzerlik katsayısının hesabı: Veri matrisi nesneler arasındaki benzerliği ölçmek için kullanılır. Verilerin oluşturduğu parça makina matrisi elemanlar arasındaki benzerliği nicel olarak ifade etmek için uygun bir benzerlik katsayısı kullanılır. Benzerlik katsayısının değeri ilgili özellik açısından eşdeğer olan iki eleman için 1 ile ifade edilen maksimum ve hiçbir açıdan benzer olmayan iki eleman için ise 0 ile ifade edilen minimum değerini alır.

Benzerlik katsayısının 0 ile 1 arasındaki değerleri iki eleman arasında ilgilenilen özelliğe göre değişik düzeydeki benzerlik derecelerini ifade eder.

3. Kümeleme analizi: Nesne ya da eleman çiftleri arasındaki benzerliği yukarıda belirtilen benzerlik katsayısını hesaplamak sureti ile sistematik olarak belirler ve benzer elemanları bir arada toplayarak grupları oluşturur.

McAuley benzerlik katsayıları metodunu hücre oluşturma problemine ilk kez uygulayan araştırmacıdır ve makina çiftlerini karşılaştırmak için Jaccard benzerlik katsayısını aşağıda verilen şekli ile kullanmıştır [5,28]:

$$S_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{ii} + X_{jj} - Xij} \tag{2.1}$$

S_{ij} : Makina i ve j arasındaki benzerlik katsayısı, benzerlik bu iki makinada da işlem gören parça sayısının her iki makinada işlem gören toplam parça sayısına oranı şeklinde tanımlanır

X_{ij} : Makina i ve j de işlenen parça adedi.

X_{ii} : Sadece makina i de işlenen parça adedi.

X_{jj} : Sadece makina j de işlenen parça adedi.

Bu benzerlik katsayısı i ve j makinalarının her ikisinde birden işlenen toplam parça adedinin sadece i ve j makinalarında işlenen, fakat her iki makinada birden işlenemeyen, toplam parça adedine oranını ifade eder. Carrie [56] bu yöntemin, geniş atelye düzenleme problemlerinde kullanımını ele alan, ilk uygulayıcılarından birisidir. Değişik benzerlik katsayıları metotları için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Çeşitli yöntemlerde değişik benzerlik katsayıları kullanılır. Her yöntemin zayıf ve kuvvetli noktaları vardır. Bu gruptaki önemli kümelendirme algoritmaları şunlardır [5]:

1. Tek bağlı kümeleme (İng: single linkage clustering, SLINK)
2. Tam bağlı kümeleme (İng: complete linkage clustering, CLINK)
3. Ortalama bağlı kümeleme (İng: average linkage clustering, ALINK)

Seifoddini ve Wolfe [57] ile Seifoddini [58] benzerlik katsayısı yöntemlerinin çeşitli yönlerini incelemiştir. Bu yöntemlerde analizci tarafından kümelerin oluşturulmasını

sağlayan eşik değerinin belirlenmesi gerekir. Benzerlik katsayısı bu eşik değerden ufak ise ilgili eleman kümeye dahil edilmez. Eşik değerinin seçimi oldukça öznel bir değerlendirmedir. Rajagopalan ve Batra [59] eşik değerinin belirlenmesi için sistematik bir yaklaşım geliştirdi, buna rağmen uygun değerin belirlenmesi öznel olma niteliğini halen korumaktadır ve bu değeri belirlemek oldukça zor bir problemdir. Chandrasekharan ve Rajagopalan [60-62] GROUPABILTY ve ZODIAC algoritmaları yanında MODROC olarak adlandırılan benzerlik katsayısına bağlı bir metot geliştirdi ve bu metot oldukça iyi sonuç vermektedir.

2.9.2.3. Grafik Teorisi Yöntemleri

Bazı araştırmalarda hücre oluşturma problemi grafik teorisi yaklaşımı kullanılarak formüle edilir. Rajagopalan ve Batra [59] hücreleri oluşturmak için grafik teorisi yaklaşımını kullandı. Bu teknikte grafiğin düğüm noktaları makinaları veya makina ve parçaları göstermektedir. Düğüm noktalarını birleştiren kenarlar (dal, çizgi veya yay parçaları) ise parçaların işlenmesini ya da düğümler arasındaki ilişkileri ifade eder. Grafiğin kenarlarına daha önce belirtilen benzerlik katsayılarına benzer şekilde, belirli bir kurala uygun olarak, çeşitli değerler atanır. Bu yaklaşım makina ile makina ya da makina ile parça grafiğinden, hücreleri oluşturmak üzere, türetilen ayrık alt grafikleri elde etmeyi hedefler. Hücre oluşturmaya bağımsız düğüm noktalarından başlanır ve makinalar arasındaki benzerlik belirlenen eşik değerinden daha büyük ise ilgili iki düğüm arasında bir kenar oluşturulur. Bu koşulu sağlayan tüm kenarlar belirlenerek elde edilen alt grafikler makina gruplarından oluşan hücreleri ifade eder. Alt grafikler ile sembolize edilen bu hücreler arasındaki ilişkiler zayıf ve hücreler içindeki ilişkiler ise oldukça kuvvetlidir. Chandrasekharan ve Rajagopalan [63], Vannelli ve Kumar [64] grafik teorisinin çeşitli yönlerini inceledi.

2.9.2.4. Matematik Programlama Yöntemleri

Matematik programlama metotları formüle edilme şekillerine göre dört gruba ayrılabilir;

1) Doğrusal programlama (İng: linear programming, LP)
2) Doğrusal ve kuadratik tamsayılı programlama (İng: linear and quadratic integer programming, LQP)

3) Dinamik programlama (İng: dynamic programming, DP)

4) Amaç programlama. (İng: goal programming, GP)

Purcheck [65] doğrusal programlama yöntemlerini uyguladı, Kumar ve diğerleri [66] ve Kusiak [67] doğrusal ve kuadratik tamsayılı programlamayı inceledi.

2.9.3. Hücre Tasarımında Operasyonel Yöntemler

Hücresel sistemlerin bazı koşullarda düşük işlev (İng: performance) sergilemesinin ana sebebi üretim sisteminin işletim (İng: operational) özelliklerinin mevcut hücre oluşturma yöntemleri kapsamında dikkate alınmamasıdır [5]. Operasyonel yaklaşımlar yapısal yaklaşımlardan farklı olarak hücrelerin belirlenmesi ile birlikte hücresel üretimin operasyonu ile ilgili diğer bazı faktörleri de dikkate alır. Bu yaklaşım genelde parça iş akış hatları, parça talebi ve üretim maliyetleri ile ilgili bilgileri gerektirir. Bu yaklaşımlar üretim sistemi tasarımının tüm yönlerini dikkate alan daha kapsamlı tekniklerin geliştirilebileceğini göstermektedir. Daha önce belirtilen tekniklerin operasyonel bilgiler ilavesi ile geliştirilmesi ve ilerletilmesi sonucu operasyonel yaklaşımlar oluşturulmuştur. Bu yaklaşımlar makina parça gruplama yöntemleri, benzerlik katsayısı metotları, grafik teorisi modelleri, matematik programlama yöntemleri, çok amaçlı modeller ve karma metotlar şeklinde sınıflandırılabilir.

Rajamani ve diğerleri [68] yatırım maliyeti ve işlem sıralarına bağlı hazırlık maliyeti arasındaki dengeyi sağlayan bir matematiksel model geliştirmiştir. Adil ve diğerleri [69] ise yatırım maliyeti ile sıraya bağlı hazırlık, makina boş bekleme, üretim içi stok ve geç teslim gibi işletim maliyetleri arsındaki dengeyi sağlayan daha geniş kapsamlı bir matematiksel model geliştirmiştir. Operasyonel yaklaşımların sınıflandırması ve ilgili bazı çalışmalar Tablo 2.1.' de görülmektedir.

2.9.4. Diğer Hücre Tasarım Yöntemleri

Hücre tasarımı yöntemleri optimizasyon problemlerinin çözümünü gerektirir. Optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan tavlama benzetimi, genetik algoritmalar, sinir ağları ve yapay zeka yaklaşımları son zamanlarda hücre tasarımı alanında uygulanmaktadır [5]. Tavlama benzetimi fiziksel bilimlere ait prensiplerden

türetilmiş bir yöntemdir. Genetik algoritmalar, sinir ağları ve yapay zeka yaklaşımları ise biyolojik bilimlerden faydalanan yöntemlerdir. Bu alandaki araştırmalar oldukça yenidir ve bu yaklaşımların optimizasyon problemlerinin çözümünü hangi koşullarda sağlayacağı henüz tam olarak bilinmemektedir [5].

Tablo 2.1 : Hücre tasarımında operasyonel yöntemler alanındaki sınıflandırma ve ilgili çalışmalar

Çalışma Sınıfı	Çalışmayı Yapanlar	Yıl
Makine Parça Gruplama	Askin ve Subramanian [70]	1987
Benzerlik Katsayısı	DeWitte [71]	1980
	Seiffoddini [72]	1990
	Mosier ve Taube [73]	1985
	Waghodekar ve Sahu [74]	1984
	Vakharia ve Wemmerlöv [40]	1990
	Balasubramanian [75]	1993
Grafik Teorisi	Chakravarthy ve Shtub [76]	1984
Matematik Programlama	Damodaran ve diğerleri [77]	1992
	Sankaran ve Kasilingam [78]	1993
Çok Amaçlı Modeller	Han ve Ham [79]	1986
	Rajamani ve diğerleri [80]	1992
Karma Metotlar	Ballakur ve Steudel [81]	1987
	Choobineh [82]	1988
	Co ve Araar [83]	1988
	Askin ve Chiu [84]	1990
	İrani ve diğerleri [14]	1993

2.10. Hücresel Üretim Sistemlerinin Uygulanması ve Benzetimi Alanında Yapılmış Çalışmaların İncelenmesi

Grup teknolojisi ve hücresel üretim alanında yapılan araştırmaların ve vaka çalışmalarının önemli bir kısmı hücresel üretimin çeşitli açılardan üretkenliği arttırdığını ortaya koymaktadır. Rapor ya da vaka çalışması şeklindeki çeşitli kaynaklar değişik üretim ortamlarında hücresel üretimin yararlarını ve performansındaki başarıyı belirtmektedir [37,85-87].

Üretim Akış Analizini geliştiren Burbidge grup teknolojisinin ve hücresel üretimin tanıtımını yapan öncülerden biridir. Burbidge yaptığı bazı çalışmalar sonucu

İngiltere'de grup teknolojisinin başarılı uygulamaları olduğunu belirmektedir. Burbidge her tipteki parti üretiminde makina hücrelerinin ve bu hücrelerde işlenen parça ailelerinin oluşturulabileceğini ileri sürmektedir. Parça iş akış hatlarının oldukça esnek olması nedeniyle hücresel üretim sistemlerinin oluşturulması ve grup teknolojisinin uygulanması her sistem için olanaklıdır. Ayrıca Burbidge fonksiyonel üretim sisteminden hücresel üretime dönüşümün her zaman için olanaklı olduğunu ve bu dönüşümün genelde ekonomik ve sosyal açıdan gerekliliğini belirtir [37,38,44].

Hyer Amerika Birleşik Devletleri'ndeki grup teknolojisi uygulamasının durumunu belirlemek üzere, grup teknolojisini kullanan 20 üretici üzerinde araştırma yapmıştır. Bu araştırmanın yapıldığı firmaların % 85 'i grup teknolojisinden elde edilen yararın istedikleri düzeyde ya da daha iyi düzeyde olduğunu belirtmektedir [8]. Bu firmalar grup teknolojisini uygulanmak sureti ile atelye tipi üretimdeki uzun akış süreleri, yüksek üretim içi stok düzeyi, üretim maliyetinin yüksekliği ve teslim sürelerindeki gecikmeler gibi problemleri çözmeyi amaçlamaktadır.

Karma hücresel sistem (İng: hybrid cellular system) uygulamaları endüstride yaygın olarak yer almaktadır. Wemmerlöv ve Hyer [2] tarafından incelenen ve hücresel üretim sistemini uygulayan firmaların % 68 'nin makina hücrelerini oluşturmak için % 20 ye kadar çıkabilen oranlarda yeni donanım satın almak zorunda kaldığını belirtmektedir ve ayrıca firmaların pek çoğu hücresel üretim ile atelye tipi üretimin karışımından oluşan karma sistemleri kullanmaktadır. Birçok firma tek adımda tümü ile hücresel üretime geçmek yerine, ilk önce pilot hücre oluşturur ve zaman içinde kademe kademe tüm sistemi hücresel üretime dönüştürür. Hücresel üretimin firmada ilk kez uygulanmasının zorlukları da dikkate alınır ise bu yaklaşımın daha gerçekçi olduğu anlaşılabilir.

Flynn ve Jacobs [88,89] atelye tipi sistemin hücresel üretim sistemine dönüştürüldükten sonra ve önceki durumlarını karşılaştırdı. Araştırmacılar gerçek atelye üzerindeki gözlemlerden elde edilen bilgileri kullanarak geliştirdikleri yarı düşünsel modelleri benzetim tekniği ile incelemiştir. Performans ölçütleri ortalama akış süresi, ortalama üretim içi stok düzeyi, ortalama hazırlık süresi, ortalama malzeme taşıma süresi ve ortalama kuyruk uzunluğu olarak seçilmiştir. Bu çalışmalarda çizelgeleme tekniği olarak makina yükleme uygulanmış, fakat parti

bölmeli çizelgeleme (parti bindirmeli çizelgeleme veya paralel parti işleme) uygulanmamıştır. Hücresel üretim gereği tezgahların parça ailelerinin işlenmesi için ayrılması nedeni ile kuyrukların uzadığı, üretim içi stok düzeyinin yükseldiği ve bekleme sürelerinin arttığı kaydedilmiştir. Hücresel üretimin ortalama hazırlık süreleri ve ortalama taşıma süreleri bakımından daha iyi performans göstermesine karşın, kuyruk ile ilgili ölçütlerin sunduğu olumsuz değerlerin daha baskın olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak Flynn ve Jacobs [88,89] atelye tipi fonksiyonel düzenlemenin üretim performansı açısından daha iyi olduğunu belirtmektedir. Flynn ve Jacobs [88,89] yaptığı olumsuz eleştirilere rağmen, grup teknolojisi ve hücresel üretim uygulaması ile partilerin ortalama taşınma mesafeleri ve ortalama hazırlık sürelerinin kısalması sonucu ortalama iş akış süresinin önemli derecede kısaldığını ifade etmiştir.

Flynn [90] hazırlık sürelerinin hücresel üretimin çıktı kapasitesi üzerindeki etkisini incelmiştir. Bu çalışmada benzetim modelleri kullanılmış ve makina kullanım oranının % 60 dan % 90 çıkması sonucu çıktı miktarı arttırılmıştır. Azalan hazırlık sürelerinin daha yüksek çıktı oranı sağlaması ile birlikte kuyrukta bekleme sürelerinin arttığı, üretim içi stoklarının yükseldiği ve iş akış süresinin (temin süresinin) uzadığı belirtilmiştir. Fakat hazırlık sürelerinin azaltılması sonucu hücresel üretimde daha fazla etkin kapasite sağlandığı ve makina kullanım oranın yükseldiği ifade edilmiştir.

Durmuşoğlu [91] bir taşıt aktarma organları ve yedek parçalarını üreten gerçek atelye tipi bir sistemin hücresel sisteme dönüştürülmesini SIMAN benzetim dili ile kodlamak sureti ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Her iki tip üretim sistemine ait benzetim modellerinin koşumu ile elde edilen performans değerlerinin ve bu değerler üzerinde yapılan ekonomik analizlerin karşılaştırılması sonucu hücresel üretim sistemine dönüşümün uygun olduğu araştırmacı tarafından ifade edilmiştir.

Shafer ve Meredith [92] hücresel üretim sistemlerinin uygunluğunu belirleyen koşulları inceler. Bu çalışmada üç ayrı firmaya ait veriler kullanılmaktadır. Bu üç firmaya ait hücresel yerleşim düzenleri altı farklı hücresel oluşturma tekniği kullanılarak geliştirilmiştir. İncelenen hücre oluşturma teknikleri parça ailesi gruplandırma, makina gruplandırma ve parça makina gruplandırma gibi üç ayrı

sınıftan seçilmiştir. Ayrıca hücresel üretim ile karşılaştırma yapabilmek için yerleşim planlama yazılımı CRAFT kullanılarak fonksiyonel yerleşim oluşturulmuştur. İncelenen hücre oluşturma yöntemlerinin belirlediği farklı altı hücresel sistem ve fonksiyonel yerleşim için geliştirilen benzetim modelleri ile sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada ortalama akış süresi, ortalama taşıma mesafesi, ortalama üretim içi stok düzeyi, hücre dışı işlem adedi gibi performans ölçütleri kullanılmıştır. Aynı makinayı alternatif (seçenek) hücrelere atayabilme esnekliğine sahip olan parça ailesi gruplama yöntemlerinin en iyi performansı sağladığı belirtilmiştir.

Morris ve Tersine [93] düşünsel olarak oluşturulan bir atelye tipi üretim sistemi ile bir düşünsel hücresel sistemi Siman [94] benzetim yazılımı ortamında kodlamış ve karşılaştırmıştır. Kararlı talep, uzun hazırlık süreleri, stok için üretim çizelgeleme, geniş alan ve uzun taşıma mesafeleri gereksinimi gibi özelliklere sahip üretim ortamlarında faaliyet gösteren atelye tipi üretim sistemleri karşısında hücresel üretimin daha üstün olduğu belirlenmiştir.

2.11. Sonuç

Yeni bir sistem olarak hücresel üretimin uygulanması sırasında bazı zorlukların ortaya çıkması doğaldır. Ekonomik olmasına karşın, mevcut işi kaybetme ya da mevcut görevin değişimi korkusu, eğitim ve ücret konusundaki problemler, iş yerindeki diğer kesimlerin bu değişime yeterince destek vermemesi veya karşı olması gibi sebeplerle çalışanlar hücresel üretimin uygulanmasına karşı olabilir. Bu gibi zorluklara rağmen, üretkenliği iyileştirme, firmayı rekabet düzeyinde tutma ihtiyacı ve kanıtlanmış yararları nedeni ile birçok firma hücresel üretimi uygulamak istemektedir. Ayrıca takım çalışmasını ve rekabeti geliştirmesi ile işyeri otomasyonu ve bütünlüğü (İng: integration) için uygun ortam oluşturması bakımından da hücresel üretim çok faydalıdır [11].

Hücresel üretime olan güncel ilgi rekabette ayakta kalabilme ve yeni teknolojilerin uygulanması ile yakından ilgilidir [2]. Japonlar hücresel üretim kavramına bağlı olarak tam zamanında üretim sistemlerini oluşturup uluslararası rekabette ileri konumlarını korumaktadır. Son yıllarda Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'daki

üretim endüstrisi rekabet gücünü geliştirmek üzere Japonların başarılı üretim stratejilerini taklit etmektedir. Sonuç olarak hücresel üretim, en azından ABD'de, verimsiz ve eski model üretim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasında önem kazanmıştır. Ayrıca robotik (İng: robotics), bilgisayar bütünleşik üretim (BBÜ, İng: computer integrated manufacturing, CIM), esnek üretim sistemleri (EÜS, İng: flexible manufacturing systems, FMS) gibi yeni teknolojilerin verimli kullanımı hücresel üretim yaklaşımını gerektirir.

3. ÜRETİM ESNEKLİĞİ VE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ESNEKLİK

3.1. Giriş

Günümüz modern toplumlarında her alanda kullanılan esneklik kavramı, sigorta poliçeleri gibi soyut ürünlerden esnek kavramalar ve lastik hortumlar gibi somut fiziksel elemanlara kadar, çok çeşitli ticari ve endüstriyel ürünler için istenilen bir özellik durumundadır. Geniş anlamda kullanılış şekli ile esneklik kavramı değişik seçeneklerin mevcut olması, değişen ihtiyaçların iyi karşılanması ve cevaplanması anlamına gelmektedir. Bir nesne ya da sistemin esnekliği, genel bir kavramsal terim olarak, devamlı değişen çevre ya da içsel ve dışsal koşullara uyum sağlayabilme yeteneği şeklinde ifade edilebilir. Esnek olmak ise bir sistemin içyapısı veya tasarım özellikleri ile ilgili olan gözlenebilir bir özelliktir.

Üretimde esneklik günümüzde revaçta olan bir kavram ve özelliktir. Müşteriler daha hızlı cevap ile daha fazla çeşitte geliştirilmiş mal talep ettiği ve rakipler ise bir kaç yıl öncesine kadar sağlanan düzeyden daha yukarıda bir performans gerçekleştirdiği için esneklik, diğer tüm performans ölçütlerinden daha önemli, bir çözüm olarak sunulmaktadır. Üretim operasyonlarında daha fazla esneklik sağlanması ile müşteri isteklerini karşılama, rekabet baskılarına cevap verebilme ve pazara daha yakın olma kabiliyeti güçlenir. Esneklik, günümüzde revaçta olmasına karşın üretimde ulaşılması istenen amaçlar arasında en az anlaşılanıdır ve farklı yöneticiler esnekliği değişik anlamlarda kullanmaktadır [95, 96].

Esnekliğin üretim ortamındaki yorumu üretimin karmaşık yapısı nedeni ile oldukça zordur. Esneklik üretim organizasyonun değişik seviyelerine uygulanabilir ve bir seviyedeki esneklik içinde bulunduğu ortamda anlam kazanır. Bu seviyeler aşağıdaki gibi sıralanabilir [97]:

- Makinalar veya üretim sistemleri.
- Kesme veya montaj gibi üretim fonksiyonları.
- Tek bir ürün veya benzer ürünlerin oluşturduğu guruplara ait üretim işlemleri.
- Fabrika.
- Şirket bünyesindeki tüm fabrikalar.

Slack [95,96], on adet faklı üretim organizasyonu üzerinde yaptığı çalışmada, değişik birim ve kademelerdeki yöneticilerin üretim esnekliği kavramını farklı şekillerde yorumladığını tespit etmiştir. Yöneticilerin genellikle dar bir bakış açısı ile sistem esnekliğinden çok makina esnekliğini dikkate aldıkları ifade edilmiştir. Ayrıca, yöneticilerin büyük bir kısmının işletmelerinin esneklik gereksinimi hakkında sınırlı bir görüşe sahip olduğu ve üretim esnekliğini tüm boyutları ile nadiren kavrayabildikleri belirtilmiştir.

Jaikumar [98], ABD ve Japonya'daki esnek üretim sistemleri üzerinde yaptığı araştırma ve karşılaştırmalar sonucu, ABD'de esnek üretim sistemlerini satın alan işletmelerin bu sistemleri iyi kullanamadığını ifade etmiştir. Japonya'da faal olan esnek üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında, ABD'deki benzer sistemlerin, birkaçı haricinde, esnekliğinin çok düşük düzeyde olduğu belirtilmiştir. Jaikumar [98] ABD'deki pahallı ve ileri teknoloji ürünü bu sistemlerin esneklik zafiyetinin, yönetimin esneklik kavramı yorumundaki yetersizliği ile ilgili olduğunu tespit etmiştir. Pahallı ve gelişmiş teknolojileri satın almanın esneklik için her zaman gerekli ve yeterli olmadığı; fakat yönetimin esneklik kavramlarını çok iyi uygulamasının ise esnekliğin sağlamasında çok önemli olduğu Jaikumar [98] ve Schonberger [30] tarafından belirtilmiştir.

Üretim esnekliğini kapsamlı bir yönetim hedefi anlamında inceleyen çalışmalar oldukça azdır. Zelenovic [99], Gerwin [100], Slack [101]ve diğer bazı araştırmacılar esnekliği değişik şekillerde sınıflandırmıştır. Bununla birlikte bir firmanın esneklik gereksinimini ve esneklik kapasitesini ölçen veya üretim sistemlerinin esnekliğini geliştirmek üzere gerekli değişim ile yatırımın değerlendirilmesini sağlayan tatmin edici bir yöntem henüz mevcut değildir [95,101].

Yeni mikro işlemci teknolojilerinin geliştirilmesi ile birlikte üretimde esneklik kavramı üretim sistemlerinin tasarımı, işletimi ve yönetimi için ana düşünce durumuna gelmiştir. Son yıllarda üretim esnekliği ile ilgili oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Üretimde esneklik ile ilgili yapılan çalışmaları ve araştırmaları inceleyen kapsamlı bir çalışma ise Sethi ve Sethi [102] tarafından sunulmuştur. Bu çalışmaların önemli bir kısmı değişik esneklik tiplerinin tanımı ve bu esneklik tiplerinin bir ya da daha çoğunun mevcut olduğu sistemlerin belirlenmesi ile ilgilidir. Bazı çalışmalar üretim esnekliğinin ölçümü ve değerlendirilmesi ile ilgilidir. Üretim stratejisinin önemli bir boyutu olan üretim esnekliğinin stratejik ve taktik yönleri bir kaç çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca, gerçek üretim sistemleri üzerinde yapılan bazı çalışmalar ile üretim esnekliğini inceleyen araştırmalar yapılmıştır. Esnekliğin karmaşık, çok boyutlu ve anlaşılması zor bir kavram olduğu bu çalışmalar tarafından belirlenmiş bir husustur [102].

3.2 Üretim Esnekliği Kavramı ve Önemi

Esneklik ile ilgili çalışmalar yeni değildir ve ekonomi ve organizasyon alanında son 75 yıldır esneklik konusu ilgi çekmektedir. Üretim sistemlerinin karmaşıklığı nedeni ile üretim esnekliğinin yorumu zordur ve üretim esnekliğinin incelenmesi son yıllarda çok önem kazanmıştır [102]. Esneklik üretim organizasyonu içinde farklı düzeylerde uygulama alanı bulmaktadır. Üretim esnekliği ile ilgili çalışmaların önemli bir kısmı çeşitli tiplerdeki esnekliğin tanımlanması ve bu esneklik tiplerinden bir ya da daha fazlasını yapılarında bulunduran sistemlerin incelenmesi ile ilgilidir. Yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı gibi esneklik çok boyutlu ve tanımı zor bir kavramdır. Pratik olarak üretim verimliliği ile pazara bağımlılık arasındaki karşıtlık esneklik olarak düşünülebilir [103]. Atelye tipi üretimin esnek fakat verimsiz olması ve Detroit tipi kitle üretimi [18] veya otomatik transfer hatlarının verimli olması ama esnek olmaması iki karşıt durumu ifade eder.

1970'lerin başlarında geliştirilen esnek üretim sistemleri ile birlikte kitle üretimindeki verimlilik çeşitli ürünlerin üretildiği parti üretiminde de sağlanabilir. Parti üretiminde verimlilik ölçek ekonomisi (İng: economies of scale) yerine kapsam ekonomisi (İng: economies of scope) tarafından belirlenir [104]. Orta hacimli ve orta

düzeyde farklı ürünler üreten sistemlerin verimliliği, genellikle bir ürünün üretiminden diğer bir ürünün üretimine geçişte ortaya çıkan hazırlık sürelerinin çok kısaltılması ya da tamamı ile yok edilmesi ile sağlanabilir.

Bir sistemin esnekliği değişik ortamlara uyum sağlayabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Esnek sistemler değişen bu koşullara uyum sağlayabilmek için değişme yeteneğinde olmalıdır. Üretimde esneklik ise farklı ürünleri kabul edilebilir bir kalite düzeyinde verimli olarak üretebilmek amacı ile üretim kaynaklarının yeniden düzenlenebilme yeteneğini ifade eder [102].

Jaıkumar [98] ile Goldhar ve Jelinek [104] üretimde esnekliğin daima belirli bir saha içinde kısıtlandığını belirtir. Bu kısıtlı saha ürün ve işlemlerin çeşitliliği tarafından belirlenmektedir. Ayrıca, üretim esnekliği ile ilgili olarak tanımlanması gereken başka sınırlamalar da vardır. Bu ek kısıtlamalar ise değişime cevap verebilme hızı ve maliyeti ile yeni yatırım yapmak için gereken düzey ve mevcut sistemin devre dışı kalma derecesi olarak belirtilebilir [102,105].

Esneklik değişen koşullara etkin bir şekilde cevap verebilme yeteneğidir [99]. Üretim Esnekliği gibi yönetsel bir kavramın kapsamını tam olarak belirleyebilecek bir metot yoktur. Belirsizlik ortamında bulunan sosyal sistemlerin esnekliği uyum amacı ile kullandığı varsayımından hareketle, üretim esnekliğinin kapsadığı alan 7 ayrı belirsizlik gurubuna ve ilgili esnekliklere göre aşağıdaki gibi incelenebilir [97]:

1. Tüketici eğilimlerindeki belirsizlik ve üretim sisteminin farklı ürünleri aynı zamanda üretebilme yeteneği anlamındaki karışım esnekliği (İng: mix flexibility).
2. Ürünlerin hayat çevrim sürelerinin belirsizliği sonucu, zaman içinde, bazı ürünlerin ürün karışımına katılması veya bazılarının ise karışımdan çıkarılması ile ilgili olarak üretim sisteminin ürün karışımındaki değişime cevap verebilme yeteneği anlamındaki geçiş esnekliği (İng: changeover flexibility). Örneğin elektronik devre kartlarında kullanılan elektronik yonga, kapasite, direnç gibi elektrik devre elemanlarının hayat çevrimi oldukça kısadır. Bu nedenle elektronik devre kart elemanları ile ilgili ürün karışımı oldukça belirsiz olup, nerede ise günlük olarak değişmektedir.

3. Standart ürünlerin ilk üretimi sırasında veya ürün hayat çevrimi boyunca özel müşteri isteklerindeki belirsizlik ve üretim sisteminin ürüne ait fonksiyonları değiştirebilme yeteneği anlamındaki değişiklik yapabilme esnekliği (İng: modification flexibility).
4. Makinaların üretim sırasında bozulma sürelerindeki belirsizlik veya talep dağılımındaki belirsizlik sebebi ile parçaların iş akış hatlarında değişiklik yapabilme yeteneği anlamındaki iş akışı esnekliği (İng: routing veya rerouting flexibility).
5. Müşteri toplam talep düzeyindeki belirsizlik ve toplam üretim düzeyinin kolayca değiştirebilme yeteneği anlamındaki hacim esnekliği (İng: volume flexibility).
6. Üretim sistemi malzeme girdisinin standartlara uygunluğu ile işleme toleranslarındaki belirsizlik ve üretilen parçaların boyut ve bileşimleri açısından kontrol edilemeyen değişimlere sistemin cevap verebilme yeteneği anlamındaki malzeme esnekliği (İng: material flexibility).
7. Ham madde dağıtımındaki belirsizlikler ile ilgili olarak değişik parçaların üretime alınma sırasının yeniden düzenlenebilme yeteneği anlamındaki sıralama esnekliği (İng: sequencing flexibility).

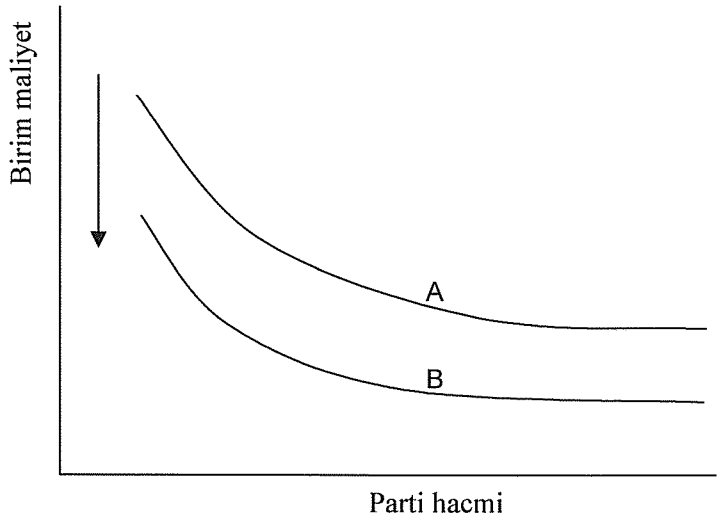
Son yıllarda üretim esnekliği çok önem kazanmıştır. Bunun nedeni öncelikle iki etkene bağlıdır. İlk olarak teknolojideki değişim hızının yüksek düzeylere ulaşması, ürün ve üretim işlemlerindeki belirsizliğin artmasına neden olmuştur. İkinci olarak artan rekabet sık sık ürün ve işlemlerdeki değişikliği gerektirmektedir. Örnek olarak, takım tezgahları sektöründe, daha geniş bir müşteri gurubuna açılmak üzere, firmalar sürekli olarak ürün karışımlarını değiştirmek ve üretim işlemlerinde değişiklik yapmak zorunda kalmaktadır. Slack [101], üretim esnekliğinin aşağıda belirtilen üç neden dolayısı ile önemli olduğunu ifade eder:

1. Üretim yapan işletmelerin içinde faaliyet gösterdiği çevrenin kararsızlığı ve geleceği tahmin etmenin zorluğu nedeni ile bu işletmelerin esnekliği sağlayacak şekilde üretim sistemlerini yeniden organize etme gereksinimi.
2. Esnek üretim sistemleri ve robotik uygulamaları gibi üretim teknolojisindeki gelişmeler üretim donanımlarındaki esneklik özelliğinin önemini ifade eder.

3. Üretim yönetimi amaçlarının doğası ile ilgili son gelişmeler, maliyet ve üretkenlik ile birlikte üretim sistemleri esnekliğinin de üretim hedefleri arasında önem kazanmasına neden olmuştur.

Üretim esnekliği firmaların rekabet gücü üzerinde çok etkilidir. Üretim esnekliğinin bu derece önem kazanması ise esnekliğin firma stratejisinin önemli bir parçası olmasını gerektirir. Esneklik fiyat, kalite, güven ve üretkenlik ile birlikte firma stratejisinin bir diğer boyutu olarak kabul edilebilir [101,102]. Günümüzdeki dinamik ve rekabetçi ortamda etkin olarak faaliyet gösterebilen organizasyonlar için üretim esnekliğine sahip olmak hayati derecede önemlidir. Bu durum son 15-20 yılda esneklik üzerinde yapılan çalışma sayısındaki artışın da nedenini açıklamaktadır. 1950'ler ve 1960'larda kapsamlı olarak uygulanan kütle üretimine karşılık son 20-30 yılda esnek ve küçük parti üretimine doğru bir yönelim oluşmuştur. Parti tipi üretim ve atelye tipi üretim toplam üretim faaliyeti içinde önemli bir yere sahiptir. Üretilen parçaların en az % 75 gibi bir kısmının 50 ya da daha az sayıda parçadan oluşan partiler şeklinde imal edildiği belirlenmiştir [18]. Dolayısı ile üretim sistemlerinin işlevsel açıdan verimli olması kadar belirli derecede esnek olması da oldukça önemlidir.

Hücresel üretimde üretim esnekliğinin gerçekleştirilmesi ile birlikte çok çeşitli ürünlerin üretildiği parti üretimi, birkaç çeşit ürünün üretilebildiği kütlesel üretimdeki verimliliği sağlayabilecektir. Kısaltılan çevrim ve hazırlık süreleri ile üretim esnekliğinin geliştirilmesi sonucu hücresel üretim ve esnek üretim sistemlerinin uygulamadaki önemi gittikçe artmaktadır. Gelecekteki endüstriyel değişimin yönü maliyet eğrisinin Şekil 3.1 'deki gibi A dan B ye değişimi şeklindedir. Operasyon esnekliği gereksinimi ufak parti hacimli üretim maliyetinin düşürülmesini gerektirmektedir. Esneklik ve maliyet birlikte değerlendirildiğinde atelye tipi üretimden hücresel üretime geçiş oldukça zor bir karar sürecini gerektirir.



Şekil 3.1 : Gelecekteki endüstriyel değişimin maliyet eğrisi

3.3. Üretim Esnekliğinin Çeşitleri ve Ölçülmesi

Değişik ortamlarda mevcut olan esneklikler esneklik tiplerini oluşturur. Bu esneklik tipleri bir makinaya, makinaların bir sistem oluşturmak üzere birbirleri ile bağlanma şekline veya kontrol stratejisi uygulama parametrelerine ait özellikleri ifade eder. Ayrıca esneklik tipleri karışım esnekliği gibi ürünlere ait özelliklerle de ilgili olabilir. Değişik üretim esnekliği tiplerinin seviyelerine ait en iyi değerlerin belirlenmesi yönetim açısından önemlidir. Dolayısı ile rekabet ortamında başarı sağlayabilmek için değişik esneklik tiplerinin yönetimin tarafından belirlenebilmesi ve ölçülebilmesi gerekir [97].

Üretim esnekliğinin üretim yönetimindeki önemi artmaktadır. Ürünlerin teknik özelliklerinin sürekli geliştirilmesi ve değişik müşteri isteklerine çabuk cevap verilebilmesini gerektiren değişen rekabet koşulları sonucu üretim esnekliği gereksinimi önem kazanmaktadır. Programlanabilir otomasyon sayesinde esnek yeteneği artmaktadır. Bilgisayar ve benzeri diğer donanımlar değişik esneklik uygulamaları için kullanılabilir. Fakat üretim yönetimindeki esneklik kavramının anlamı hakkında bilinenler oldukça azdır. Bunun bir nedeni de esneklik ölçüm yöntemlerinin yetersiz olmasıdır [97].

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda değişik üretim esnekliği tipleri için en az 50 değişik terim kullanılmıştır. Genellikle, aynı esneklik tipi farklı terimler ile ifade edilmiştir. Bu terimlerin tanımları daima tam değildir ve bazen aynı terim farklı esneklik tiplerini tanımlamak için kullanılmıştır. Üretim esnekliği kavramlarına açıklık kazandırma ve esneklik düzeyinin en iyi değerini belirleme amacına yönelik ayrıntılı analitik modellerin geliştirilmesi için yeterli çalışmalar yapılmamıştır [95]. Dolayısı ile yapılan çalışmalarda önerilen üretim esnekliği ölçütleri yetersiz ve bazen de keyfi niteliktedir [102].

Üretim esnekliği için tek bir ölçüt yoktur ve araştırmacılar esneklik için kesin bir nicel ölçüt geliştirememiştir. Üretim sistemlerinde esnekliğin ölçülmesi aşağıda belirtilen üç neden dolayısı ile zordur [101]:

1. Esneklik ölçütü performanstan daha çok potansiyelin ölçülmesi ile ilgilidir.
2. Üretim esnekliğinin ölçülmesi için ürünün özellikleri, kalite, üretim hacmi ve dağıtım gibi değişik üretim hedeflerine uygulanan çok yönlü bir ölçüm gereklidir.
3. Üretim esnekliği kapsam, maliyet ve zamandan oluşan üç boylu bir kavramdır.

Yukarıdaki nedenler ile üretim sistemlerinin esnekliğini ölçmek kolay değildir. Bir açıdan esnek olan bir sistem bir diğer açıdan oldukça katı olabilir. Dolayısı ile üretim esnekliğinin için tek bir ölçüt türetmek yerine aşağıdaki hususları belirleyen bir yöntemin geliştirilmesi daha uygun olabilir [101]:

1. Bir üretim sistemine ait karşılanması gereken yeni talepler ile ilgili önemli esneklik tiplerini değerlendirmek.
2. Sistemin yeni talepler karşısındaki cevap yeteneğini değerlendirmek.
3. Sistemin yeni talepleri karşılamakta yetersiz olduğu noktaları belirlemek.
4. İlave esneklik sağlanması için gerekli yöntem ve maliyetlerin belirlenmesi.

Sethi ve Sethi [102] üretimde esneklik alanında yapılmış olan pek çok çalışma ve araştırmayı topluca incelemiştir. Araştırmacıların yaptığı bu çalışmada üretimde esnekliğin temelini oluşturan ekonomi ve organizasyon teorisindeki esneklik ile ilgili klasik çalışmalar kısaca sunulmuştur. Üretim esnekliği tipleri ile bunların amaçları, gerçekleştirilme araçları ve seviyelerinin olası ölçüm yöntemleri özellikle incelenmiştir. Değişik üretim esnekliği tipleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Bu

esneklik tiplerine ait değişik ampirik çalışmalar ile analitik ve/veya optimizasyon modelleri belirtilmiş ve kısaca incelenmiştir. Ayrıca, bu araştırmacılar üretim esnekliğinin anlaşılması zor bir yapıya sahip olduğunu özellikle ifade etmiştir [102].

Çeşitli araştırmalardaki esneklik kavramlarının incelenmesi sonucu Sethi ve Sethi [102] tarafından tanımlanan farklı 11 üretim esnekliği tipi bu bölümün takip eden kısımlarında incelenmektedir. Üretim esnekliği çeşitlerine ait değişik çalışmalarda kullanılan terimler, yukarıda da belirtildiği gibi, standart olmadığı için Sethi ve Sethi [102] tarafından önerilen üretim esnekliği tipleri ve tanımları bazı çalışmalara göre farklı olabilir. Ayrıca, Sethi ve Sethi [102] tanımladığı bu üretim esnekliği tiplerinin işlemsel ve stratejik amaçlarını, gerçekleştirilme yöntemlerini ve ölçüm yöntemlerini de incelemiştir.

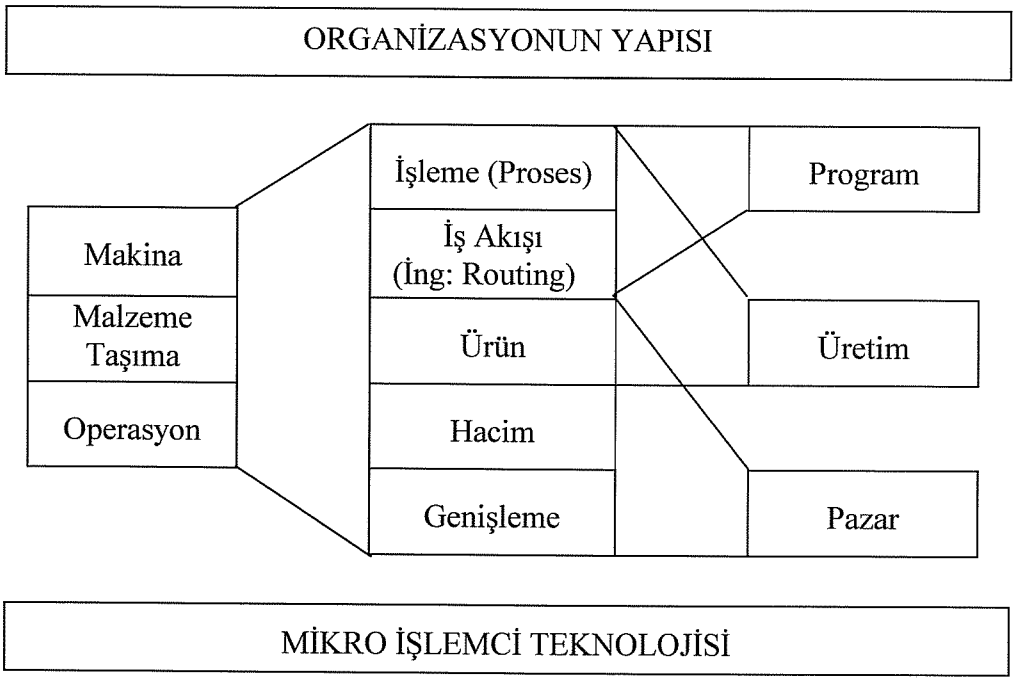
Sethi ve Sethi [102] üç grup altında toplanabilen 11 ayrı tipte üretim esnekliği tanımlar (Şekil 3.2.) ve bu esneklik tipleri aşağıdaki gibidir:

Grup I : Eleman esneklikleri ya da temel esneklikler
- Makina esnekliği
- Malzeme taşıma sistemi esnekliği
- Operasyon (işlem) esnekliği

Grup II : Sistem esneklikleri
- Proses (işleme) esnekliği
- İş akışı esnekliği
- Ürün esnekliği
- Hacim esnekliği
- Genişleme esnekliği

Grup III : Bütünsel esneklikler
- Program esnekliği
- Üretim esnekliği
- Pazar esnekliği

Birinci gruptaki esneklikler sistemin önemli elemanları ile ilgili esnek tipleridir. İkinci ve üçüncü grup esneklikler ise sistemin tümüne uygulanan esnekliklerdir.



Şekil 3.2 : Üretim esnekliğinin çeşitleri ve aralarındaki ilişkiler

3.3.1. Makina Esnekliği

Makina esnekliği bir makinanın bir işlemden bir diğer işleme geçişi sırasında aşırı maliyet ve süre gerektirmeden gerçekleştirebileceği işlem tipleri ile ifade edilir. Sethi ve Sethi [102] makina esnekliği ölçütü için makina tarafından fazla çaba gerektirmeden gerçekleştirilebilecek farklı işlem adedi şeklinde bir tanım önermiştir. Brill ve Mandelbaum [106,107] ile Mandelbaum ve Brill [108] tek bir makinaya ait esnekliğin ölçümü için bir metot geliştirdi. Makina i nin gerçekleştirilecek amaçlar cümlesi T ye göre bağıl esnekliği aşağıdaki gibi ölçülür:

$$F_{i,T} = \frac{\sum_{j \in T} e_{ij} w_j}{\sum_{j \in T} w_j} \qquad (3.1)$$

burada:

e_{ij} : j amacını gerçekleştiren makina i nin verimliliği, $0 \leq e_{ij} \leq 1$

w_j : Amaç j nin önem derecesinin ağırlığı, $0 \leq w_j \leq 1$, $0 < \sum_{j \in T} w_j \leq 1$

$\overline{T}$: Tüm amaçlar kümesi, $\sum_{j \in \overline{T}} w_j = 1$

T : Tüm amaçlar kümesine ait herhangi bir amaçlar alt kümesi, $T \subseteq \overline{T}$

Esnekliğin makina grupları için ölçümü ise iyimser ve kötümser ölçümlerin kombinasyonu ile ifade edilir. İyimser ölçüm, her bir amaç için maksimum verimlilik veya en iyi makina değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanır ve makinaların işlere en iyi dağıtımının gerçekleştirildiği kabulüne dayanır. Amaçlar alt cümlesi ile ilgili makina gurubunun kötümser esneklik ölçümü ise amacı gerçekleştiren en düşük verimli makina tahsisi kabul ederek hesaplanır. Bu ölçümlerin kullanılmasındaki temel düşünce hız, hazırlık süresi, kalite ve amacı gerçekleştirmenin maliyeti gibi makina karakteristiklerini yansıtan verimlilik ölçütlerini tanımlamaktır [102].

Makina esnekliğinin diğer bir ölçüsü ise bir işlemden diğer bir işleme geçişin zaman ve/veya maliyet terimleri ile ifade edilmesidir. Son ve Park [109],[110] makina esnekliğini makinaların hammaddeye kattığı değer veya belli bir süre içinde toplam çıktının makinanın boş kalma maliyetine oranı ile ifade eder. Diğer ölçütler ise makinada işlenebilecek hammaddenin ana boyut ve metalürjik özelliklerindeki çeşitlilik [97] veya yeni ürünlerin üretime alınması neticesinde makinanın ekonomik ve teknolojik değerini yitirmesi ile ilgilidir [105].

3.3.2. Malzeme Taşıma Esnekliği

Bir malzeme taşıma sisteminin esnekliği farklı parça tiplerinin uygun konumlar ve işlemler için verimli olarak taşınması yeteneği ile tanımlıdır. Esnek malzeme taşıma sistemleri makina kullanım oranını yükseltir ve akış süresini azaltır. Malzeme taşımada esneklik çatallı istifleme araçları ve itilerek sürülen arabalar ile uygun işyeri düzenlemesi sayesinde gerçekleştirilebilir. Yüksek seviyede otomasyona sahip sistemlerde otomatik kılavuzlu araçlar (OKA), robotlar ve makina bozulmaları ve darboğazların oluşması durumunda parçaları seçenek taşıma hatlarına yollayan bilgisayar kontrolu sayesinde malzeme taşıma esnekliği sağlanabilir. Bir üretim

sistemindeki malzeme taşıma sisteminin esnekliği; bu sistemin mevcut taşıma hatları sayısının, ideal bir sistemdeki mevcut hat sayısına oranı şeklinde tanımlanabilir. Bu oran ile belirlenen malzeme taşıma esnekliği ölçütü, iş akışı esnekliği gibi üretim esneklikleri üzerinde kısıtlar oluşturabilir [102,111].

3.3.3. Operasyon (İşlem) Esnekliği

Bir parçanın operasyon esnekliği bu parçanın farklı şekillerde üretilebilmesi olanağı ile ifade edilebilir. Operasyon esnekliği parçaya ait bir özelliktir ve bir parçanın seçenek işlem planları vasıtası ile üretilebilme olanağını ifade eder. İşlem planı parçayı üretebilmek için gerekli operasyonların sıralarını belirtir. Seçenek işlem planı ise bir parçaya ait bazı operasyonların diğer operasyonlar ile değiştirilmesi yolu ile oluşturulur. Bir üretim sisteminde üretilen parçalar operasyon esnekliğine sahip ve malzeme taşıma sistemi de bu parçaları ilgili makinalara farklı sıralarda dağıtabilme yeteneğinde ise bu üretim sisteminin operasyon esnekliği mevcuttur. Bir parçaya ait operasyon esnekliği ölçütü bu parçanın üretiminde kullanılabilecek farklı proses planı sayısı ile ifade edilebilir [102].

3.3.4. Proses (İşleme) Esnekliği

Bir üretim sisteminin proses esnekliği, sistem içinde uzun hazırlık süreleri gerektirmeden üretilebilen parça tiplerinin oluşturduğu grup ile ifade edilir. Proses (işleme) esnekliği makinaların esnekliğine, parçaların operasyon (işlem) esnekliğine ve malzeme taşıma sisteminin esnekliğine bağlıdır. Bu esneklik tipi için kullanılan bir diğer terim ise karışım esnekliğidir [100]. Eğer bir sistemin üretim maliyetleri geniş bir alanda değişen ürün karışımları için oldukça kararlı ise bu sistem proses esnekliğine sahiptir [102].

Proses (işleme) esnekliği ölçütü için sistemin çok uzun hazırlık süreleri gerektirmeden üretebileceği parça tiplerinin oluşturduğu grubun hacmi kullanılabilir. Parça tiplerinin oluşturduğu grubun belirlenmesi için grup teknolojisi kavramları kullanılabilir. Eğer parça tipleri sayılabilir nitelikte ise grup hacmi değişik parça tipi sayısı ile ifade edilebilir ve eğer parça tiplerini sayma olanağı yok ise parçaların boyut ve şekillerinin dağılım alanı grup hacmi için kullanılabilir [97, 98]. Belirli bir

zaman dilimi içindeki toplam çıktı maliyetinin toplam bekleme maliyetine oranı ise Son ve Park [109] tarafından proses esnekliğinin ölçümü için önerilmiştir.

3.3.5. Ürün Esnekliği

Mevcut parçalara yeni parçaları kolaylıkla ilave edip çıkarabilme kolaylığı ile ifade edilebilir. Ürün esnekliği üretilen mevcut parça karışımının ucuz ve kolay olarak değiştirilebilmesi ile ilgilidir. Ayrıca, yeni parçaların ilavesi ile hazırlık sürelerinde değişim gerebileceği de dikkate alınmalıdır. Ürün esnekliği ile proses ya da işlem esnekliği arasındaki fark bu noktada ortaya çıkmaktadır. Ürün esnekliği için gerekli olan hazırlık süresi aşırı miktarda zaman ve maliyet gerektirmez. Ürün esnekliği makina esnekliği, işlem esnekliği, bilgisayar destekli tasarım (BDT, İng: computer aided design, CAD) ve bilgisayar bütünleşik üretim (BBÜ, İng: computer integrated manufacturing, CIM) arasındaki verimli etkileşim ve grup teknolojisi organizasyon düzeyinin iyi olması gibi faktörlere bağlıdır [102].

Zelenovic [99] ürün esnekliği ölçütünü bir parça karışımından diğer parça karışımına geçiş için gerekli zaman ve maliyet şeklinde tanımlamıştır. Son ve Park [109] ise ürün esnekliğinin bir zaman dilimi içindeki toplam çıktı maliyetinin hazırlık süresi maliyetine oranı ile ölçülmesini önermiştir. Jaikumar [98] ve Gerwin [97] bir yıl içinde üretime alınan yeni ürün adedini ürün esnekliği ölçütü olarak tanımlamıştır.

3.3.6. İş Akışı Esnekliği

Bir üretim sisteminin iş akışı esnekliği seçenek iş akış hatlarının kullanılarak parçaların üretilebilmesi yeteneğini ifade eder. Bu tanım Gerwin [97, 100] tarafından yapılan tanımın benzeridir. İş akışı esnekliği parçaların makinalara dinamik olarak atanabilmesi ile ilgilidir ve bir parçaya ait seçenek iş akış hatlarının oluşturulması için farklı makinalar, farklı işlemler (İng: operations) veya farklı işlem sıraları kullanılabilir. Torna ile freze ya da farklı markalara sahip iki taşlama tezgahı gibi farklı makinalar, aynı işlemleri gerçekleştirebilme yeteneğine sahip farklı makinalara örnek olarak gösterilebilir. İş akışı esnekliği ile işleme (İng: process) esnekliği farklı kavramlardır, çünkü iş akışı esnekliği sisteme ait bir özelliktir ve işleme esnekliği ise parçaya ait bir özelliktir. Belirli tek bir işlem (operasyon) sırasına sahip bir parçanın

operasyon esnekliği yoktur; fakat bu parça, operasyon esnekliği olmasa bile, sistem içindeki farklı iş akış hatlarını kullanmak sureti ile işlenebilir. İş akışı esnekliği makina yüklerinin dengelenmesi ve parçaların etkin olarak çizelgelenmesini sağlar. Eğer sistem iş akışı esnekliğine sahip ise; makina bozulmaları, takım sipariş gecikmesi, hatalı parça üretimi ve acil parçaların üretime alınma zorunluluğu gibi beklenmedik durumlarda, daha düşük sayıda olsa bile, belirli parça tiplerinin üretimi sürdürülebilir. Çok amaçlı makinaların, benzer üretim kapasitesine sahip makinaların ve/veya eşdeğer makinaların mevcudiyeti ile malzeme taşıma sisteminin çok yönlü olması, iş akışı esnekliğini arttıran etmenlerdir. Yapılan çeşitli araştırma ve çalışmalarda iş akışı esnekliğinin ölçümü için bazı ölçütler geliştirilmiştir. Bir parça tipinin üretimi için sistemde mevcut olası seçenek adedi ortalaması bu ölçümlere bir örnek olarak verilebilir [102].

3.3.7. Hacim Esnekliği

Bir üretim sisteminin hacim esnekliği, bu sistemin farklı üretim hacimlerinde karlı bir şekilde işletilebilmesi ile ifade edilebilir [102]. Bu tanım Gerwin [100] tarafından yapılan tanıma benzemektedir. Talep düzeyindeki belirsizlik, pazar payının arttırılması ve korunması zorunluluğunu gerektirir. Hacim esnekliği üretimin geniş bir aralıkta arttırılması ve düşürülebilmesini sağlar. Cevap hızı ile değişim aralığı hacim esnekliğinin belirlenmesindeki iki önemli özelliktir. Cevap hızı kısa dönemdeki ve değişim aralığı ise uzun dönemdeki hacim esnekliği için önemlidir. Hacim esnekliğinin yukarıdaki tanımı Son ve Park [109] tarafından verilen talep esnekliği tanımına benzemektedir. Ayrıca, hacim esnekliği Slack'ın [101] planlanan teslim tarihlerini değiştirebilme yeteneği anlamındaki dağıtım esnekliği ile de ilgilidir.

Hacim esnekliği ölçütü sistemin karlı bir şekilde işletilmesi şartı ile tüm parçaların belirlediği en düşük üretim hacmi şeklinde tanımlanabilir. Bu tanım en düşük üretim hacmi ile kısıtlıdır. Daha genel bir hacim esnekliği ölçütü tanımı, işletmenin karlı olarak faaliyet gösterebildiği üretim hacimleri tarafından belirlenen saha şeklindedir [102]. Belli bir zaman dilimi içindeki üretim hacminde gözlenen dalgalanma ortalama değerinin üretim kapasitesinin sınır değerine oranı ile ifade edilen hacim esnekliği ölçütü tanımı Gerwin [97] tarafından verilmiştir. Ayrıca, belirli bir

dönemdeki toplam çıktı maliyetinin bitmiş ürün ve ham madde stok maliyetine oranı ile belirlenen hacim esnekliği ölçütü ise Son ve Park [109] tarafından önerilmiştir.

3.3.8. Genişleme Esnekliği

Bir üretim sisteminin genişleme esnekliği, gerektiğinde sistem kapasite ve yeteneğinin kolaylıkla arttırılabilmesi olarak tanımlanır [102]. Kapasite birim zamandaki çıktı ile ifade edilir. Sistem yeteneği ise kalite, teknolojik durum ve diğer tipteki esneklikler ile ilgili olan özellikler şeklinde tanımlanır. Hacim esnekliğinin aksine, genişleme esnekliği gerçeklenebilecek maksimum çıktı seviyesi ile belirlenen kapasite düzeyi ile ilgilidir. Genişleme esnekliği ile ilgili diğer bir kavram da Zelenovic [99] tarafından önerilen tasarım esnekliği kavramıdır. Genişleme esnekliği kavramı sistemin küçülebilme yeteneğini de kapsayabilir. Genişleme sırasında sistemin adım adım uyum sağlamasına olanak sağlayan genişleme esnekliği yeni pazarlara giriş gibi büyüme stratejileri güden işletmeler için oldukça önemlidir. Hacim esnekliği ise mevcut pazardaki pay ve karlılığın korunması gibi mevcut durumun korunmasına yönelik stratejilere hizmet eder.

Genişleme esnekliği ufak üretim birimlerinin kurulması, modüler esnek hücrelerin oluşturulması, büyümeyi taşıyabilecek altyapının kurulması ve çok amaçlı makinaların satın alınması gibi yöntemler ile sağlanabilir [102]. Genişleme esnekliği belirli bir süre içinde ek kapasite yaratma çaba ve maliyeti olarak ölçülebilir. Ayrıca genişleme esnekliği ölçütü bir sistemin çıktı miktarını iki katına çıkarma maliyetinin mevcut sistem maliyetine oranı şeklinde de tanımlanabilir. Bir diğer ölçüt ise sistemin erişebileceği en büyük boyut şeklinde ifade edilebilir [102]. Gerçek sistemden uzun dönemde beklenen karın ideal kara yaklaşma derecesi genişleme esnekliği ölçütü için aşağıdaki ifade ile belirtildiği gibi kullanılabilir [102]:

$$G_e = \frac{B - S}{I - S} \qquad (0 \leq G_e \leq 1) \tag{3.2}$$

Buradaki terimlerin anlamı şunlardır:

G_e : Genişleme esnekliği.

B : Gerçek sistemden uzun dönemde beklenen kar.

S : Genişleme esnekliği olmaması durumu için sistemden uzun dönemde beklenen kar.

I : İdeal sistemden uzun dönemde beklenen kar.

3.3.9. Program Esnekliği

Program esnekliği bir üretim sistemin yeterince uzun süre kendi kendine ve insanlar tarafından bir müdahale yapılmasını gerektirmeden çalışabilmesi yeteneği ile ifade edilir [102]. Bu tanımdaki yeterince uzun süre ifadesinin uygulamadaki en uygun karşılığı ikinci ve üçüncü vardiyanın kapsadığı zaman dilimidir. Program esnekliği Zelenovic [99] tarafından ifade edilen uyum veya adaptasyon esnekliğini de kapsamaktadır. Program esnekliği gereği hazırlık sürelerinin azaltılması, kalite kontrol ve ölçme yönteminin iyileştirilmesi ile daha iyi takım ve tertibat kullanımı sonucu akış sürelerinde kısalma sağlanır. İnsan müdahalesini gerektirmeden çalışabilme özelliği sistemin etkin kapasitesini arttırır. Program esnekliği, proses ve iş akışı esnekliği ile takım kırılmaları ve parça akışındaki tıkanıklık gibi beklenmedik sorunların algılayıcılar ve bilgisayar kontrolu yardımı ile belirlenebilmesi ve giderilebilmesi yeteneğine bağlıdır. Sethi ve Sethi [102] program esnekliğinin ikinci ve üçüncü vardiyalarda sistemin kesintisiz çalışabilme yüzdesi ile ölçülebileceğini ifade eder.

3.3.10. Üretim Esnekliği

Üretim esnekliği çok pahallı yatırım donanımı ilavesine ihtiyaç olmaksızın üretim sistemi tarafından üretilebilecek parça tipi adedi ile ifade edilir [102]. Ürün esnekliğinden farklı olarak, üretim esnekliği uzun hazırlık süreleri gerektirebilir, fakat pahallı yatırım donanımı ilavesini gerektiremez. Bir diğer anlamda, üretim esnekliği mevcut ve ileride üretilebilecek potansiyel parçaları belirler. Slack [101] ürün esnekliğini cevap esnekliği ve üretim esnekliğini ise saha veya alan esnekliği olarak tanımlar. Ürün esnekliği işlemelerin sık sık yeni ürünlere talep olan pazar ortamında faaliyet gösterebilmelerini sağlar. Üretim esnekliği ise yeni ürün tasarımı ya da mevcut ürünlerde önemli değişiklikler yapmak için gerekli sürenin en aza indirilmesini sağlar. Üretim esnekliğinin sistem işletim düzeyindeki etkisi ile parça

ailelerinde artış sağlanabilir. Makinaların çok çeşitte ve çok amaçlı olması, malzeme taşıma sisteminin esneklik düzeyi ile fabrikadaki iletişim ve kontrol sisteminin seviyesi gibi özellikler üretim esnekliği üzerinde oldukça etkilidir. Dolayısı ile üretim esnekliği makinaların ve malzeme taşıma sistemlerinin esneklik düzeylerine oldukça bağlıdır. Üretim esnekliği ölçütü için sistemde üretilebilecek parça miktarı kullanılabilir [102].

3.3.11. Pazar Esnekliği

Pazar esnekliği bir üretim sisteminin değişen pazar koşullarına uyum sağlayabilme kolaylığı ve yeteneği ile ifade edilir [102]. Bu kavram üretimde pazarın rolünü vurgulamaktadır. Hızlı değişen pazar ortamında, üretim ve pazarlama arasındaki ilişki ve etkileşim önem kazanmaktadır. Bir üretim sisteminin pazar esnekliği üretim ve program esnekliğini tamamlar. Pazar esnekliği ölçütü ise yeni bir ürünün üretilmesi, üretim hacminin belli miktarda arttırılması veya azaltılması ve birim kapasite ilavesi için gerekli zaman ve maliyetin ağarlıklı ortalaması ile ifade edilebilir [102].

3.3.12. Üretim Esnekliğinin Çeşitleri Alanındaki Diğer Yaklaşımlar

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda değişik üretim esnekliği tipleri için en az 50 değişik terim kullanılmıştır. Genellikle, aynı esneklik tipi farklı terimler ile ifade edilmiştir. Bu terimlerin tanımları daima tam değildir ve bazen aynı terim farklı esneklik tiplerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bu kısımda değişik araştırmacılar tarafından kullanılan esneklik tipleri sunulmaktadır.

Müşteri hizmetlerine yönelik amaçlar kapsamında aşağıda belirtilen standart çıktı düzeylerinin ve ilgili esneklik tiplerinin sağlanması gerektiği Slack [101] tarafından ifade edilmiştir:

1. Ürün özellikleri açısından, iyi bir tasarım ve işlev (performans) düzeyi ile ilgili esneklik : ürün esnekliği.
2. Ürün özellikleri açısından, iyi bir ürün karışım esnekliği ve düzeyi : karışım esnekliği.
3. Yeterli ve iyi bir kalite düzeyi ile ilgili esneklik : kalite esnekliği.

4. İyi bir çıktı hacim düzeyi ve ilgili esneklik : üretim hacmi esnekliği.
5. İyi ve zamanında bir dağıtım ile ilgili esneklik ve düzeyi : dağıtım esnekliği.

Bu sınıflandırmada belirtilen ve diğer birçok sınıflandırmalarda yer almayan yeni bir esneklik tipi olan kalite esnekliği ise planlanmış ürün kalitesini değiştirebilme yeteneği şeklinde tanımlanır. Bu beş esneklik çeşidi bir üretim sisteminin tümüne uygulanabilir. Ufak üretim birimleri, bir bölüm veya bir üretim donanımı için farklı bir esneklik tipleri listesi daha uygun olabilir [101]. Örneğin, Gerwin [100] esnek üretim sistemleri ile bilgisayar bütünleşik tasarım ve üretim için aşağıdaki esneklik tipleri listesini önermiştir:

1. Karışım esnekliği.
2. Parça esnekliği.
3. İş akışı esnekliği.
4. Tasarım değişikliği esnekliği.
5. Üretim hacmi esnekliği.

Parça esnekliği ve tasarım değişikliği esnekliği parçanın sahip olduğu yeni özelliklerin derecesine bağlıdır. Parça esnekliği yeni parçaların ürün karışımına ilave edilebilme yeteneği ile ilgilidir. Tasarım değişikliği esnekliği ise mevcut tasarımın üzerinde değişiklik yapılabilmesi ile ilgilidir [101].

Tempelmeier ve Kuhn [31] üretim esnekliğinin ana yönlerini açıklamak için değişik çalışmalarda belirtilen en önemli esneklik tiplerini aşağıdaki gibi sıralamıştır:

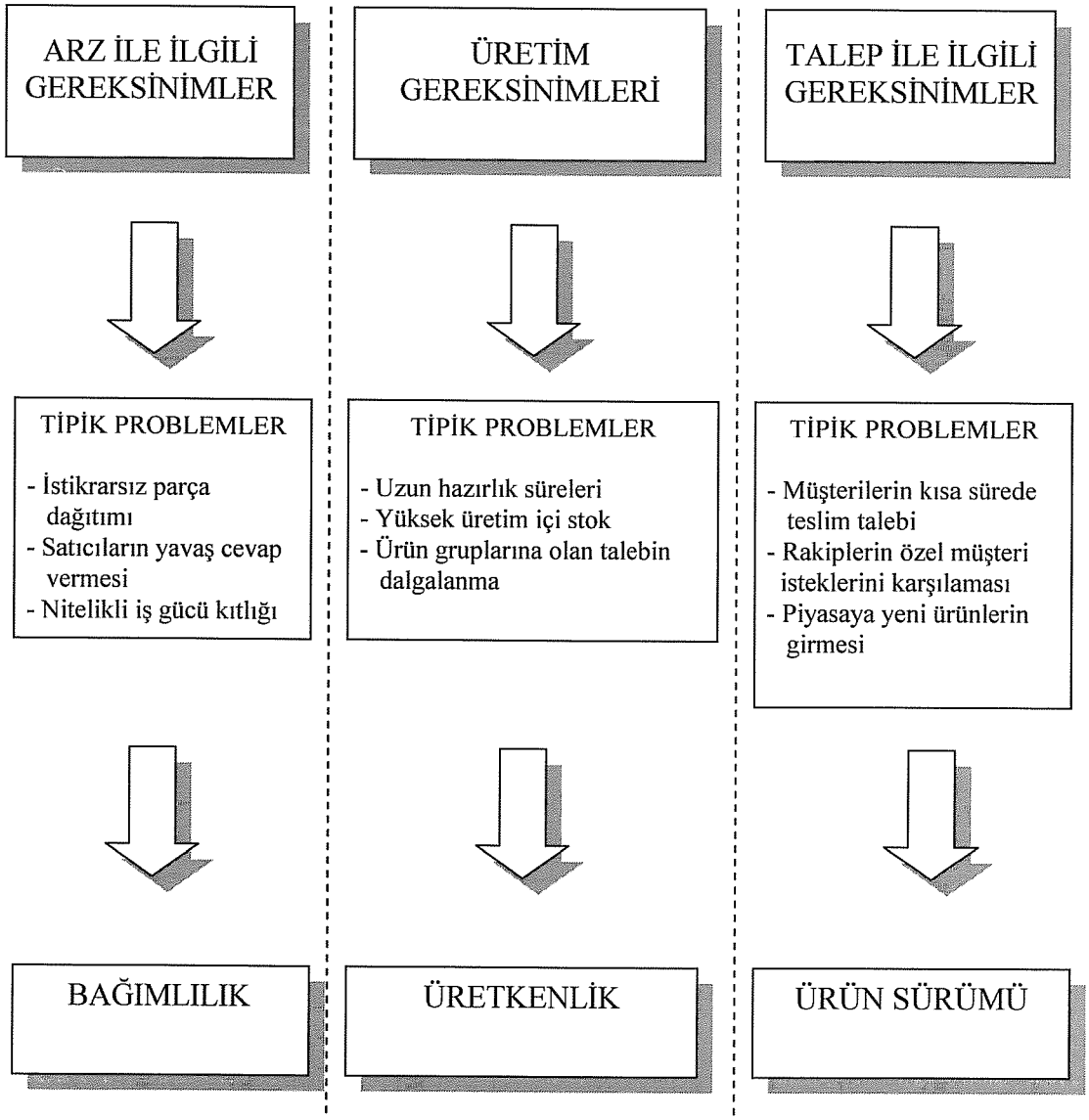
1. Makina esnekliği.
2. Malzeme taşıma esnekliği.
3. İşlem (operasyon) esnekliği.
4. Genişleme esnekliği.
5. Üretim esnekliği.
6. İşleme (proses) esnekliği.
7. İş akışı esnekliği.
8. Üretim hacmi esnekliği.

Makina, malzeme taşıma ve işlem (operasyon) esneklikleri sırası ile makinalara, malzeme taşıma sistemine ve iş parçalarına ait özellikleri ifade eder. Ayrıca, bu üç esneklik tipi sistemde kendileri ile ilgili olan tek bir elemanı dikkate alır. Diğer esneklik tipleri ise sisteme ait bir kaç elemanı aynı anda dikkate alır [31].

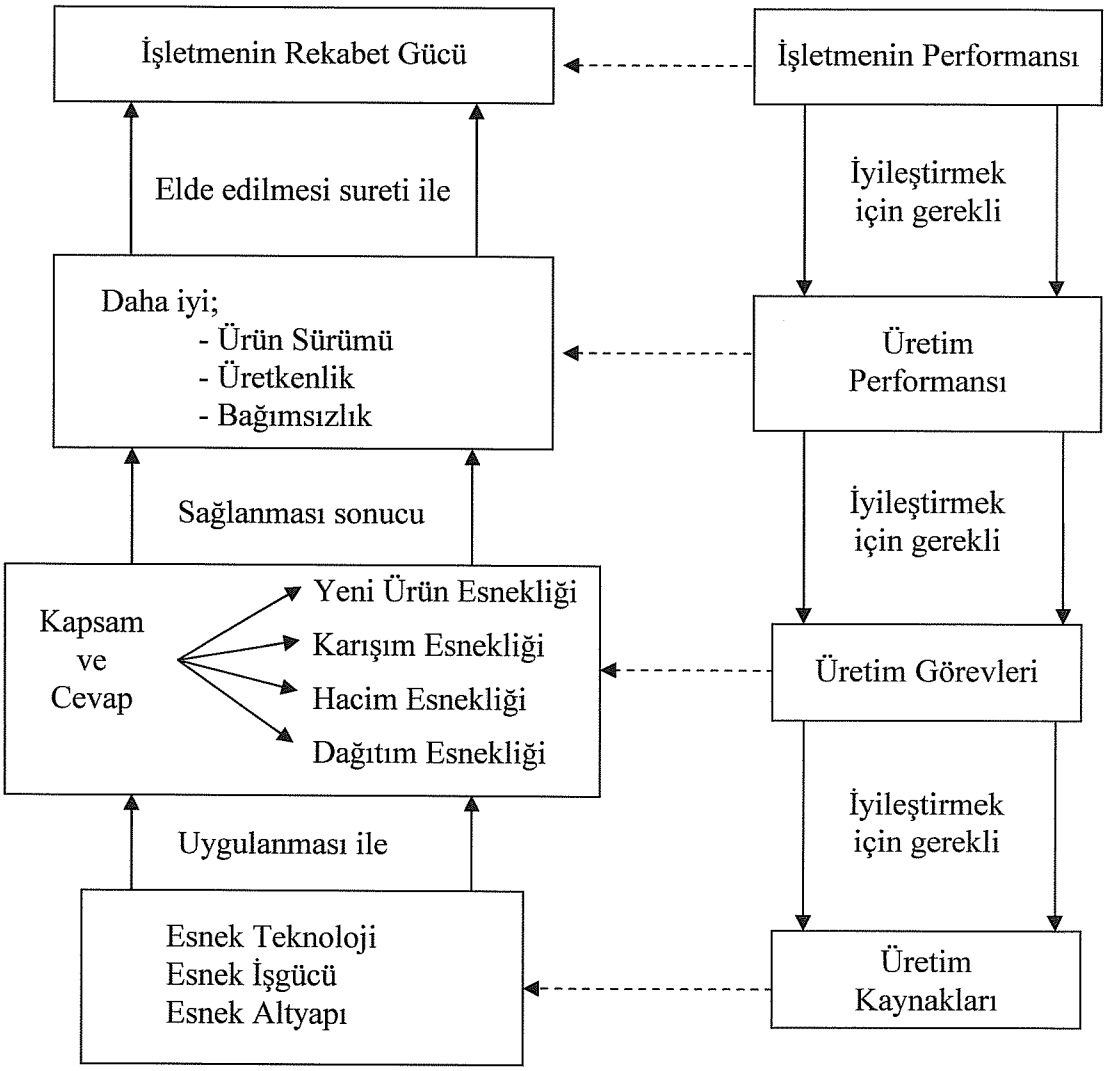
3.4. Üretim Esnekliğinin Hiyerarşik Yapısı ve Esneklik Tipleri Arasındaki İlişkiler

Değişik esneklik tipleri arasındaki ilişkiler Şekil 3.2 'de görülmektedir. Bu şekil tarafından da ifade edildiği gibi sistemin elemanlarının esnekliği sisteme ait değişik esneklik tiplerine katkıda bulunur. Bu yapı ise, dolaylı olarak, bütünsel esneklikleri etkilemektedir. Bu hiyerarşik ilişkilerin bir diğer işlevi ise, işletme stratejisinin sisteme ait esneklik tiplerini ve dolayısı ile elemanların esnekliklerini belirlemesidir. Ayrıca organizasyon yapısı ile mikro işlemci teknolojisinin üretim esnekliklerini belirleyen iki ana etmen olduğu da Şekil 3.2 'de ifade edilen diğer bir husustur [102].

Kısa ve uzun dönemdeki değişkenlik ve belirsizlikleri karşılamak için gerekli esneklikler ile bu esnekliklerin oluşturduğu benzer ve daha ayrıntılı bir hiyerarşik yapı ise Slack [95,96] tarafından verilmiştir. Slack [95,96] on adet farklı firma üzerinde yaptığı incelemeler sonucunda, üretim esnekliği gereksinimi ile ilgili problemleri Şekil 3.3 'de görüldüğü gibi ifade etmiş, değişik esneklik tiplerini tanımlamış ve üretim esnekliğinin hiyerarşik yapısını ise Şekil 3.4' deki gibi belirlemiştir. Bu çalışmalarda, kapsamlı olmamakla birlikte, geniş anlamdaki üretim esnekliğinin analizinde kullanılabilecek bir çerçeveyi geliştirmek için ampirik bir temelin oluşturulması amaçlanmış ve yöneticilerin üretim sistemi esnekliğini nasıl algıladığı incelenmiştir [95,96].



Şekil 3.3 : Üretim esnekliği gereksinimi ve ilgili faktörler



Şekil 3.4 : Üretim esnekliği hiyerarşisi

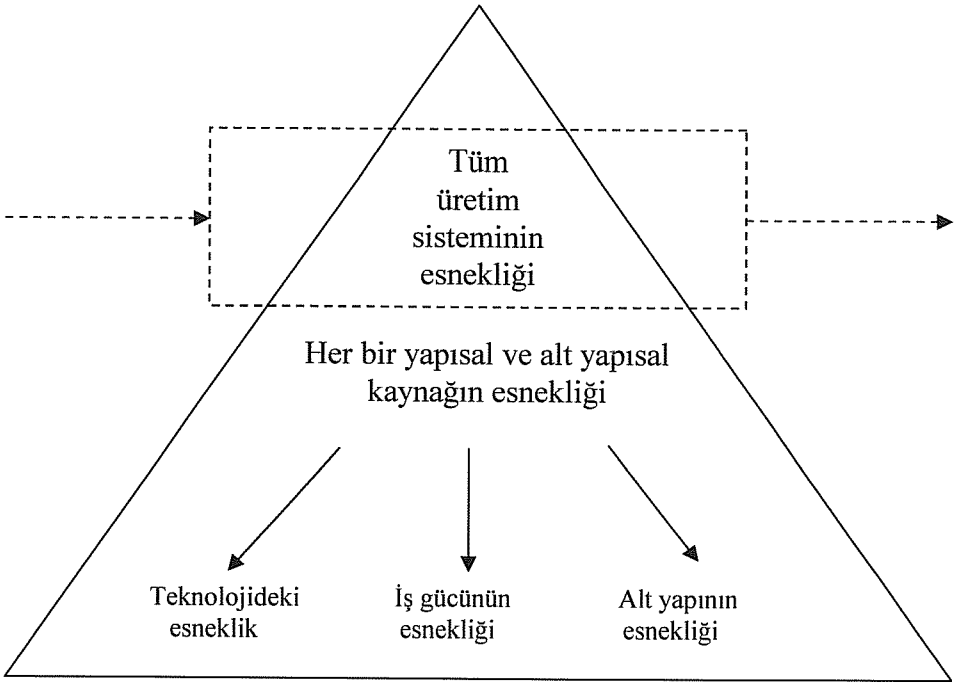
Esnekliğin değişik yönleri ile tiplerini ilişkilendiren bir modelin mevcut olmaması üretim esnekliği ile ilgili karmaşıklığın nedenidir. Dolayısı ile üretim esnekliği tiplerini ve ilgili fikirleri birbirine bağlayarak toplamak faydalıdır. Uygun bir çerçeve sağlamak amacı ile bir esneklik hiyerarşisi belirlenebilir. Kapsamlı üretim stratejisi üzerinde esnekliğin katkısı ile rolüne açıklık kazandırmak için bu hiyerarşik yapı kullanılabilir. Bu hiyerarşik yapıdaki ana yapı aşağıdaki gibi dört düzeyde düşünülebilir [95,96]:

- Üretim kaynakları düzeyi
- Üretim fonksiyonu tarafından yönetilen görevler düzeyi
- Üretim fonksiyonunun genel performans düzeyi
- Tüm firmanın rekabet performans düzeyi.

Slack [95,96] tarafından Şekil 3.4' deki gibi geliştirilmiş olan üretim esnekliği hiyerarşik yapısı ve ilgili esneklik tiplerinin tanımları bu kısımda açıklanmıştır. Üretim esnekliğinin hiyerarşik yapısına ait esneklik tipleri ise topluca aşağıdaki gibidir:

- Kaynak esnekliği
  - Yapısal esneklik
    - Esnek teknoloji
    - Esnek işgücü
  - Altyapısal esneklik
    - Tedarik enekliği
    - Kontrol esnekliği
- Üretim sistemi esnekliği
    - Ürün esnekliği
    - Karışım esnekliği
    - Üretim hacmi esnekliği
    - Dağıtım esnekliği
  - Üretim sistemi esnekliğinin boyutları
      - Kapsam esnekliği boyutu
      - Cevap esnekliği boyutu
- Üretim performansı
  - Bağımlılık
  - Üretkenlik
  - Ürün sürümü (mevcudiyet)

Kaynak esnekliği: Kaynak esnekliği üretim kaynaklarının esnekliği ile ilgilidir. Kaynakların esnekliği ile tüm sistemin esnekliği arasındaki ilişki ise Şekil 3.5' de görülmektedir. Kaynak esnekliği yapısal ve altyapısal esneklik olmak üzere iki gruba ayrılır. Kaynak esnekliği ile ilgili tüm kavramlar aşağıda açıklanmaktadır [95,96].



Şekil 3.5 : Kaynakların esnekliği ile tüm sistemin esnekliği arasındaki ilişki

Yapısal esneklik: Yapısal esneklik esnek teknoloji ve esnek işgücünden oluşmaktadır.

Esnek teknoloji: Olabildiğince değişik iş akış hatlarının ve işlemlerin sağlanabilmesi için makinaların ve makinalar arasındaki bağlantı hatlarının gerekli değişiklikleri hızla gerçekleştirebilme yeteneği şeklinde ifade edilir.

Esnek işgücü: Bölümler içinde veya bölümler arasında çalışabilme yeteneğine sahip işgücü, dolaylı ve dolaysız işgücü arasında değişim yapabilme olanağı ya da çalışan sayısını değiştirebilme yeteneği şeklinde ifade edilir.

Altyapısal esneklik: tedarik esnekliği ve kontrol esnekliği şeklindeki iki esneklik tipinden oluşur.

Tedarik esnekliği: Satın alma, insan kaynakları veya ürün tasarımı gibi alt sistemlerin esnekliğini ifade eder.

Kontrol esnekliği: Üretim hacmi, sipariş, makina yükleme, çizelgeleme veya kalite düzeyleri ile ilgili kontrol yapısının esnekliğini ifade eder.

Kaynak esnekliği üretim esnekliği için gereklidir. Kaynak esnekliği üretim esnekliği hiyerarşisi içinde stratejik üretim esnekliği düzeyinden oldukça uzakta bulunmaktadır. Üretim organizasyonları esnek kaynaklar sayesinde esnek olabilmesine karşın, kaynak esnekliği tek bir özellik şeklinde geçerli bir üretim hedefi olamaz. Diğer bir ifade ile kaynak esnekliği şirketin esneklik yeteneği üzerinde etkilidir, fakat tek başına şirket üretim esnekliği hedefini belirleyen bir ana etken olamaz [95,96].

Üretim sistemi esnekliği: Üretim esnekliği hiyerarşisinin üretim görevleri düzeyinde yer alır. Üretim görevleri düzeyindeki üretim sistemi esnekliği dört ana tip esneklik tarafından belirlenir. Ayrıca, üretim sistemi esnekliklerinin kapsam ve cevap esnekliği şeklinde iki farklı boyutu bulunmaktadır. Üretim sistemi esnekliği ile ilgili tüm bu kavramlar aşağıda açıklanmaktadır [95,96].

Ürün esnekliği: Yeni ürünleri üretilebilme ya da mevcut ürünler üzerinde değişiklik yapabilme yeteneği ile ifade edilir.

Karışım esnekliği: Üretilen parça çeşitlerinin kapsadığı alanı sınırlı bir zaman dilimi içinde değiştirebilme yeteneği şeklinde tanımlanır.

Üretim hacmi esnekliği: Üretim toplam çıktı miktarı düzeyini değiştirebilme yeteneği ile ifade edilir.

Dağıtım esnekliği: Planlanmış veya kabul edilen teslim tarihlerini değiştirebilme yeteneği olarak tanımlanır.

Bu esneklik tipleri Slack [101] tarafından daha önce oluşturulan esnek tiplerinin bir benzeridir. Daha önceki sınıflandırmada beş esneklik tipine olmasına karşın yukarıda dört esneklik tipi tanımlanmıştır ve eksik olan esneklik tipi ise aşağıda açıklanan kalite esnekliğidir. Kalite esnekliği planlanmış ürün kalitesini değiştirebilme yeteneği şeklinde ifade edilir.

Üretim sistemi esnekliğinin boyutları: Üretim sistemi esnekliklerinin kapsam ve cevap esnekliği şeklinde iki farklı boyutu bulunmaktadır [95,96].

Kapsam esnekliği: Üretim sistemi veya kaynaklarının gerçekleştirebileceği durumlara ait alanın büyüklüğü ya da sistem yeteneğinin sınırları ile ifade edilir.

Cevap esnekliği: Sistem yetenek sınırları içindeki değişimlerin zaman ve/veya maliyet açısından gerçekleştirilme kolaylığı şeklinde tanımlanır.

Kapsam ve cevap esnekliği arasındaki bu farkın belirlenmesi sonucu yöneticiler esneklik gereksinimini daha iyi ifade edebilecektir. Kapsam ve cevap esneklikleri arasındaki farkın açık olmadığı durumlarda yöneticiler esneklik konusunda çelişkiye düşebilirler. Örneğin, bir firmada kurulan yeni bir esnek üretim sistemi kısa iş akış süresi ve düşük üretim stoku gibi faydalar sağlamak sureti ile cevap esnekliğini iyileştirebilir. Fakat bu esnek üretim sistemi tarafından üretilebilen farklı boyutlardaki parça çeşitlerinin kapsadığı alan ise daralabilir. Bu durumda, pazarlama bölümü yöneticisi yeni esnek teknolojinin, yerini aldığı, eski atelye tipi üretim sistemine göre kapsam esnekliği bakımından daha az esnek olduğunu anlamakta zorluk çekebilir. Genelde cevap esnekliği kısa dönemli sorunlar ve kapsam esnekliği de uzun dönemli sorunlar ile ilgilidir [95,96].

Üretim performansı: Üretkenlik, kalite, ürün sürümü ve dağıtım güvenilirliği gibi performans ölçütleri pazar ile doğrudan ilgilidir. Esneklik ise bu performans ölçütlerine yaptığı katkı nedeni ile önemli bir özelliktir ve üretim performansının önemli üç bileşeni ise aşağıda açıklanmıştır [95,96].

Bağımlılık: Esneklik sistemi etkileyen beklenmedik bozucu etkilerin daha kolay karşılanabilmesini sağlar ve dolayısı ile sistemin güvenilirlik seviyesini yükseltir.

Üretkenlik: Esneklik kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar ve dolayısı ile üretim maliyetlerini azaltır.

Ürün sürümü (mevcudiyet): Esneklik ürün çeşitliliği ve teslim süresi bakımından pazardaki değişikliklere daha iyi cevap verilmesini sağlar.

Kapsam ve cevap esnekliği terimleri ile ölçülen yeni ürün esnekliği, karışım esnekliği, hacim esnekliği ve dağıtım esnekliği gibi dört tip üretim esnekliği; yapısal ve altyapısal kaynaklar tarafından, üretim görevleri düzeyinde, belirlenir. Bu dört alandaki esnekliğin iyileştirilmesi ise ürün sürümü (piyasadaki mevcudiyet), bağımsızlık ve üretkenlik anlamındaki üretim performansının iyileştirilmesini sağlar. İyileştirilmiş üretim performansı da işletmenin performans ve genel rekabet gücünü yükseltir [95,96].

Geliştirilen bu esneklik hiyerarşisi üzerinde, bir önceki paragrafta belirtildiği şekilde, yukarı yönde yapılan bir analiz iyileştirilmiş üretim kaynaklarının işletme rekabet gücü üzerindeki etkisinin ölçümünü sağlar. Seviyeler üzerinde aşağı yönde bir inceleme ise yeterli ve uygun esnekliğe sahip üretim kaynaklarının geliştirilmesini yönlendirmek için yardımcı olabilir. Dolayısı ile işletmenin rekabetteki yerinin seçilmesi sonucu ürün sürümü (piyasada mevcudiyet), bağımsızlık ve üretkenlik için gerekli seviyeler belirlenir. Hiyerarşik yapının bu şekilde aşağı yönde izlenmesi ile üretim görevlerine ait dört tip esneklik ve ilgili kapsam ve cevap özelliklerinin belirlenmesi sağlanır. Aşağı yöndeki bu incelemenin son adımında ise yeterli derecede esnek kaynakların geliştirilmesi için hedefler saptanır [95,96].

3.5. Üretim Esnekliği Alanındaki Diğer Çalışmaların İncelenmesi

Slack [95,96] üretim esnekliğinin önemi, doğası ve analizi üzerindeki tartışmalara açıklık kazandırabilmek için yaptığı iki çalışmasında aşağıdaki iki ana konuyu incelemiştir:

1. Üretim esnekliğinin yöneticiler tarafından algılanış şekli.
2. Üretim yapan organizasyonların esneklik gereksinimini analiz edebilmek ve ilgili esneklik kavramları arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir hiyerarşik yapının oluşturulması.

Slack [101] yaptığı diğer bir çalışmada esnekliğin doğası ile ilgili olarak aşağıdaki konuları incelemiştir:

1. Esnekliğin çeşitli üretim hedefleri içindeki konumu.
2. Esnekliğin üretim alanındaki anlamı.
3. Şirket üretim yönetimi ile ilgili görevler, karar alanları ve özelliklerin esnekliğin değişik yönleri üzerindeki etkisi.
4. Esnekliğin nasıl ölçülebileceği veya değerlendirilebileceği konusu.

Tempelmeier ve Kuhn [31] esnek üretim sistemi kavramını, az yatırım maliyeti ile amaçların çabuk değiştirilebildiği geleneksel atelye tipi üretim ve düşük birim maliyeti ile üretim kapasitesinin yüksek derecede kullanılmasını sağlayan akış tipi üretimin faydalı yönlerinin birleştirilmesi şeklinde ifade eder. Aynı araştırmacılar

esnek üretim sistemlerinin, sadece tasarımlandıkları ürün karışımının kapsadığı saha içinde esnek olduğunu belirtir.

Gupta ve Goyal [112] üretim esnekliğinin tanımlama şekli ile esnekliğin ölçümü için kullanılan yaklaşımlara göre yapılmış olan çalışmaların bir sınıflandırılmasını yapmıştır. Webster ve Tyberghein [113] ürün karışımındaki değişim karşısında atelye tipi üretim sistemlerinin esnekliğini incelemiş ve altı adet farklı atelye tipi yerleşimin sahip olduğu esneklik düzeylerini değerlendirmiştir. Gupta ve Somers [114] tarafından üretim esnekliğinin ölçümü ve analizi için yapılan yayın incelemesi sonucu üretim esnekliğini etkileyen 34 adet unsur belirlenmiştir. Standart bir üretim esnekliği ölçütünün geliştirilmesi için 269 işletmeyi kapsayan bir incelemenin sonuçları üzerinde uygulanan faktör analizi teknikleri ile bu unsurlar irdelenmiştir. Dixon [115] toplanan ampirik veri üzerinde faktör analizi uygulamak sureti ile karışım, yeni ürün tasarımı ve tasarım değişikliği gibi üç esneklik boyutunun ölçülebilme olanağını araştırmıştır. Gupta [116] tarafından yapılan çalışmada üretim esnekliğinin ölçümündeki zorlukların sebebi incelenmiştir. Üretim esnekliğinin önemli bir rekabet aracı olduğu ve son zamanlarda yapılan çalışmalar ile yaygın olarak incelendiği belirtilmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ile sınıflandırılması ve ölçülmesi için gayret edilmiş olmasına rağmen, üretim esnekliğinin henüz tam olarak anlaşılamamış bir kavram olduğu ifade edilmiştir.

Chandra ve Tombak [117] iş akışı ve makina esnekliğini uygun matematik modeller geliştirerek incelemiş ve üretim sistemlerindeki esnekliğin iyi yönetim ve uygun teknoloji kullanımı ile bağlantılı olduğu sonucu elde edilmiştir. Taymaz [118] hacim ve makina esnekliğinin esneklik hiyerarşik yapısı içindeki yerini tek makinalı bir sistem üzerinde irdelemiştir. Benjaafar [119] üretim sistemlerinin esnekliği ile performansı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu araştırmacı esneklik ve performans arasında pozitif korelasyonun mevcut olduğu koşullar ile bu korelasyonun özelliklerini belirlemiş ve esnekliğin faydalarından yararlanmak için gerekli olan sistem yönetimi ile kontrol yapısının özelliklerini açıklamıştır. Ayrıca Son [120] esneklik ve kalite gibi stratejik faktörler ile üretim performansı ve üretkenlik arasındaki ilişkileri bir doğrusal programlama modeli geliştirmek sureti ile incelemiştir. Laengle ve diğerleri [121] yeni üretim tekniklerinin ekonomik bakımdan değerlendirilmesi için esneklik, kalite ve üretim içi stoklar gibi faktörlerin de dikkate

alınması gerektiğini ve geleneksel yöntemlerin bu değerlendirme için yetersiz olduğunu belirtmiştir. Uzun dönemli kapasite esnekliğinin ekonomik değeri dinamik programlama yönteminin uygulanması sureti ile sayısallaştırılmıştır.

3.6. Hücresel Üretim Sistemlerinde Esneklik

Bir üretim sisteminin, hücresel üretim sistemleri de dahil olmak üzere, ana özelliği değişen koşullar altında kararlı bir performansa sahip olmasıdır. Bu özellik ise hücresel üretim sistemlerinin üretim esnekliğine sahip olacak şekilde tasarlanması ile sağlanabilir. Üretim sistemleri ile ilgili olan değişik genel esneklik tipleri yukarıda incelendi. Fakat hücreler halindeki birimlerden oluşan hücresel üretim sistemlerinde bu esneklik tiplerinin ancak bir kısmı uygulanabilir. Dolayısı ile hücresel sistemlerin esnekliği farklı düzeylerde incelenmelidir. Hücresel üretimde esneklik ürün karışımı, işlem, yük ve makina bozulmaları gibi üretim koşullarındaki değişimler karşısında sistemin kendi kaynaklarını ayarlama yeteneği şeklinde tanımlanabilir. Hücresel üretimde esnekliğin boyutu ve sahası sistem tasarım ve kontrol stratejilerine ait özellikler ile ilgilidir. Hücresel üretim sistemlerinin değişimler karşısında yeni koşullara uyum amacı ile esnekliği kullandığı dikkate alınır ise Gerwin [97] ve [95,96] tarafından üretim esnekliği için geliştirilen yaklaşım bazı değişikler ile hücresel üretim sistemlerinde esnekliğin incelenmesine de uygulanabilir. Dolayısı ile hücresel üretim sistemlerindeki esneklik tiplerini anlamak için sistemi etkileyen değişim ve belirsizlikleri incelemek gerekir. Gerwin [97] ve Slack [95,96] tarafından yapılan çalışmalardakine benzer şekilde hücresel üretimi etkileyen değişim ve belirsizlikler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Ürün tasarımındaki değişimler, sistemde üretilen parçaların işlem grupları ve/veya operasyon sıralarında yeni bir düzenlemeye neden olabilir.
2. Ürün talep hacmindeki değişimler sistemde üretilen toplam parti adedindeki azalma veya artışa neden olabilir.
3. Ürün karışımı veya talep dağılımındaki değişimler yeni işlem grupları veya ek üretim hacmi şeklinde yeni taleplerin sistem tarafından karşılanmasına neden olabilir.
4. Makinaların güvenilirlik düzeyindeki değişimler sistemde fazla veya düşük kapasiteye sebep olabilir.

5. Makinaların işleme yeteneklerindeki değişim donanımın daha özel veya daha genel amaçlı olmasına neden olabilir.

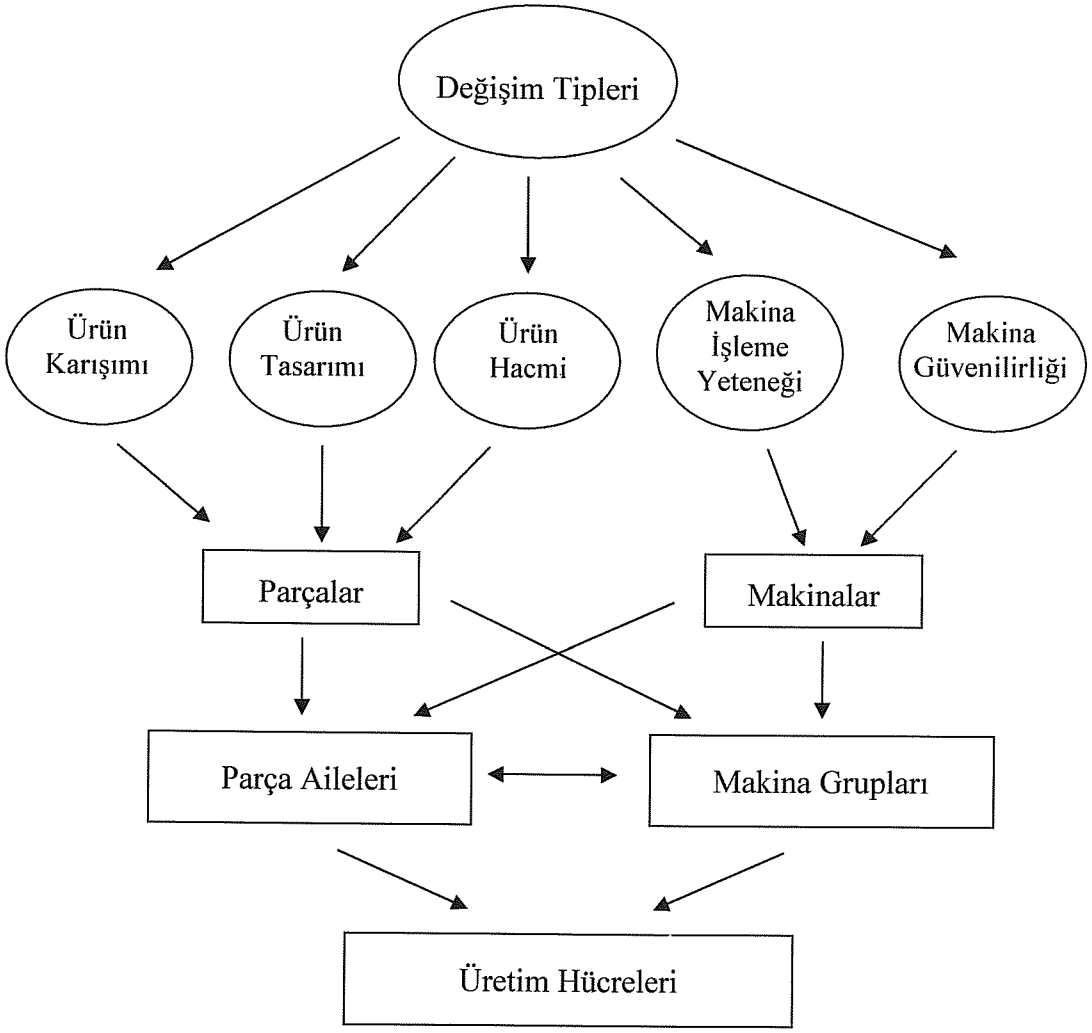
Koşullardaki tüm bu değişimler hücresel üretimde bazı değişikliklerin uygulanmasını gerektirir. Eğer bu değişimlerden bir ya da daha fazlası oluşur ise hücreler içindeki ve/veya hücreler arasındaki iş akış kontrolu, malzeme taşıma ve çizelgeleme politikaları açısından, etkilenir. Örneğin, ürün karışımı veya ürün tasarımındaki değişikliğinin neden olduğu işlem grup ve/veya sıralarındaki değişiklik hücre içindeki donanımlar arası çok yönlü akışa ya da hücreler arası iş hareket ve/veya akışı artışına sebep olabilir. Dolayısı ile malzeme taşıma ve çizelgeleme politikaları da bu değişimlere bağlı olarak belirli ölçülerde değiştirilmelidir. Eğer bir makinanın güvenilirliği zaman içinde azalır ise bu makinaya atanan yük veya bazı işlere ait iş akış hatlarının aynı veya farklı bir hücredeki diğer bir makinaya yönlendirilmesi gerekebilir. Sonuç olarak, akış kontrol yapısının değiştirilmesi gerekmektedir.

Sistemdeki donanımın kullanım sıklığı üzerinde bu değişimlerin etkisi hissedilebilir. Bazı parçaların üretim hacmindeki artma ve/veya sistemde yeni parçaların üretimine başlanması karşısında sistem kapasitesi yetersiz kalabilir. Dolayısı ile yeni donanım ilavesi için yatırım gerekebilir. Ayrıca, mevcut karışımın yapısındaki bazı parçaların çıkarılması ile donanımlardan bazılarının kullanım oranı azalabilir ve dolayısı ile bu donanımların ait oldukları hücrelerde faaliyet göstermesi ekonomik anlamını yitirebilir.

Yukarıdaki değişimler hücre içi ve hücreler arası iş yükü dengesine olumsuz yönde etki edebilir. Örneğin, makinaların bozulma sıklığı ve işleme yeteneklerindeki değişim, sistemin çalışma verimini etkileyen yük dengesizliklerine neden olabilir. Ayrıca, otomatik ve esnek bir makinanın sisteme ilave edilmesi ise bu yeni makinadan istenen verimin sağlanabilmesi için bazı parçalara ait iş akış hatlarının bu makinaya yönlendirilmesini gerektirebilir. Bu durum ise diğer makinaların kullanım oranında azalma ile iş yükü dengesizliğine ve dolayısı ile ortalama üretim stoku ile çevrim sürelerinin uzamasına sebep olabilir.

Özellikle atelye tipi üretim ile karşılaştırıldığı zaman, tüm bu değişimler hücresel üretim sistemlerinin işlevsel verimini ve stratejik önemini olumsuz yönde etkiler. Açıklanan bu değişim tipileri ile hücresel üretim sisteminin elemanları arasında

Şekil 3.6 'da görülen ilişkiler kurulabilir. Tasarım, üretim hacmi ve ürün karışımı gibi parçalara ait değişimler parça topluluğunu ve netice de parça aileleri ile makina gruplarını etkiler. Ayrıca, Güvenilirlik ve işleme yeteneği gibi makinalara ait özelliklerdeki değişimler ise makina topluluğunu ve netice de makina grupları ile parça ailelerini etkiler. Parça aileleri ile makina grupları ise birlikte sistemdeki hücrelerin işlev düzeyleri üzerinde etkili olmaktadır.



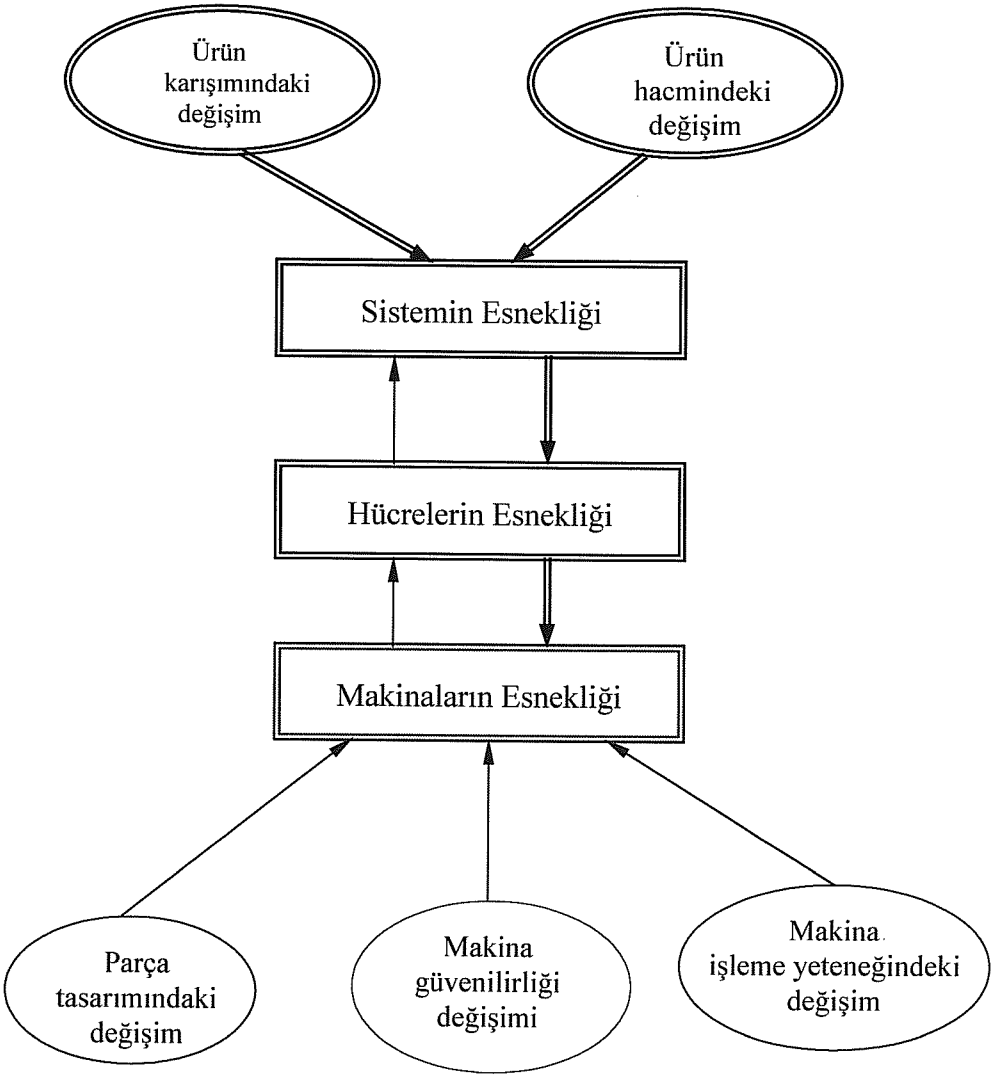
Şekil 3.6 : Hücresel sistemi etkileyen değişimler ve sistem elemanları üzerindeki etkisi

3.7. Hücresel Üretimde Esnekliğin Hiyerarşik Yapısı

Hücresel üretimde mevcut olabilecek üretim esnekliği tiplerini daha iyi açıklayabilmek amacı ile hücresel üretim sistemleri üzerinde etkili olduğu daha önce belirtilen değişim ve belirsizlikler sınıflandırılabilir. Üretim hacmi ile ürün karışımındaki değişimler müşteriler gibi dış ortam elemanlarından kaynaklandığı için dışsal değişimler olarak sınıflandırılır. Parça tasarımı, makina güvenirliği ve makina işleme yeteneği ile ilgili değişimler ise organizasyonun işletimine oldukça bağlı olduğu için içsel değişimler olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma ve Slack [95,96] tarafından verilen ilişkiler dikkate alınmak sureti ile hücresel sistemlerdeki üretim esnekliği için geliştirilebilecek bir hiyerarşik yapı Şekil 3.7' de verilmiştir. Bu hiyerarşik yapıda makina veya makina tipi düzeyi, hücre düzeyi ve sistem düzeyi olmak üzere üç farklı seviye vardır. Her bir düzeydeki esnekliğin etki alanı ile gerçekleştirilmesi için gerekli araçlar farklıdır.

İçsel değişimlerin etkisini incelemek için aşağıdan yukarı yöne doğru bir analiz yaklaşımı uygulanmalıdır. Analize en alt düzeyden başlamak sureti ile nicelleştirme ile tüme yönelik amaçların belirlenmesi sağlanabilir. Makina düzeyindeki esneklik hücre düzeyindeki esneklik ile doğrudan ve sistem düzeyindeki esneklik ile de dolaylı olarak ilgilidir. Dolayısı ile her seviyede elde edilen bilgiler diğer seviyelerdeki analiz çalışmaları için faydalı olacaktır. Örneğin, makina düzeyindeki esnekliğin yüksek seviyede olması sonucu hücre ve dolayısı ile sistem düzeylerindeki esnekliğin yüksek olma olasılığı oldukça fazladır.

Hücresel sistemlerde üretim esnekliğinin hiyerarşik yapısında yukarıdan aşağı yönde analiz yaklaşımı ile dışsal değişimlerin etkisi incelenebilir. Dışsal değişimler önce sistemi etkiler ve bu etki hücre ve makina düzeyine filtre edilerek ulaştığı için yukarıdan aşağı yönde bir analiz gerekli olacaktır. Hücresel sistemlerdeki üretim esnekliğinin bu hiyerarşik yapısı iki açıdan faydalıdır. Sistemi etkileyen değişimler arasındaki ilişkiyi göstermesi bu yapının sağladığı faydalardan biridir. Değişik seviyelerdeki değişim tiplerine bağlı olarak farklı esneklik tiplerinin belirlenmesini sağlaması ise hiyerarşik yapı tarafından sunulan bir diğer faydadır. Dolayısı ile sistemi etkileyen değişimler karşısında sistemin sahip olması gerektiği esneklik tip ve düzeyleri bu hiyerarşik yapı yardımı ile belirlenebilir.



Şekil 3.7 : Hücresel üretimde esnekliğin hiyerarşik yapısı

3.8. Hücresel Üretim Sistemlerinde Esneklik Tipleri

Hücresel üretim sistemlerindeki esnekliğin Şekil 3.7' de gösterilen hiyerarşik yapısına bağlı olarak Slack [95,96] ile Sethi ve Sethi [102] tarafından ifade edilen yaklaşımlara benzer şekilde; makina, hücre ve sistem düzeylerine ait farklı tiplerdeki esneklikler tanımlanabilir.

3.8.1. Hücresel Sistemlerde Makina Düzeyindeki Esneklik Tipleri

Makina düzeyindeki tek esneklik tipi olarak makina esnekliği kavramı tanımlanabilir. Makina esnekliği, bir makinanın gerçekleştirebileceği işlem adedinin, sistemde gerçekleştirilebilen tüm işlemlerin adedine oranı şeklinde ifade edilebilir. Eğer makina esnekliği yüksek değerde ise parça tasarımı ile ilgili değişikliklerin bu makinanın bulunduğu hücre tarafından karşılanabilme olasılığı oldukça yüksek olacaktır. Ayrıca makina esnekliğinin yüksek olması ile birlikte çok işlevli makinaların satın alınma ve makina işleme yeteneğindeki değişim olasılığı düşük olacaktır.

3.8.2. Hücresel Sistemlerde Hücre Düzeyindeki Esneklik Tipleri

Hücre düzeyindeki esneklik, parça aileleri ile hücreye atanan makinalar gibi hücreyi oluşturan elemanlara bağlıdır ve hücrenin bütününe ait özellikleri ifade eder. Hücre düzeyinde aşağıdaki esneklik tipleri tanımlanabilir [40]:

1. İçsel iş akışı esnekliği: parçaların hücre içindeki seçenek (alternatif) makinalarda işlenebilme olanağını ifade eder.
2. Parça işleme esnekliği: hücrelerin farklı ve yeni parçaları işleme yeteneği şeklinde ifade edilir.
3. Dışsal iş akışı esnekliği: parçaların atandığı asıl hücrenin seçeneği olan farklı hücrelerde üretilebilmesi olanağını ifade eder [40,122]. Parça işleme esnekliği ve dışsal iş akışı esnekliği biri birini tamamlayan ve yakından ilgili iki kavramdır. Dışsal iş akışı esnekliğinin aşağıdaki gibi iki çeşidi vardır:
    a) Hücreler arası hareket esnekliği: Bazı partilerin seçenek hücre şeklinde tanımlanan diğer bir hücreye taşınması ve bu partilerin tümü ile bu yeni seçenek hücre içinde üretilebilmesi yeteneği şeklinde tanımlanır.
    b) Hücreler arası akış esnekliği: Aynı partinin birden fazla hücre içinden geçmek sureti ile işlenebilmesi yeteneği şeklinde tanımlanır.

Bu çalışmadaki "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada "hücreler arası hareket esnekliği" tipindeki "dışsal iş akışı esnekliği" incelenecektir.

3.8.3. Hücresel Sistemlerde Sistem Düzeyindeki Esneklik Tipleri

Sistem düzeyindeki esneklik ise hücresel sistemi etkileyen dışsal değişimlere uygun tepki verebilme yeteneği ile ilgilidir. Sistem seviyesindeki esneklik alanındaki iki esneklik tipi aşağıda tanımlanmıştır:

1. Parça karışım esnekliği: hücresel üretim sisteminin farklı ürün karışımlarını en az zarar ile karşılayabilme yeteneği şeklinde tanımlanır.
2. Talep esnekliği: Mevcut ürün karışımı koşulundaki parça talep hacmi değişimlerini hücresel üretim sisteminin karşılayabilme yeteneği şeklinde ifade edilir.

Parça karışımı ve talep esnekliğinin yüksek değerde olması sonucu parça karışımı ve parça talep hacmindeki değişimlerin olumsuz etkileri en düşük düzeyde tutulabilir.

3.9. Hücresel Üretimde İş Akışı Esnekliği ve İlgili Kavramlar

Bu çalışmanın konusu bakımından önemli olan iş akışı esnekliği, seçenek işlem planları, parça üretim planı, hücreler arası hareket esnekliği, hücreler arası akış esnekliği gibi kavramlar ve bu kısımda daha kapsamlı olarak tanıtılmaktadır.

3.9.1. Hücresel Üretimde İş Akışı Esnekliğinin Tanımı

Daha önce belirtildiği gibi dışsal iş akışı esnekliği parçaların atandığı asıl hücrenin seçeneği olan farklı hücrelerde üretilebilmesi olanağını ifade eder [40,122]. Parça işleme esnekliği ve dışsal iş akışı esnekliği biri birini tamamlayan ve yakından ilgili iki kavramdır. Dışsal iş akışı esnekliği hücreler arasında yüklerin taşınabilme olanağı ya da bağımsız hücrelerin tasarım derecesi ile ilgilidir. Dışsal iş akışı esnekliğinin yüksek olması ile birlikte parçaların seçenek hücrelerde işlenmek üzere yeniden çizelgelenebilmesi olanağı ve çeşitli değişimlerin olumsuz etkilerinin en düşük düzeye indirilmesini sağlayan hücreler arası yük taşıma adedi artar. Bu çalışmada iş akışı esnekliği dışsal iş akışı esnekliği şeklinde tanımlanmıştır. Dolayısı ile iş akışı esnekliği ile dışsal iş akışı esnekliği terimleri bu çalışmada eş anlamlı olarak kullanılmaktadır ve daha önce belirtildiği gibi iş akışı esnekliğinin; (a) hücreler arası hareket esnekliği ve (b) hücreler arası akış esnekliği şeklinde, iki çeşidi vardır. Takip

eden kısımda tanıtılan seçenek işlem planları ve parça üretim planı kavramları iş akışı esnekliğinin uygulanması açısından son derece önemlidir.

3.9.2. Seçenek İşlem Planları ve Üretim Planları

İşlem planlama (İng: process planning) bir ürünü, ekonomik ve pazarda rekabet edebilecek şekilde üretme metotlarını sistematik olarak belirlemektir. İşlem planlamacı ham madde halinden son ürüne dönüştürülen her bir parça için gerekli işlemlerin sırasını saptar. Makinalar gerçekleştirebildikleri işlemlere göre tipler halinde sınıflandırılır. Bir işlem faklı tiplerdeki makinalarda gerçekleştirebilir. Gerekli takım ve tertibat, makina kapasitelerinin yeterliliği ile işlenecek parçanın kalitesi gibi üretim etmenleri dikkate alınmak sureti ile her bir işlem için kullanılabilecek makinalar seçilir. İşlemler ile makinaların bu şekilde eşleştirilmesi sonucu parça makina matrisi belirlenir. Geleneksel hücre tasarımı yöntemlerinde, parça aileleri ve makina grupları önceden belirli iş akış hatları esas alınarak oluşturulmuştur. Ayrıca geleneksel hücre tasarımında esas alınan iş akış hatları seçenek iş akış hatlarından ve oluşturulacak hücrelerden bağımsız olarak belirlenmektedir. Buna karşın, seçenek parça işlem planları ile bu işlem planları arasındaki etkileşimi dikkate alan ve yeni geliştirilen hücre tasarım yöntemlerinin sunduğu esneklik daha üstün ve gelişmiş hücresel üretim sistemlerinin tasarlanabilmesi olanağını sağlamaktadır. Seçenek iş akış hatları adedinin ne kadar fazla olabileceği hakkında fikir edinebilmek amacı ile şu örnek verilebilir; beş işlem gerektiren bir parçanın işlemlerinden herhangi biri mevcut dört farklı tipteki çok amaçlı makinalardan herhangi birinde gerçekleştirebiliyorsa olası iş akış hatlarının sayısı 1000 adetten fazla olacaktır ve işlemlerin gerçekleştirilme sıralarında değişiklik yapabilme olanağı var ise seçenek iş akış hatlarının sayısı daha da artacaktır [37]. Eğer seçenek iş akış hatlarının adedi yeterince fazla ise hücresel üretim sisteminin esnekliği ve bağımsız hücrelere bölünebilme olasılığı, doğal olarak, daha fazla olacaktır [5].

Seçenek işlem planlarını daha somut bir şekilde açıklamak için dişli imalatını örnek olarak sunulabilir [5,123]. Girdi ham maddesi yuvarlak çubuk halinde ise, aşağıdaki sekiz adet işlem safhası (İng: prosessing steps, PS) dişlinin imali için gereklidir;

İşlem safhası 1 : alın (yüz) tornalama (İng: facing)

İşlem safhası 2 : tornalama (İng: turning)

İşlem safhası 3 : kesip ayırma (İng: parting-off)

İşlem safhası 4 : alın (yüz) tornalama (İng: facing)

İşlem safhası 5 : merkezleme (İng: centering)

İşlem safhası 6 : delme (İng: drilling)

İşlem safhası 7 : kanal şeklinde yarık açma (İng: slotting)

İşlem safhası 8 : dişlinin dişlerinin açılması (gear teeth cutting)

Girdi ham maddesi döküm veya dövme gibi ön şekil verilmiş taslak durumda ise farklı işlem safhaları söz konusu olacaktır. İşlem safhalarının belirlenmesinden sonra, işlem planlamacı işlem safhalarını işlemler (İng: operations) halinde gruplamak amacı ile olası işlem sıralamalarını (İng: sequencing) belirler. Dişli imali ile ilgili bu sekiz işlem safhası Tablo 3.1'deki gibi farklı kümeler halinde gruplanabilir.

Tablo 3.1 : İşlem safhalarının operasyonlar halinde gruplandırılması

İşlemler	Plan 1	Plan 2
1	İşlem safhası 1,2,3	İşlem safhası 1,2,3
2	İşlem safhası 4,5,6	İşlem safhası 4,5,6
3	İşlem safhası 7	İşlem safhası 7,8
4	İşlem safhası 8	

Kümelenen bu işlem safhaları işlemleri oluşturur ve Tablo 3.1'deki gibi birinde dört diğerinde ise üç adet işlem bulunan farklı iki seçenek işlem planı geliştirilebilir. Bu gruplama üretim sisteminin yapısına göre farklı şekillerde düzenlenebilir ve Tablo 3.1'deki iki işlem planından daha farklı olabilen işlem planları oluşturulabilir. Örneğin, tek bir hazırlık işlemi ile çok kafalı bir tornada tamamlanmak üzere, ilk altı üretim safhası tek bir grup halinde planlanabilir. Ayrıca altı numaralı işlem safhasını ayırmak sureti ile bu delme işleminin matkap tezgahında yapılabilmesi olanaklıdır. Diğer bir olanak da planda yer alan her bir işlemin birbiri ile uyumlu makinalardan herhangi birine atanmasıdır. Örneğin, eğer plan 1 uygulanırsa dişlilerin dişleri freze (İng: milling) ya da dişli frezesi (azdırma veya diş açma tezgahı, İng: gear hobbing machine) tezgahlarından herhangi birinde işlenebilir. Eğer dişlinin dişlerini açma

(gear teeth cutting) ve yarık açma (İng: slotting) işlemlerinin birlikte yapıldığı plan 2 uygulanır ise freze (İng: milling) dışında başka bir tezgahı kullanmak olanaksızdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi bir işlem planındaki her bir işlem değişik tiplerdeki seçenek makinalarda gerçekleştirilebilir. Parça işlem planındaki her bir işlem için seçilen makinaya bağlı olarak birden fazla plan oluşturulabilir ve bu farklı planlar üretim planları olarak tanımlanır. Örnek olarak, bir parçanın işlem planında iki işlem bulunsun ve bu işlemlerden her biri iki farklı tipteki makinada gerçekleştirilebilsin. Bu durumda parçanın üretimi için dört farklı üretim planı oluşturulabilir [5].

3.9.3. Seçenek İşlem Planları ve İş Akışı Esnekliğinin Hücresel Üretim Sistemleri için Önemi

Hücre tasarım modellerinin birçoğunda her bir parça için yalnız bir işlem planı (İng: process plan) olduğu ve her bir operasyonun sadece belirli bir makinada yapılabileceği varsayılmaktadır. Uygulamada ise bazı parçalar için birden fazla sayıda işlem planı olabilir ve bu tür parçaların, bazı işlemleri seçenek makinalarda yapılabilir. Wemmerlöv ve Hyer [2] seçenek işlem planlarını (İng: alternative process plans) dikkate alan modelleri kullanarak tasarımlanan hücresel üretim sistemlerinin daha iyi netice verdiğini belirtir. Uygulamada bir parçaya ait işlem planı, parçaya ait seçenek işlem planları arasından seçilmektedir. Bu yöntemde seçenek işlem planları arasında, üretim maliyeti açısından en uygun (İng: optimal) çözümü sağlayan plan seçilir ve diğerleri dikkate alınmaz. Fakat en iyi çözümü sağlamayan diğer seçenek işlem planlarının bazı parçalara atanması ve bu parçaların seçenek işlenmesi sonucu kuyruk sürelerinde azalma, maliyetlerde düşme, üretim içi stok düzeyinde azalma ve hücresel üretimin iş akışı esnekliğinde artış sağlanabilir.

Tilsley ve Lewis [122] ile Irani ve diğerleri [14] her hücrenin kendi parça ailesindeki her parçaya ait bütün işlemleri gerçekleştirebilecek şekilde tasarımının her zaman mümkün veya ekonomik olmadığını belirtir. Wemmerlov ve Hyer [2] ABD' deki hücresel üretim sistemleri üzerinde yaptıkları bir araştırmanın sonucunda, hücreler arasındaki makina paylaşımı nedeni ile hücreler arası yük akışı ve hareketlerinin yaygın olduğunu saptamıştır. Tilsley ve Lewis [122] esnek hücrelerin tasarımına ait prensipleri geliştirmiştir. Ayrıca Harhalakis ve diğerleri [124] ile Wei [125] parça

ailesindeki her parçanın tüm işlemlerinin ilgili hücrede yapılabilmesi ya da bir hücredeki makinaların sadece ilgili parça ailesine ait parçaları işlemesi koşulunun pek çok durumda sağlanamadığını ifade etmektedir. Aynı tip makinaların farklı hücrelere yerleştirilmesi (İng: machine duplication) ve fason imalat gibi çözümler de her zaman geçerli veya ekonomik değildir. Hücresel üretimde seçenek işlem planları ve seçenek iş akış hatlarının sunduğu iş akışı esnekliği olanağı sureti ile hücreler arası akışlar ve/veya hücreler arası hareketler oluşabilmektedir.

Hyer [8] makina kullanım oranları ilgili en önemli sorunun hücre içindeki yük dengesinin sağlanması olduğunu belirtmiş ve makinalar arasında ufak düzeyli ara stokların kullanımı ile bu sorun çözümlenebileceğini ifade etmiştir. Hyer [8] atelye tipi üretim için uygulanan çizelgeleme tekniklerinin hücrelerde işlenecek parçaların zamanlanması ve sıralanmasını için uygun olmadığını ve iş akışı esnekliğinin mevcudiyeti sayesinde seçenek çizelgeler, seçenek işlem planları ile seçenek iş akış hatlarının uygulanması durumunda daha iyi sonuçların elde edileceğini belirtmiştir.

Takip eden ilk iki kısımda seçenek işlem planları tarafından sağlanan iş akışı esnekliğinin iki çeşidi olan hücreler arası hareket esnekliği ile hücreler arası akış esnekliği ve hücresel üretimdeki önemleri tanıtılmaktadır.

3.9.4. Hücreler Arası Hareket Esnekliği ve Önemi

Bazı partilerin seçenek hücre şeklinde tanımlanan diğer bir hücreye taşınması ve bu partilere ait bütün işlemlerin bu yeni seçenek hücrede gerçekleştirilmesi işlemi hücreler arası hareket olarak tanımlanır. Bu hareketlerin sağladığı esneklik ise hücreler arası hareket esnekliği olarak tanımlanır ve bu çalışmada özellikle "hücreler arası hareket esnekliği" tipindeki "dışsal iş akışı esnekliği" uygulaması incelenecektir.

Genellikle hücresel üretim sistemleri tasarımları gereği belirlenen koşullarının sağlanması durumunda düzgün ve verimli olarak faaliyet gösterirler. Fakat zaman içinde üretim sistemi ve çevresindeki değişimler nedeniyle, ürün karışımı, ürün tasarımı, talep ve talep dağılımında değişme olabilir ve bu durum bazı problemlere neden olur. Bu problemler hücreler arası yük dağılım dengesinin bozulması ile

beraber hücresel üretimin verimliliğinde düşüş şeklinde ortaya çıkar. Hücreler arası yük dengesizliğinin başlıca nedenleri aşağıda belirtilmektedir:

1. Ürün karışımındaki değişim: Bazı parçaların ürün karışımına eklenmesi ve/veya çıkarılması sonucu makina parça matrisi ve hücrelerin yapısı değişebilir. Eğer yeni ürün dağılımı mevcut hücresel sistem yapısında değişim yapılmadan üretilir ise hücreler arası yük dengesi bozulur ve hücreler arası yük hareketleri gerekli olabilir.
2. Parti hacmindeki değişim: Hücreler belirli parti hacimleri için tasarımlanır. Eğer parti hacmi değişir ise hücreler arası yük dengesizliği oluşabilir. Bu problem özellikle talebe bağlı parçaların, ürün ağacı yapısına bağlı olarak, montajı şeklindeki üretiminde ortaya çıkmaktadır.
3. Hazırlık veya işlem zamanlarında değişim: Hazırlık veya işlem zamanlarındaki değişimlerde parti hacmindeki değişim gibi yük dengesizliğine sebep olur.
4. Talep miktarındaki değişim: Ürünlerin birbirinden bağımsız olması durumunda her bir hücre bir parça ailesini işlemek üzere tasarımlanır ve hücrelerin kapasiteleri ürettikleri parça ailelerinin talep miktarına bağlı olarak belirlenir. Dolayısı ile sistemdeki hücreler ilgili parça ailelerinin talebini karşılayacak şekilde dengeli üretime olanak sağlar. Eğer bir aileye olan talep azalır ise ilgili hücrede fazla kapasite oluşur. Eğer bir parça ailesinin talebi artar ise ilgili hücredeki aşırı yük nedeni ile kapasite yetersizliği gözlenir. Sonuçta sistemdeki yük dengesi bozulur.

Yukarıda belirtilen nedenlerin bir ya da daha fazlasının mevcut olması durumunda hücreler arası yük dengesizliği ortaya çıkar. Eğer sistem hücreler arası hareket esnekliğine sahip ise aşırı yüklü darboğaz hücredeki partilerin bir kısmının daha az yüklü seçenek hücreye taşınması ve seçenek hücrede tümü ile işlenmesi sureti ile darboğaz hücre yükünde azalma, yük dağılımında denge ve sistem performansında iyileşme sağlanabilir.

3.9.5. Hücreler Arası Akış Esnekliği ve Önemi

Hücreler arası akış, aynı partinin birden fazla hücrede işlenmesi şeklinde tanımlanır. Dolayısı ile bazı partiler iki ya da daha fazla hücre içinden akarak üretilmek üzere

sistem içinde ilerler. Bu akışın sağladığı esneklik ise hücreler arası akış esnekliği olarak tanımlanır. Hücreler arası akış aşağıdaki durumlarda söz konusu olmaktadır:

1. Bir hücrenin aşırı yüklü bir makinasının kuyruğundaki partilerden bazıları, diğer bir hücredeki daha az yüklü ve aynı tipteki seçenek (alternatif) makinaya işlenmek üzere nakledilir.
2. Hücreler arası akışın söz konusu olduğu bir diğer hal ise, parça makina matrisinde istisnai elemanların ortaya çıkması durumunda hücrelerin ayrık olamamasıdır. Bu durumda istisnai parçanın bulunduğu parça ailesine ait hücrede, bu parça ile ilgili bazı işlemlerin gerçekleştirilmesi için gerekli makinalardan bir kısmı yoktur. İstisnai parçaların kendi hücreleri içinde tamamen işlenmesi için eksik olan makina tiplerinin birden fazla hücreye yerleştirilmesi (İng: machine duplication) ekonomik değil ise bu istisnai parça diğer bir hücrede bulunan ve aynı işlemi yerine getirebilecek bir makinaya taşınmak sureti ile gerekli işlem gerçekleştirilir.
3. Hücre tasarımındaki temel varsayım, hücredeki makina kapasitelerinin parça ailesindeki tüm parçaları tam olarak işleyebilecek düzeyde olmasıdır. Yeterli kapasiteyi sağlamak için gerekli makina adedi kesirli sayı ise bu makina adetleri genelde bir üst tam sayıya yuvarlanır. Örneğin, bir hücredeki bir makina tipinin ancak 1.6 kadarı ile kapasite gereksinimi karşılanabiliyor ise fiziksel olarak kesirli sayıda makina olamayacağı için bu makina tipinden 2 tanesi aynı hücreye yerleştirilmelidir. Dolayısı ile bazı hücrelerde aynı tipteki bazı makinalardan birden fazla sayıda olması gerekebilir. Fakat finansal nedenler ve yeterli yerleşim alanı olmaması gibi durumlarda, bu makina tiplerinin sayısı bir alt tamsayı değerine tamamlanır ve makina adedi sınırlandırılır. Bu durumda planlanan kapasiteyi karşılayamayan bu tip makinalarda gerçekleştirilecek işlemler için ilgili parçaların hücreler arasında taşınması gerekir.

Yukarıda belirtilen nedenlerin bir ya da daha fazlasının mevcut olması durumunda bazı partiler hücreler arasında akarak işleneceği için hücreler arası akış esnekliği önemli bir özelliktir.

3.10. İş Akışı Esnekliğine Sahip Hücresel Üretim Sistemlerinin Tasarımı

ABD, Avrupa ve Japonya gibi gelişmiş ekonomik bölgelerde yeni otomatik makina ve malzeme taşıma sistemlerini kullanan hücresel sistemler faaliyettedir. Esnek üretim sistemleri (EÜS) üretim kontrolu faaliyetlerinin bilgisayar denetimi ile yapıldığı otomatik hücrelere örnektir. Bu otomatik makinaların çok çeşitli işleri yapabilmeleri ve yüksek kapital yatırımı gerektirdiği dikkate alındığında, hücrelerin oluşturulmasında kullanılacak işlem ve makinaların seçiminde çok dikkatli karar vermek gerekir. Parça ailelerine ait parçaların sadece kendi hücrelerinde işlenmesi ve hücreler arasında bağlantıların olmadığı bağımsız hücrelerin tasarlanması hücresel üretim sistemlerini oluşturmada ana amaçtır. Eğer her bir parçanın seçeneği olmayan sadece tek bir işlem planına sahip olduğu şeklinde bir kısıtlama kabul edilir ise, aynı tipteki makinaları farklı hücrelere yerleştirmek (İng: machine duplication) sureti ile bağımsız hücreler oluşturulabilir. Bu durum ise aynı tip makina adedi ve yatırım düzeyinin fazla olmasına sebep olur. Dolayısı ile pek çok durumda bağımsız hücrelerin oluşturulması ekonomik veya pratik olmayabilir [5].

Hücreler genelde otomatik makina ve malzeme taşıma sistemleri kullanılarak oluşturulur. Hücre tasarımının iyi olabilmesi için işlem ve makinaların seçiminde kapsamlı bir değerlendirme yapılmalıdır. Dolayısı ile bütün önemli etmenlerin bir arada ve ekonomik yönleri ile düşünülmesi hücre tasarımı için gereklidir. Hücrelerin oluşturulmasından sonraki dönemde yeni parçaların üretime alınması ve değişen talep nedeni ile yeni parça aileleri ve makina gruplarının belirlenmesine ihtiyaç duyulabilir. Bu durum mevcut sistemin geliştirilerek yeniden tasarımı (İng: redesign), mevcut makinaların yerleşiminin yeniden düzenlenmesi (İng: relocation) ve yeni makinaların satın alınması için gerekli yatırım gibi bazı maliyet unsurlarının dikkate alınmasını gerektirmektedir. Ayrıca hızlı gelişen yeni teknolojiler ile birlikte bazı makina tiplerinin ekonomik ve teknolojik ömrünü kısa sürede tamamlaması, daha önce oluşturulan parça ailelerinin ve makina gruplarının önemini yitirmesine neden olabilir. Bağımsız hücrelerin tasarımının pek çok durumda ekonomik olmaması nedeni ile hücreler arasında malzemelerin taşındığı bağımlı hücrelerin oluşturulması gerektiği için malzeme taşıma sisteminin de tasarım kapsamında değerlendirilmesi

oldukça önem kazanmaktadır. Eski makinaların yeni veya teknolojik bakımdan gelişmiş makinalar ile değiştirilmesi seçeneğinin de özellikle dikkate alınması gerekir. Tüm bu hususlar uygun matematiksel modeller geliştirilmek sureti ile değerlendirilebilir. Eğer seçenek işlem planları (İng: alternate process plans) kullanılabilir ve hücre oluşturma safhasında parçalar için değişik işlem planlarının seçimi olanağı da dikkate alınır ise, ek makina yatırım düzeyi düşük ve daha ekonomik hücresel sistemler tasarlanabilir [5].

Bir hücresel üretim sisteminin tasarımında parça aileleri ve ilgili makina gruplarının oluşturulması ile birlikte aşağıdaki amaç ve kısıtların da dikkate alınması gerekir [40]:

- Hücrelerin bağımsızlığı.
- Hücrelerin ve hücresel sistemin esnekliği.
- Hücrelerin yerleşim düzeni.
- Hücreler içindeki donanımın yerleşim düzeni.
- Parçaların hücreler içindeki akış şekli.
- Hücrede bulunan makina sayısı ile ölçülen hücre boyutu.
- Gerekli ek yatırımın değeri.
- Hücrelerdeki makinaların kullanım oranları.

Bu amaçlar arasında benzerlik ve karşıtlıklar olabilir. Eğer ek yatırım üzerinde bir sınırlama yok ise darboğaz yaratan makina tiplerinin uygun hücrelere ilave edilmesi sureti ile hücreler arası iş akışı önlenebilir ve hücrelerin bağımsızlığı sağlanabilir. Ek yatırım üzerindeki kısıtlar az sayıdaki büyük boyutlu hücrelerin tasarlanmasına neden olur ise hücre boyutu ile ilgili sınırlama ihlal edilmiş olacaktır. Hücre boyutunun sınırlandırılması ise hücrelerin bağımsızlığı ve esnekliği üzerinde etkili olabilir. Ayrıca hücre içinde doğrusal iş akışı sağlama eğilimi nedeni ile bazı makina tiplerinden aynı hücre içinde birden fazla adette olması gerekebilir ve bu durum iş akışı esnekliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Dolayısı ile hücre tasarımı problemi kavramsal ve sayısal bakımından karmaşık bir yapıdadır. Ayrıca, hücre tasarımında gerçek üretim yapısının kapsanması için parçalara ait üretim hacimlerinin özellikle dikkate alınması gereklidir [40].

3.10.1. İş Akışı Esnekliğine Sahip Hücresel Üretim Sistemi Tasarım Modelleri ve Özellikleri

Esnek hücresel sistemlerde her hücre geniş bir aralıkta dağılmış olan parça çeşitlerini işleyebilecek yeteneğe sahip olacak tarzda tasarlanır. Bu sistemlerde aynı ya da benzer işlemleri gerçekleştirebilen makinalar farklı hücrelere yerleştirilebildiği için her hücrede hemen her işlemi gerçekleştirebilecek makinalar mevcuttur. Bu tarz bir düzenleme ile fonksiyonel açıdan benzer hücrelerin oluşturulması sağlandığı için sistem bütün olarak ileri düzeyde hücreler arası iş akışı esnekliğine sahiptir. Bununla birlikte esnek hücreler içinde tümü ile işlenebilecek parça oranında düşme eğilimi olabilir. Ayrıca, artan hücreler arası trafik ile birlikte iş akışının sadelik derecesindeki azalma hücresel sistemlerin zayıf yönlerini oluşturmaktadır. Dolayısı ile iş akışının sade ve basit olması ile hücreler arası iş akışı esnekliğinin mevcut olması, karşıt iki özelliktir ve tasarım sırasında bu iki karşıt özellik arasında bir denge oluşturulmasına dikkat edilmelidir [13].

3.10.1.1. Hücreler Arası Hareket Esnekliğine Sahip Hücresel Sistem Tasarımı Modeli

Hücreler arası hareket esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinin tasarımı için Singh ve Rajamani [5] tarafından geliştirilen ve bu kısımda açıklanan model uygulanabilir. Bu modelin yapısı gereği parça ve makina gruplarının eş zamanlı (İng: simultaneous) olarak belirlenmesi nedeni ile doğal parça aileleri ve makina grupları oluşturulabilir. Bir parça tipine ait talebin birden fazla hücreye dağıtılabilmesi olanağı ile birlikte bir parçanın tüm işlemlerinin ancak bu parçanın atandığı hücre içinde gerçekleştirilmesi koşulu varsayıldığı için bu model sadece hücreler arası hareket esnekliğine sahiptir ve hücreler arası akış esnekliği dikkate alınmamıştır. Ayrıca bu modelde aynı parçanın üretimi için farklı işlem ve/veya üretim planlarının uygulanabileceği kabul edilmiştir. Fiziki yerleşim alanının genelde sınırlı olması nedeni ile modelde her bir hücreye yerleştirilebilecek makina adedi sınırlandırılmıştır. Yukarıda açıklanan varsayım ve özelliklere sahip olan bu model karma tamsayılı programlama (İng: mixed integer programming) yapısındadır. Amaç fonksiyonu ile kısıtları ve yapısının açıklanması ise aşağıda verilmektedir.

Amaç fonksiyonu:

$$\sum_{mc} C_m Z_{mc} + \sum_{kpcl} \left(\sum_{ms} a_{ms}(lkpc) c_{ms}(kp) \right) X(lkpc) \qquad (3.3)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{cpl} X(lkpc) \geq d_k \ , \qquad \forall k \qquad (3.4)$$

$$\sum_{kpl} \left(\sum_{s} a_{ms}(lkpc) t_{ms}(kp) \right) X(lkpc) \leq b_m Z_{mc} \ , \qquad \forall m, c \qquad (3.5)$$

$$\sum_{m} Z_{mc} \leq Max_c \ , \qquad \forall c \qquad (3.6)$$

$Z_{mc} = 0$ veya pozitif tam sayı , $\forall$ m., c (3.7)

$X(lkpc) \geq 0$, $\forall$ l, k, p, c (3.8)

Burada,

k : toplam K adet farklı parçadan herhangi bir tanesi (1, 2,..... K).

d_k : k numaralı parçanın talebi.

p : k parçasına ait toplam P_k adet işlem planından herhangi bir tanesi (1,2,..... P_k).

m : toplam M adet farklı makina tipinden herhangi bir tanesi (1, 2,..... M).

b_m : m tipi bir makinanın ömrü ile belirlenen zaman cinsinden kapasitesi

c : toplam C adet faklı hücreden herhangi bir tanesi (1, 2,..... C).

S : bir (kp) kombinasyonuna ait toplam S(kp) adet operasyondan herhangi bir tanesi (1, 2,..... S(kp)).

l : bir (kpc) kombinasyonuna ait toplam L(kpc) adet üretim planından herhangi bir tanesi (1.2,..... L(kpc)).

C_{mc} : m tipi bir makinayı satın almanın maliyeti.

Z_{mc} : c hücresinde yerleştirilen m tipi makinaların adedi.

Max_c : c hücresine yerleştirilebilecek maksimum makina adedi (fiziki yerleşim alanının sınırlı olması bu değeri belirler).

X(lkpc) : p işlem planı ve l üretim planı kullanılarak c hücresinde üretilen k parçası adedi.

a_{ms}(lkpc) : 1, bir (kpc) kombinasyonuna ait bir l üretim planındaki bir s operasyonuna m tipi bir makinanın atanması durumunda
0, diğer durumlarda.

c_{ms}(lkp) : bir (kp) kombinasyonuna ait bir s operasyonu için m tipi bir makina kullanmanın maliyeti (ilgili operasyon için m tipi bir makinayı kullanabilme olanağı yok ise bu maliyet ∞ olarak kabul edilir).

t_{ms}(kp) : bir (kp) kombinasyonuna ait bir s operasyonu için m tipi bir makinanın kullanılması durumunda gerekli işlem süresi (ilgili operasyon için m tipi bir makinayı kullanabilme olanağı yok ise bu işlem süresinin değeri ∞ olarak kabul edilir).

Bir k parçasının p işlem planı ile ilgili bir l üretim planı için gerekli toplam S(kp) adet işleme ait bir s işleminin c hücresine atanan m tipi bir makinada gerçekleştirildiği; sadece 0 ya da 1 değerlerinden birisini taşıyabilen a_{ms}(lkpc) terimleri ile ifade edilmiştir. Bu diğer bir şekilde şu ifade ile açıklanabilir; bir (kpc) kombinasyonu için tüm olası üretim planı sayısı L(kpc) olmaktadır ve $l \in L(kpc)$ tanımlı bir l üretim planı ise model içindeki a_{ms}(lkpc) terimlerinin aşağıdaki gibi tanımlanması ile belirlenmiştir:

a) üretim planı l deki bir s işlemine m tipi bir makinanın atanması durumunda, tüm (kpc) ler için geçerli olmak üzere, $a_{ms}(lkpc) = 1$ veya

b) diğer tüm durumlar için $a_{ms}(lkpc) = 0$.

Modelin (3.3) eşitliği ile ifade edilen amaç fonksiyonun en düşük değeri 2-6 numaralı kısıtlar ile birlikte sağlanmalıdır. Bu amaç fonksiyonun ilk terimi hücrelere atanan makina tipleri ve sayılarına bağlı olarak maliyeti, ikinci terimi ise c hücresinde p işlem planı ile işlenen k parçasına ait l üretim planındaki bir s işlemini m tipi

makinada gerçekleştirmenin maliyetini aynı parçanın üretim hacmine bağlı olarak ifade eder. Her parça tipine ait talebi karşılama gereği (3.4) ile belirlenmiştir. Makina kapasitelerinin parçaları işlemek için yeterli olduğu (3.5) ile ifade edilmiştir. Her bir hücreye atanabilecek maksimum makina adedi (3.6) ile sınırlandırılmıştır. Sıfır veya pozitif tam sayı olabilen değişkenler (3.7) ve sıfır veya pozitif gerçek sayı olabilen değişkenler ise (3.8) ile ifade edilmiştir. Seçilen her makina tipine ait makina adedi sıfır ya da pozitif bir tamsayı olduğu için bu model makinaların eksik kullanım oranının en düşük değerde olmasını sağlamaktadır. Oluşturulabilecek tüm hücrelerin adedi C ile gösterilmiştir. Modelin çözümü sonucu daha az sayıda hücre elde edilebilir ve bu durumda diğer hücreler dikkate alınmaz [5].

3.10.1.2. Hücreler Arası Akış Esnekliğine Sahip Hücresel Sistem Tasarımı Modeli

Hücreler arası akış esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinin tasarımı için Singh ve Rajamani [5] tarafından geliştirilen ve bu kısımda açıklanan model uygulanabilir. Bir partinin birden fazla hücrede işlenebildiği varsayıldığı için modelin yapısı içinde akış esnekliği ve hücreler arası yük taşıma maliyetleri özellikle dikkate alınmıştır. Model parça aileleri ve makina gruplarını eş zamanlı olarak oluşturmaktadır. Karma tamsayılı programlama (İng: mixed integer programming) amaç fonksiyonu ile kısıtları ve yapısının açıklanması ise aşağıda verilmektedir.

Amaç fonksiyonu:

$$\sum_{mc} C_{mc} Z_{mc} +$$

$$\sum_{kpcl} \left(\sum_{c^*ms} a_{mc^*s}(lkpc)\, c_{ms}(kp) \right) X(lkpc) +$$

$$\sum_{kpcl} \left(\sum_{c^*ms} a_{mc^*s}(lkpc)\, h_{cc^*}(k) \right) X(lkpc) \qquad (3.9)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{cpl} X(lkpc) \geq d_k \;, \qquad \forall k \tag{3.10}$$

$$\sum_{kpl} \left(\sum_{cs} a_{mc^*s}(lkpc)\, t_{ms}(kp) \right) X(lkpc) \leq b_m Z_{mc} \;, \qquad \forall m, c^* \tag{3.11}$$

$$\sum_{m} Z_{mc} \leq Max_c \;, \qquad \forall c \tag{3.12}$$

$Z_{mc} = 0$ veya pozitif tam sayı , $\forall$ m., c (3.13)

$X(lkpc) \geq 0$, $\forall$ l, k, p, c (3.14)

Burada,

c* : toplam C adet faklı hücreden herhangi bir tanesi (1, 2,..... C)

$a_{mc^*s}(lkpc)$: 1, bir (kpc) kombinasyonuna ait bir l üretim planındaki bir s operasyonuna c* hücresindeki m tipi bir makinanın atanması durumunda

0, diğer durumlarda

$h_{cc^*}(k)$: k numaralı parçayı c hücresinden c* hücresine taşımanın maliyeti

Hücreler arasında parçaların akışını ifade edebilmek için modeldeki üretim planlarının tanımında makina tipleri ile birlikte makina tiplerinin ait olduğu hücrelerin de belirtilmesi gerekir. Dolayısı ile bu modelde c hücresinde p işlem planı ile işlenen k parçasına ait bir l üretim planına ait toplam S(kp) adet operasyon içindeki bir s operasyonunun c* hücresindeki m tipi bir makinaya atandığı, sadece 0 ya da 1 değerlerinden birisini taşıyabilen $a_{mc^*s}(lkpc)$ terimleri ile ifade edilmiştir. Bu diğer bir şekilde şu ifade ile açıklanabilir; bir (kpc) kombinasyonu için tüm olası üretim planı sayısı L(kpc) olmaktadır ve $l \in L(kpc)$ tanımlı bir l planı ise model içindeki $a_{mc^*s}(lkpc)$ terimlerinin aşağıdaki gibi tanımlanması ile belirlenmiştir:

a) üretim planı l deki tüm (kpc) lere ait bir s operasyonuna c* hücresindeki m tipi bir makinanın atanması durumunda $a_{mc*s}(lkpc) = 1$ veya

b) diğer tüm durumlar için $a_{mc*s}(lkpc) = 0$.

Bu modelde, hücreler arasındaki parça taşıma maliyetinin hesaplamak için bir parçanın bir işleminin seçenek hücrede gerçekleştirilmesi sonrasında parçanın stoklanmak için asıl hücresine taşındığı ve seçenek hücreye ise gerekli makinanın boşalması sonrasında gönderildiği kabul edilmiştir. Dolayısı ile modelde hesaplanan hücreler arası parça taşıma maliyeti gerçek taşıma maliyetinden daha büyük bir değerde olmaktadır. Parçaların hücreler arasında taşınma sırasının modelde dikkate alınmaması ve hücreler arası akışın en düşük düzeyde tutulmasının modelin amaçları arasında olması nedeni ile yukarıdaki kabul uygun bir yaklaşımdır. Bir k parçasını c hücresinden c* hücresine taşıma maliyetini ifade eden $h_{cc*}(k)$ terimindeki c ve c* indisleri 1 ile toplam hücre adedini belirten C arasındaki her değeri alabilir. Eğer hücreler arası taşıma maliyetleri yanında hücre içi taşıma maliyetleri ihmal edilebilirse; hücre içi taşıma maliyetleri sıfır olarak kabul edilebilir. Ayrıca, iletişim ve enerji hattı, zemin inşaatı, yardımcı donanımlar gibi maliyetler dikkate alındığında, bir makinanın değişik hücrelere atanması ile ilgili C_{mc} maliyetleri farklı değerlerde olmaktadır.

Eşitlik (3.9) tarafından ifade edilen bu modele ait amaç fonksiyonun en düşük değeri (3.11) - (3.14) ile birlikte sağlanmalıdır. Bu amaç fonksiyonun ilk terimi hücrelere atanan makina tipleri ve sayılarına bağlı olarak maliyeti; ikinci terimi c hücresinde p işlem planına ait l üretim planı ile işlenen k parçasının bir s işlemini m tipi makinada gerçekleştirmenin maliyetini, aynı parçanın üretim hacmine bağlı olarak; üçüncü terim ise p işlem planı ve l üretim planı uygulanması ile c hücresinde işlenen bir k parçasının bu c hücresinden bir diğer c^* taşınma maliyetini, bu parçanın üretim hacmine bağlı olarak ifade eder.

Her parça tipine ait talebin karşılandığını (3.10) ile belirler. Parça işlem sürelerinin zaman cinsinden belirli makina üretim kapasite değerlerini aşmadığı (3.11) kısıtları ile ifade edilmiştir. Her bir hücreye atanabilecek maksimum makina adedi (3.12) kısıtları ile sınırlandırılmıştır. Sıfır veya pozitif tam sayı olabilen değişkenler (3.13) ve sıfır veya pozitif gerçek sayı olabilen değişkenler (3.14) kısıtları ile belirlenmiştir.

Seçilen her makina tipine ait makina adedi 0 ya da pozitif bir tamsayı olduğu için bu model makinaların eksik kullanım oranının en düşük değerde olmasını sağlamaktadır. Oluşturulabilecek tüm hücrelerin adedi C ile gösterilmiştir. Çözüm sonucu daha az sayıda hücre elde edilebilir ve bu durumda diğer hücreler dikkate alınmaz [5].

3.11. Hücresel Üretimde Esneklik Alanında Yapılmış Diğer Çalışmaların İncelenmesi

Hücrelerin tümü ile biri birinden bağımsız olarak tasarlaması gereği hücresel üretimin öncüleri tarafından özellikle belirtilmiştir. Fakat modern malzeme taşıma ve üretim kontrol sistemleri bu gerekliliği geçersiz kılmıştır. Tasarım döneminde mevcut olan ürün karışımı, talep hacmi ve talep dağılımı koşullarına uygun bağımsız hücreler tasarlanabilir, fakat zaman içinde değişen koşullar nedeni ile hücreler arasında parçaların taşınması gerekli olabilir. Hücreler arasında parça akış ve/veya hareketlerine neden olabilecek bazı koşullar aşağıda verilmiştir [14]:

- Makina arızaları.
- Tek ve pahallı olan bir makinayı devamlı yüklü tutma gereği.
- Bazı işlemler için bazı parçaların diğer üreticilere gönderilmesi.
- Ürün karışımındaki değişimler.
- Parça ailelerine ve/veya parçalara ait talep ve üretim miktarlarındaki değişimler.
- Ekonomik nedenler ile iki ya da daha fazla parça ailesin ait parçaları işleyen darboğaz makinaların kullanma zorunluluğu.
- Hücreler arası malzeme taşıma sistemleri kullanımının ekonomikliği.
- Aynı tip makinaların değişik hücrelere atanması durumunda seçenek iş akış hatlarının kullanılabilmesi.

Bilgi akışı ve üretim teknolojilerinde sağlanan ilerlemeler sunucu esnek otomasyon sistemleri değişik ortamlarda uygulanabilmiştir. Üretimin otomatik olarak gerçekleştirilmesini sağlayan esnek üretim sistemleri bu ilerlemenin en belirgin ürünüdür. Gelişmiş esnek otomasyon sistemleri esnek işlem planlarının uygulanabilmesi için gerekli özelliklere sahiptir. Teorik bakımdan esnek işlem

planlarının uygulanabilmesi için esnek otomasyon sistemleri veya bilgisayarlara gerek olmamakla birlikte pratik bakımdan bu iki sistemin de kullanılması uygun zorunludur. İşlem planı esnekliği karar verme alanını genişletir ve ileri düzeyde performans için gerekli potansiyeli sağlar. İşlem planı esnekliğinin aşağıda belirtilen üç tipi vardır [178]:

- Sıralama esnekliği: işlemlerin sıralarının değiştirilebilmesi şeklinde ifade edilir.
- Makina esnekliği: aynı işlem için farklı makinaların kullanılabilmesi şeklinde ifade edilir.
- İşlem esnekliği: değişik işlemlerden oluşan planların kullanılabilmesi şeklinde ifade edilir.

Kang ve Wemmerlöv [16] seçenek iş akış hatlarını dikkate alan hücre tasarım yöntemlerinin oldukça yeni ve bu alandaki araştırmaların sayısının da az olduğunu belirtmektedir. Hücre tasarım yöntemlerinin pek çoğunda mevcut parça iş akış hatları esas alınmaktadır [15]. Üretim birimlerinde kullanılan mevcut parça iş akış hatları uygun ve uyumlu değil ise iyi bir hücresel sistem tasarımı için parça iş akış hatlarının yeniden oluşturulması gerekebilir [11]. Mevcut iş akış hatları üzerine kurulan hücre tasarımı yöntemlerinde genellikle iş akış hatlarının nasıl belirlendiği göz ardı edilmektedir. Hücre tasarımı için sadece mevcut ve sabit iş akış hatlarının kullanılması aşağıda açıklanan nedenler dolayısı ile eleştirilebilir [16]:

1. İşlem planlarında kayıtlara geçmeyen değişikliklerin sık sık yapılması sebebi ile tasarım için esas alınan mevcut iş akış hatları hatalı olabilir.
2. Bir işlem için birden fazla sayıda seçenek makina mevcut olabileceği için bir parça ile bu parçanın işlendiği makina dizisi arasındaki değişmeyen tek bir ilişki varsayımı kısıtlayıcı bir etkendir.
3. Atelye tipi üretim ortamı için geliştirilmiş olan mevcut iş akış hatlarının hücresel üretim ortamına uygunluğu tartışmalı bir noktadır. Örneğin atelye tipi üretim sistemlerine ait iş akış hatlarının geliştirilmesinde makina kullanım oranlarının en iyi düzeyde tutulması esas alınır ve grup teknolojisi kavramına ait özellikler dikkate alınmaz.
4. Hücre tasarımındaki diğer bir sorun da aynı tip makinanın birden çok sayıdaki hücre içinde kullanılma gereksinimidir. Bu sorun ise hücreler arası yük

hareketleri ve/veya akışına izin verilmesi ya da aynı tip makinanın birden fazla sayıdaki hücreye atanması [57,179,180] sureti ile çözümlenir.

Yukarıda belirtilen nedenler ile sabit ve mevcut iş akış hatlarının hücre tasarımı için kullanılmasının ne derece sağlıklı bir yaklaşım olabileceği konusu sorgulanabilir. Dolayısı ile kapasite kısıtları altında işlemlerin seçenek makinalara yeniden atanmasını dikkate alan hücre tasarımı yöntemleri geliştirilmelidir [16]. Kang ve Wemmerlöv [16] tarafından mevcut ve sabit iş akış hatları varsayımının gevşetilmesini kapsayan bir hücre tasarımı yöntemi geliştirilmiştir. Araştırmacının çalışmasında her parçanın üretimi gerekli için işlemlerin farklı tipteki makinalarda gerçekleştirilebileceği varsayılmıştır. Parçalara ait işlemlerin farklı tip makinalara atanabilme esnekliğini dikkate alan hücre tasarımı yaklaşımı ile sabit iş akış hatlarını kullanan yöntemlere göre daha iyi hücresel sistemler oluşturulabilir [16].

Choobineh [82] seçenek işlem planlarının kullanılması sureti ile bir parçanın birden fazla sayıdaki parça ailesine atanabilme olanağını dikkate alan bir hücresel sistem tasarım yöntemi geliştirmiş ve talepteki dalgalanmalar karşısında parçaların uygun hücrelere yükleme olanağı bakımından gerekli esnekliğin bu yaklaşım tarafından sağlanabildiğini ifade etmiştir. Bu yaklaşım ile ayrıca doğal parça ailelerini belirleme olanağı da sağlanmıştır. Kusiak [67] seçenek iş akış hatlarının uygulanması sonucu hücre bağımsızlığını en iyi düzeyde gerçekleştirmeyi amaçlayan bir matematik programlama yöntemi geliştirmiştir. Shtub [181] seçenek iş akış hatlarını dikkate alan benzer bir yaklaşım kullanmış ve çözüm için ise genel atama yöntemimi kullanmıştır. Co ve Araar [83] üç aşamalı ve seçenek iş akış hatlarını kullanan bir yaklaşım geliştirmek sureti ile hücreler arası yük taşıma adedi en düşük değerde olan bir hücre tasarımı yöntemini incelemiştir.

Her parça için farklı iş akış hatları ile her işlem için farklı makina tiplerini dikkate alan ve minimum ilk yatırım maliyeti amaçlı tamsayılı programlama yöntemi Rajamani ve diğerleri [123] tarafından geliştirmiş ve işlemler için makinaların optimum seçiminin sabit iş akış hatları varsayımı ile sağlanamadığı ise ilgili çalışmada, özellikle, ifade edilmiştir. Farklı amaç fonksiyonu için benzer bir tamsayılı programlama yöntemi gene Rajamani ve diğerleri [80] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmaların önemli noktaları ise aşağıda irdelenmiştir [16]:

1. Bu yöntemlerin hiç birinde önce makina grupları belirlenerek daha sonra da parçalar aileleri oluşturmak üzere ilgili makina gruplarına atanmamıştır. Her bir parçanın seçenek iş akış hatlarına sahip olabilmesi nedeni ile makinaların işleyecekleri parçalara göre gruplanması olanaksız olduğu için bu doğal bir durumdur. Örneğin Choobineh [82] önce parça ailelerini belirlemiş ve daha sonraki adımda da makinaları bu ailelere atamak sureti ile hücreleri tasarlamıştır. Kusiak [67], Shtub [181], Co ve Araar [83] ile Rajamani ve diğerleri [80,123] tarafından yapılan çalışmalarda ise parça aileleri ve makina grupları eş zamanlı olarak belirlenmiştir.
2. Kusiak [67] ile Co ve Araar [83] tarafından yapılan çalışmalarda önceden belirlenmiş seçenek iş akış hatlarına göre iş akışı esnekliği sağlanmıştır. Choobineh [82] ile Rajamani ve diğerleri [80,123] tarafından yapılan çalışmalarda ise seçenek iş akış hatlarının sağladığı iş akışı esnekliği işlemlerin farklı tipteki makinalarda gerçekleştirilmesi bakımından incelenmiştir. Aslında seçenek iş akış hatlarının sağladığı iş akışı esnekliği, aynı operasyonun farklı tipteki makinalarda yapılabilme olanağını ifade eder.
3. Co ve Araar [83] tarafından yapılan çalışmada ise seçenek iş akış hatları problemi tek iş akış hattı problemine dönüştürüldüğü için iş akışı esnekliği olanağından kısmen faydalanılmıştır.
4. Yukarıda incelenen çalışmaların hepsinde matematik programlama yöntemlerinden faydalanılmıştır. Matematik programlama yöntemleri ilgili hesaplar genelde karmaşıktır ve seçenek iş akış hatlarının dikkate alındığı büyük boyutlu hücresel sistemlerin matematik programlama yöntemleri ile tasarımı ise daha da karmaşık olmaktadır [123].

Bir üretim sistemi uzman hücrelere tam olarak bölünemez ise sistemin bir kısmı fonksiyonel düzenleme şeklinde tasarlanabilir. Uzman hücrelerde işlenemeyen işler bu fonksiyonel (atelye tipi) bölüme atanır [80]. Bir işletmenin hücreselleşme derecesi uzman hücrelerde gerçekleştirilen faaliyetler için harcanan sürenin bu işletmedeki yıllık faaliyetler için harcanan toplam süreye oranı ile ifade edilebilir. Wemmerlöv ve Hyer [2] tarafından incelenen 27 firmanın çoğu sınırlı sayıda hücreye sahiptir ve her 4 firmadan 3 tanesi ise üretim süresinin ancak %25 ya da daha ufak bir oranının hücreler içinde yapılan üretimde harcandığını belirtmiştir.

Wemmerlöv ve Hyer [2] talepteki değişimler nedeni ile oluşan yük dalgalanmaları karşısında hücresel üretim sistemlerinin uygun performansı sağlayabilme bakımından gerekli işlevsel esnekliğe sahip olmadığını belirtmiştir. Talepteki dalgalanmalar hücreler arasında ve hücreler içindeki makinalar arasında yük dengesizliği yaratmak sureti ile iş akış süreleri ile üretim içi stok düzeylerinde artışa neden olur. Bu yük dengesizliği bir hücre içindeki çok yüklü bir makinadaki bazı parçaların diğer bir hücredeki yükü daha az olan bir diğer benzer makinaya yönlendirilmesi sureti ile giderilebilir. Her bir hücrenin geniş bir parça grubunu işleyebilecek şekilde tasarımı ile hücresel sistemlerin esneklik düzeyi geliştirilebilir. Dolayısı ile esnek hücrelerin tasarımı oldukça önemli bir amaç olmaktadır. Hücresel üretim sistemlerinin esnek olarak işletilebilmesi amacına yönelik tasarımı ile ilgili yayınlanmış çalışma adedi yok denecek kadar azdır [13].

Eğer hücreler tam olarak bağımsız değil ve parçalar atandıkları asıl hücreler haricinde diğer hücrelerde de işlenmek durumunda ise hücre tasarımındaki amaç hücreler arasında yüklerin taşınma sıklığının en düşük düzeyde olmasını sağlamaktır. Bu amacı gerçekleştiren değişik yöntemler geliştirilmiştir. Tahmin edilen üretim hacmi, işlem süreleri, makina kapasitelerindeki kısıtlar ve hücre boyutlarındaki sınırlama gibi gerçek sisteme ait özellikler; çok az sayıdaki hücre tasarımı yaklaşımlarının yapısında dikkate alınmıştır. Atelye tipi sistemlerin işlevsel esnekliği ile birlikte akış tipi üretimin verimlilik özellikleri gibi çelişen özelliklere sahip hücresel sistemlerin tasarlanabilmesi hususu genellikle araştırılmamıştır. Birbiri ile yakından ilişkili farklı tipteki makinaların oluşturduğu grup içinde benzer parçaların işlenmesi sureti ile akış tipi üretimdeki verimlilik sağlanabilmektedir. Fakat atelye tipi sistemin hücresel sisteme dönüştürülmesi ile üretim esnekliği oldukça azalmaktadır. Ayrıca Wemmerlöv ve Hyer [2] tarafından yapılan araştırmada hücresel üretimin uygulaması ile esnekliğin azaldığı belirtilmektedir. Talepteki ve ürün karışımındaki değişimleri karşılayabilecek derecede esnek ve akış tipi üretim kadar verimli olabilecek hücresel üretim sistemlerinin tasarlanmasına ihtiyaç vardır [13].

Parça ailelerinin oluşturulmasını dikkate almadan sadece karma hücresel yerleşim ve sanal üretim hücreleri kavramları üzerine kurulmuş yeni bir hücre tasarımı yaklaşımı için grafik teorisi ile matematik programlama yöntemlerinin karışımından oluşan bir model Irani ve diğerleri [14] tarafından geliştirilmiştir. Örtüşen grup teknolojisi

hücreleri, fonksiyonel düzenleme ve malzeme taşıma sistemlerinin bileşiminden oluşan hücresel sistemlerin tasarımı sureti ile aynı tip makinaları farklı hücrelere atama gereksiniminin daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir [14].

Hücrelerde üretilmek üzere uygun parçaların seçimi makinaların kullanım oranı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Bir parçanın işlenmesi için birden fazla sayıda uygun hücre olabilir ve bu parçanın işlenebileceği bu hücrelerden hangisine atanacağı ise hücreler arası yük dengesinin sağlanabilmesi bakımından çok önemlidir. Eğer parçalar hücrelere yük dengesini sağlayacak şekilde atanmaz ise bazı hücrelere ait bazı makinalar diğer makinalara göre daha fazla yükleneceği için sistemde yük dengesizliği oluşur [80].

Gupta ve Tompkins [49] talepteki ani artış koşulu altında hücresel üretimin dinamik davranışını benzetim tekniği ile inceledi. Seçenek iş akış hatlarının mevcut olması durumunda, talepteki ani artışın daha kısa süre ile etkisini gösterdiği sonucuna vardı. Seçenek iş akış hatlarının uygulanması ile üretilen parçaların işlenebileceği en az yüklü tezgahı seçme olanağı sağlanmakta ve gerekirse parçalar orijinal hücre dışındaki bir diğer hücre içinde seçilen uygun bir tezgahta işlenebilmektedir. Seçenek iş akış hatlarına izin verilmesi durumunda artan iş akışı esnekliğinin sağladığı faydalar ile oluşabilecek olumsuz etkiler birbirini dengelenmelidir. Partilerin ait oldukları hücreler dışına hareket edebilmesi sonucu üretim sistemindeki iş akışı daha yoğun olmaktadır. Ayrıca parçaların diğer bir hücredeki tezgahta işlenmesi halinde hazırlık zamanlarında artış olacaktır.

Sassanı [12] hücresel üretimin makina arızalarına duyarlı olması, kaynakların düşük kullanım oranı ve hücreler arası yük dağılımındaki dengesizlikler gibi olumsuz yönlerini belirtmiştir. Bu sorunlar hücresel üretimin hücreler arası etkileşime izin vermemesi ve ideal hücre oluşturma gibi standart ilkelerinden kaynaklanmaktadır. Bir kaynak ekipmanı üreten bir firmada bulunan gerçek hücrelerin modelleri benzetim tekniği ile geliştirilmiş ve hücre performansını (etkinliğini) arttırmak için hücreler içinde parti bölmeli işleme tekniğini kullanılmıştır. Burada pazardaki talebin oldukça dengeli olduğu kabul edilmiştir. Hazırlık sürelerini dikkate alan uygun performans kıstasları geliştirilmiştir. Değişik taşıma miktar (İng: transfer quantity) düzeylerinde denemeler yapılmak sureti ile parti bindirmeli (İng: batch overlapping) işlemenin

hücresel üretimin performansını iyileştirdiği, fakat bu iyileşmenin koşullara oldukça bağlı olduğu gözlenmiştir.

Ang ve Willey [126] hücreler arasındaki iş yükü transferi uygulamasını benzetim tekniği ile inceledi. Çalışmada geliştirilen modellerin yapısı gereği partiler işlenebilecekleri en az yüklü iş merkezine gidebilme serbestisine sahiptir. Yük akışının zamanlanması ve yönlendirilmesi için sekiz adet sezgisel kural geliştirilmiş ve bu sezgiseller düşünsel olarak tasarımlanmış değişik özelliklerdeki hücresel sistemlere uygulanmıştır. Çalışmada ortalama temin süresi (İng: mean job flow time), teslim gecikme süresi ortalamasının standart sapması (İng: standart deviation of mean job lateness) ve pozitif veya negatif gecikme süresi ortalaması (İng: mean job tardiness) olmak üzere üç farklı performans ölçütü kullanılmıştır. Hücreler arasında yüklerin taşınması ile birlikte malzeme taşıma maliyetinde artma, iş akışının daha karmaşık hale gelmesi, hücrelerde tam olarak işlenen parça oranının azalması gibi olumsuz etkiler gözlenmiş olmasına rağmen sistem performansında iyileşme sağlandığı belirtilmiştir.

Garza ve Smunt [127] atelye tipi üretimden hücresel üretime dönüşümün hangi işletme koşullarında uygun olabileceğini incelemek üzere benzetim modelleri geliştirmiştir. Makina adedinin ve kapasitesinin ekonomik bakımdan sınırlandırılması nedeni ile bağımlı hücreler durumundaki zorunlu olan hücreler arası akış özellikle incelenmiştir. Çalışmadaki modellerde her bir hücre akış tipi hücre şeklinde tasarlanmıştır. Farklı sistem parametrelerinin değişik değerler alması durumunda bir dizi bilgisayar benzetimi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hücresel üretimde hazırlık sürelerinin kısa olması nedeni ile ufak parti hacimli üretimin hücresel üretim için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir ve incelenen parametrelerin belirli değerleri için hücresel üretim sistemlerinin atelye tipi üretim sistemlerine göre daha üstün olduğu sonucu elde edilmiştir.

Garza ve Smunt [128] yukarıdaki çalışmalarını genişletmek sureti ile hücresel sistemlerin hücreler arası akışa olan duyarlılığını incelemiştir. İnceleme kapsamında ele alınan sistem parametrelerindeki bir dizi değişimin, hücresel üretim sistemlerinin performansı üzerindeki etkisini incelemek için kapsamlı benzetim deneyleri ve duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Garza ve Smunt [128] bu çalışmalarının

sonucunda; düşük işlem süresi değişkenliğine, ufak parti hacimlerine uzun hazırlık sürelerine ve ufak hazırlık süre oranlarına sahip hücresel sistemlerin hücreler arası akış düzeyindeki değişimlere karşı daha duyarlı olduğunu belirlemiştir.

Rajamani, Singh ve Aneja [80] tarafından hücre tasarımı için uygun parça makina spektrumunun seçimi ile ilgili matematik bir çerçeve ve yöntem geliştirilmiştir. İlgili çalışmada, özellikle, belirli ve sınırlı sayıdaki hücrelerde üretilebilecek parça çeşitleri ile talep miktarının optimum seçimi incelenmiştir.

Singh ve diğerleri [182] seçenek işlem planlarını değerlendirmek sureti ile hücresel üretimde yük dengesinin sağlanması ve toplam parça işleme süresinin en düşük düzeyde olması hedefine yönelik çok amaçlı bir model geliştirmiş ve ilgili çözüm yöntemlerini incelemiştir. Kekre [32] bir hücreye birden fazla sayıda parça ailesi atanabileceğini belirtmiş ve bir hücreye atanan parça tiplerinin sayısı ile ifade edilen ürün karışımındaki artışın bu hücrenin performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Gupta [183] hücre tasarımı sürecinde her bir parça ile ilgili seçenek iş akış hatlarını, üretim hacmini ve işlem sürelerini dikkate alan bir sezgisel yöntem geliştirmiştir.

Wemmerlöv ve Hyer [2] hücresel üretim ile ilgili araştırmaların devam etmesi gerektiğini vurgulamıştır. Hücrelerde yük dengesini sağlamanın her zaman olanaklı olamadığı ve parça ailelerinin çizelgelemesi ile hücresel üretimde esnekliğin nasıl sağlanabileceği konularının incelenmesi gereği bu araştırmacılar tarafından, özellikle, belirtilmiştir. Üretim esnekliği ve hücresel üretim sistemlerinde esneklik alanında faydalı olabilecek bazı çalışmalar Tablo 3.2.'de liste halinde verilmiştir.

Tablo 3.2 : Üretim esnekliği ve hücresel üretim sistemlerinde esneklik alanında faydalı olabilecek bazı çalışmalar

Çalışmayı Yapanlar	Yıl	Çalışmayı Yapanlar	Yıl
Jensen ve diğerleri [184]	1996	Özçelik ve İşlier [203]	2003
Jensen ve Malhotra [185]	1997	Nomden ve Slomp [204]	2003
Jensen [186]	2000	Sarker ve Li [205]	2001
Kannan [187]	1998	Shambu ve Suresh [206]	2000
Shafer ve Charnes [188]	1997	Slomp ve diğerleri [207]	2003
Albino ve Garavelli [189]	1998	Mak ve Wang [208]	2002
Choi ve Kim [190]	1998	Subash ve diğerleri [209]	2000
Albino ve Garavelli [191]	1999	Vakharia ve diğerleri [210]	1999
Song ve Hitomi [192]	1996	Kannan [211]	1997
Naiqi ve Gavriel [193]	1999	Kannan ve Ghosh [212]	1996a
Mahesh ve Sirinivasan [194]	2002	Kannan ve Ghosh [213]	1996b
Lozano ve diğerleri [195]	1999	Suresh ve Gaalman [214]	2000
Chen [196]	2003	Marcoux ve diğerleri [215]	2000
Assad ve diğerleri [197]	2003	Shafer ve Charnes [216]	1993
Irani ve Huang [198]	2000	Suresh [217]	1998
Jensen ve diğerleri [199]	1998	Selim ve diğerleri [218]	1998
Aiello ve Enea [200]	2001	Shambu ve diğerleri [219]	1996
Montreuil ve diğerleri [201]	1999	Shafer ve Charnes [220]	1995
Sofianopoulou [202]	1999		

4. HÜCRESEL ÜRETİMDE ÇİZELGELEME

4.1. Giriş

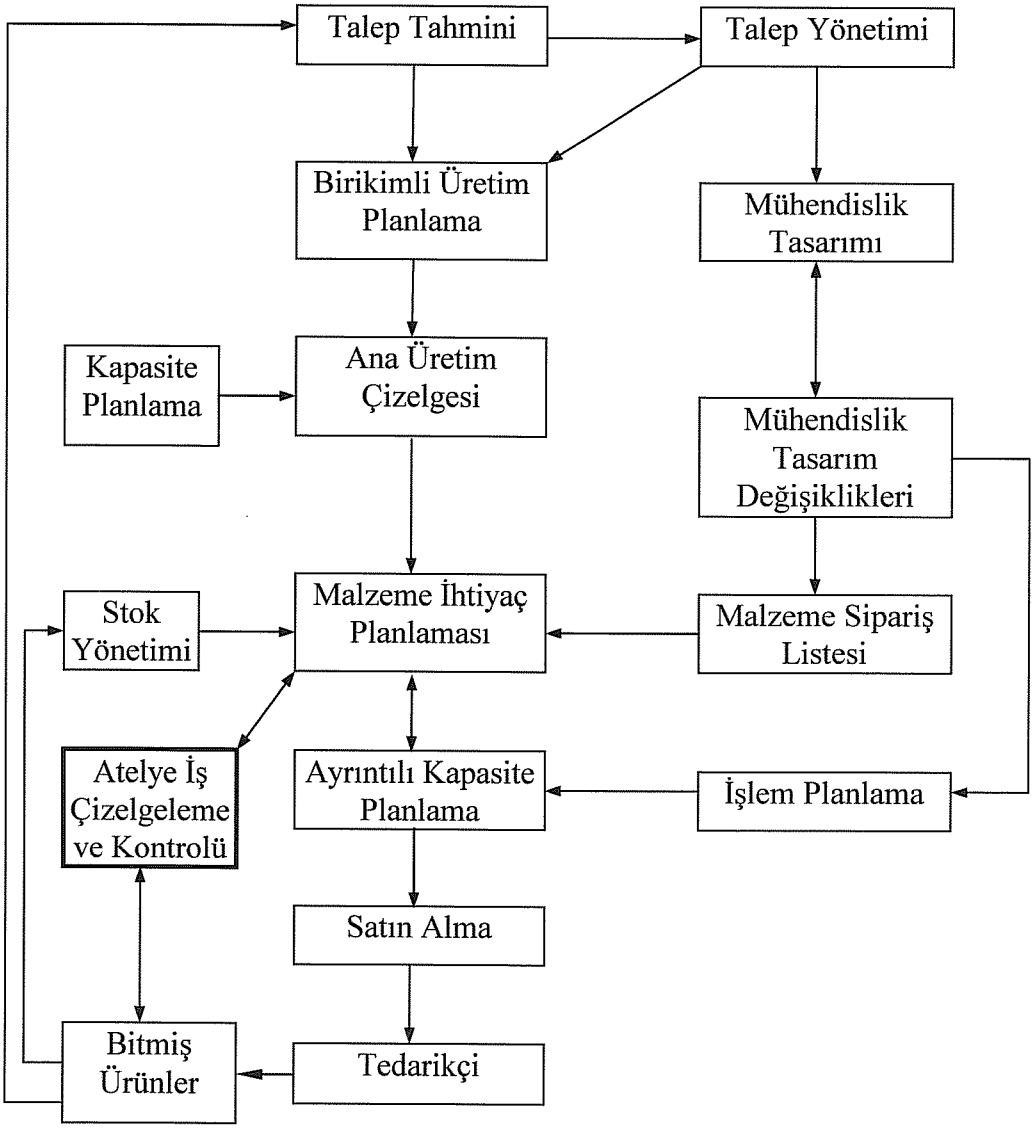
Hücresel Üretim Sistemleri veya grup teknolojisi üretim sistemlerinin çizelgelenmesi için uygulanan yöntem grup çizelgelemesidir. Hücresel üretimde çizelgeleme alanında yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. Hyer ile Wemmerlöv [3] ilgili çalışmanın üretim planlama ve kontrolu kısmında grup teknolojisinde çizelgeleme alanındaki çalışmaların listesini vermiş ve malzeme ihtiyaç planlamasının hücresel üretime uygulanabileceğini ifade etmiştir. Burbidge [45] hücresel üretimde üretimin planlanması ve kontrolu için önerilen periyot parti kontrolu (İng: period batch control, PBC) yaklaşımının faydalı ve zayıf yönlerini irdelemiştir. Sinha ve Hollier [130] hücresel üretimde çizelgeleme problemleri üzerinde yapılmış ilk çalışmalar ile hücresel üretim sistemlerinde parti hacminin seçimi, tedarik yönteminin seçimi ve çizelgeleme kuralının seçimi gibi üretim kontrolu problemlerini incelemiştir. Ayrıca hücresel üretimde çizelgeleme alanındaki ilk çalışmaların bir kısmı Ham ve diğerleri [28] tarafından da topluca sunulmuştur.

Grup çizelgeleme yöntemlerinin pek çoğu, hücresel üretim sistemlerinin özelliklerini dikkate almak sureti ile atelye tipi üretime ait çizelgeleme tekniklerinin belirli ölçülerde değiştirilmesi ve geliştirilmesinden türetilmiştir. Dolayısı ile bu bölümde geleneksel atelye tipi çizelgeleme teknikleri de sunulmuştur. Bu bölümde yapılan inceleme genel olarak üretim planlama, geleneksel atelye çizelgeleme ve hücresel üretimde çizelgeleme anlamındaki grup çizelgeleme alanlarını kapsamaktadır.

4.2. Üretim Planlama ve Kontrol

Üretim planlama ve kontrol üretim çevrimi süresince malzemelerin hareketlerinin yönetimi ve düzenlenmesidir [3]. Üretim planlama ve kontrol, üretim sistemlerinin

çevre ile uyumu olarak talep edilen ürünleri uygun zaman ve miktarda en düşük maliyet ile üretmesini sağlar [172]. Üretim kaynaklarının etkin kullanımı önemlidir ve bunu sağlamak için genelde birikimli (İng: aggregate) ve birikimsiz (İng: disaggregate) olmak üzere iki düzeyde planlama vardır. Bir üretim planlama ve kontrol sisteminin ana bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki bilgi akışı Şekil 4.1'de görülmektedir.



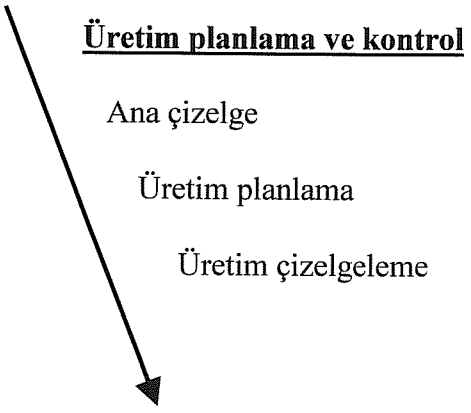
Şekil 4.1 : Bir üretim planlama ve kontrol sisteminin ana bileşenlerinin arasındaki ilişkiler

Birikimli planlar organizasyonun üst kademesinde yapılır ve haftalık, aylık ya da üç aylık iş gücü, üretim ve stok düzeyini belirlemede kullanılır. Birikimli planlar belirli zaman aralıklarında güncelleştirilir. Üretim maliyetleri, üretim düzeyindeki

değişimin maliyetleri, stokta bulundurma maliyeti ve geç teslim maliyeti gibi maliyetleri dikkate alan doğrusal programlama yöntemleri birikimli planların belirlenmesi için kullanılabilir [131].

Yıllık üretim seviyesinden bağımsız olarak, günlük üretim faaliyetlerinin düzenli olarak çizelgelenmesi gereklidir Bu nedenle birikimli planların birikimsiz hale dönüştürülmesi gerekir, yani birikimli planın her bir üretim periyotu için kullanılabilir hale dönüştürülmesi ile birikimli planla birikimsiz plan arasındaki bağlantı sağlanır [3,131,132]. Bu dönüşüm işlemi olmaksızın yüksek seviyeli birikimli planlar üretim faaliyetini düzenleyen çizelgeler haline dönüştürülemez.

Hiyerarşik planlama yaklaşımı, üretim planlama ve çizelgeleme için geliştirilen detaylı matematik modellerin yetersiz olması durumunda uygulanan bir seçenektir. Hiyerarşik planlama sisteminde kararlar kademeli olarak alınır. Birikimli kararlar ilk önce alınır ve bu kararlar daha sonraki aşamalarda verilecek detaylı kararların kısıtlarını oluşturur [131]. Daha sonraki aşamalarda alınan kararların sonuçları birikimli kararların etkinliğini değerlendirmek için geri beslenir. Hiyerarşik üretim planlama ve kontrol Şekil 4.2'deki gibi üç ana seviyeden oluşur [3,6]:



Şekil 4.2 : Üretim çizelgeleme hiyerarşisi

1. seviye - Ana Çizelge: Son ürünlere ait üretim miktarları ve zamanları ile üretim kapasitesinin ürün tiplerine göre dağılımı ve oranları belirlenmesini ifade eder. Dolayısı ile birikimli plan ayrıştırılmak sureti ile birikimsiz plana dönüştürülür.
2. seviye - Üretim Planlama: Belirli bir zaman dilimi içinde üretilmesi gereken parçaları ve bu parçalara ait üretim miktarlarını belirlemek sureti ile birikimli planın sonuçları uygulanabilir plan haline dönüştürülmesi ile ilgilidir.
3. seviye - Üretim Çizelgeleme: Çeşitli iş merkezlerinde üretilmesi gereken işlerin işlem zaman ve sıralarının belirlenmesini ifade eder.

Uzun ve kısa dönemli planlamalar için aşağıdaki noktalar dikkate alınır:

1. İşlenecek ürün gurubu ile ilgili ürünlerin oranlarını belirten ürün karışımı.
2. Parçaların en uygun işlem planları.
3. İşlerin yüklemesi ve iş akışı ile ilgili kararlar.
4. Parti tipi üretim yapılması halinde hazırlık zamanları.

4.2.1. Hücresel Üretimde Üretim Planlama ve Kontrol

Yukarıda açıklanan üretim planlama ve kontrol yapısı üzerinde uygun değişiklikler yapılmak sureti ile hücresel üretim sistemlerinde uygulanabilir. Yukarıdaki genel üretim planlama ve kontrol yapısını hücresel üretim sistemlerine uygulamak amacı ile yapılması gereken bu değişiklikler için grup teknolojisi tarafından sağlanan işlemler arasındaki benzerlik ve hazırlık sürelerindeki kısalma gibi faydaların dikkate alınması gerekir. Grup teknolojisinin üretim planlama alandaki uygulaması benzer işlemlere sahip parçaların belirlenerek parça ailelerinin oluşturulması esasına dayanır. Grup teknolojisinin, yukarıda belirtilen, üretim planlama faaliyetlerinde sağladığı kolaylıklar şunlardır:

1. Parça ailelerinin belirlenmesi sureti ile ürünlere ait iş akışının basitleşmesi ve standartlaşması sonucu planlama işlemi kolaylaşır.
2. İş akışı planlaması için grup teknolojisi kodlama ve sınıflandırma teknikleri kullanılarak planlama basitleşir.
3. Parça ailelerinin oluşturulması sureti ile grup çizelgeleme yöntemlerinin uygulanabilmesi olanağı planlamada kolaylık sağlar.

4. Hazırlık zamanlarını kısaltan takım ve tertibat sınıflarının tasarlanması, partilerin makinalardaki işlem sıralarını belirlenmesi, işlem planlarını hazırlanması, sayısal kontrollü tezgahlarda parça işleme sıraları ve tezgah programlarının belirlenmesi için grup teknolojisi prensiplerinden faydalanmak sureti ile planlamada kolaylık sağlanır.
5. Grup teknolojisi prensiplerinin uygulanması ile işyerinin ürün akışına göre düzenlemesi, malzeme yönetiminin ve kalite kontrolünün kolaylaşması, çalışanlardan oluşan takımlara devredilen sorumluluk ve hücre içi kontrol sonucu planlamada kolaylık sağlanır.

Aşağıda hücresel üretim sistemlerinde yaygın olarak uygulanan peryod parti kontrolu, malzeme ihtiyaç planlaması ve tam zamanında üretim gibi üretim planlama ve kontrol yapıları incelenmektedir.

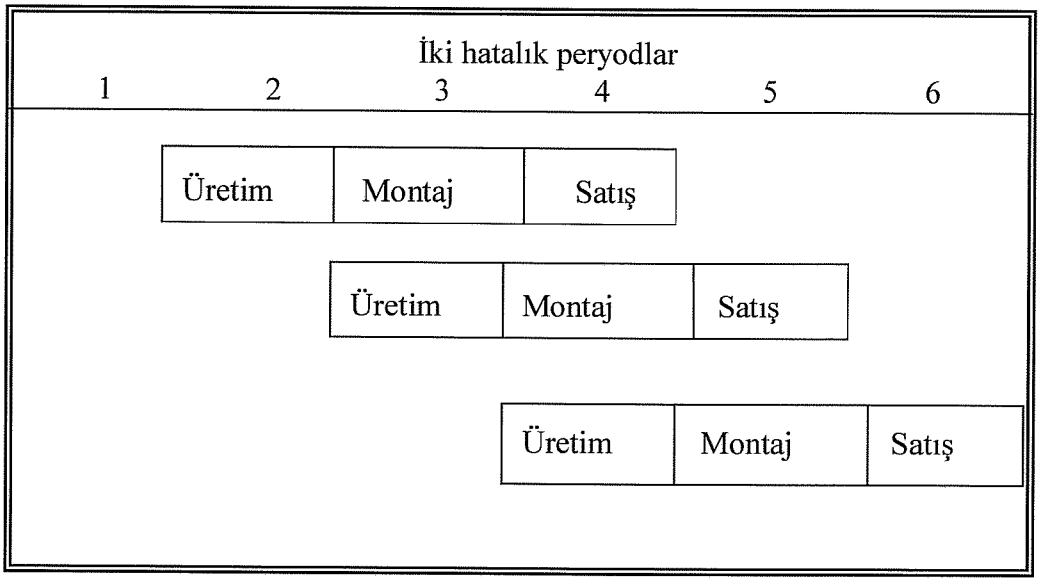
4.2.1.1. Peryod Parti Kontrolu

1970'lerin başlarında, Burbidge [45] hücresel üretimde üretim kontrolu için peryod parti kontrol (PPK, İng: period batch control, PBC) tekniğini geliştirdi. PPK sistemi tek çevrimli ve tek fazlı bir üretim planlama ve kontrol yaklaşımıdır. Tüm partiler aynı zaman uzunluğuna sahip frekans ya da çevrimde üretime alındığı için tek çevrimlidir ve tüm partiler aynı başlangıç ve bitiş ya da teslim tarihine sahip olduğu için tek fazlıdır. Sonuç olarak her bir çevrimin başlangıç ile bitiş zamanları aynı ve çevrim süreleri eşit uzunluktadır.

İşlerin sisteme alınması kontrol edilebilirse peryod parti kontrolu basit ve etkin bir çizelgeleme metodu olmaktadır. Peryod parti kontrolünde işlere ait işlemler teslim zamanlarına kadar tamamlanmak üzere düzenli çevrim aralıklıları ile başlatılır. Partiler farklı çevrimlerde üretilir ise iş yükünde önceden tahmin edilemeyen önemli dalgalanmalar olmaktadır. Yükteki bu değişkenlikler aileden aileye farklılık gösterir ve hücreler arasındaki yük dengesinde düzenli olmayan dalgalanmalara sebep olur. Tek çevrimli peryod parti kontrolu (PPK) bu yük dalgalanmalarını önler ve bazı önemli yararlar sağlar. Peryod parti kontrolu (PPK) tek çevrimli bir sistem olması nedeni ile üretim programının bir peryodunda yer alan her ürün için her bir aileye ait

standart sayıda parça bulunmasını ve her parça ailesine ait her makina üzerindeki yük düzeyinin de bir peryod için makina saati cinsinden standart olmasını gerektirir.

Burbidge [45] önce ortak bir peryod ile standart sipariş çizelgesi seçerek planlama çevrimini dört standart çizelgeye bölmüş ve bunu bir işletmeye uygulamıştır. Bu yöntemde önce 4. haftada müşterilere teslim edilmesi gereken siparişler ve 3. haftada montajlarının yapılması gereken parçalara ait üretim programı belirlenmiştir. Bu üretim programı aynı zamanda üretimin dengelenmesi için gerekli ilave üretimi de dikkate almaktadır. 2. haftada üretilerek 3. haftada montajı planlanan parça adedi peryod parti kontrolu üretim programının açılımına (İng: explosion) bağlı olarak birinci hafta içinde belirlenmektedir. Burbidge [45] grup teknolojisi ve periyot parti kontrolünün birlikte uygulanması sayesinde çizelgeleme probleminin basitleştiği ve kolaylaştığını belirtmektedir. Hyer ve Wemmerlöv [3] ise çevrimi; parça üretimi, montaj ve satış olarak üç kısımda düzenlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Peryod parti kontrolünün tek çevrimli yapısı

4.2.1.2. Malzeme İhtiyaç Planlaması ve Hücresel Üretimde Uygulanması

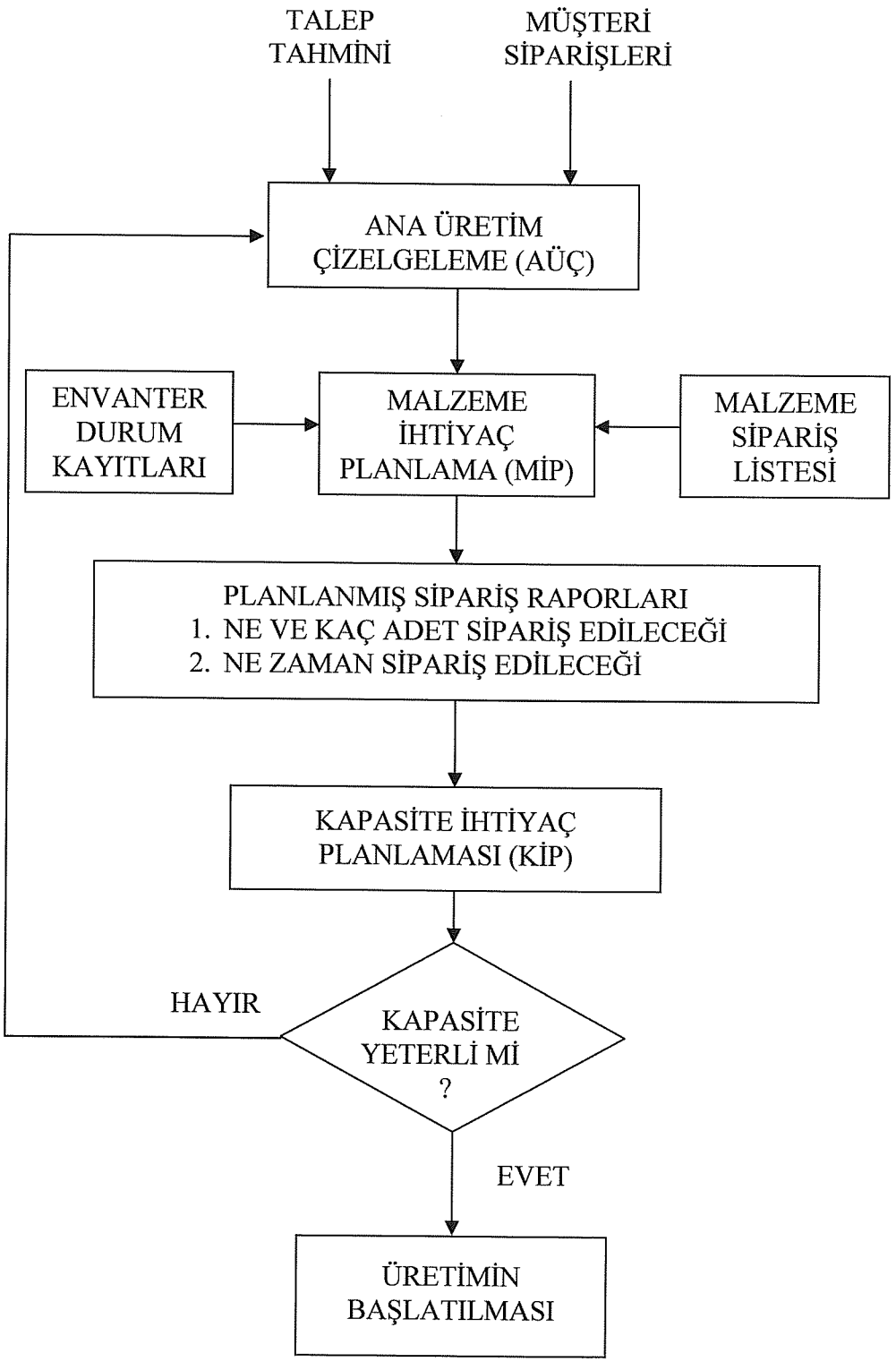
İtme sisteminin özelliklerini taşıyan malzeme ihtiyaç planlama (MİP) yöntemi 1960'lı yıllardan günümüze parti tipi üretimde uygulanmaktadır. Parti tipi üretim sistemlerinde başarılı olan malzeme ihtiyaç planlaması tekniğinin zamanla değişik

tipleri geliştirildi ve bilgisayar desteği ile etkinliği arttırıldı [41]. Kapalı çevrimli bir malzeme ihtiyaç planlaması sistemi temeli üzerinde yapılandırılmış olan üretim kaynak planlaması (ÜKP, İng: manufacturing resource planning) ise üretim, mühendislik hizmetleri, satış, satın alma, finansman gibi şirket alt sistemlerin uyumlu olarak birleştirildiği bir veri tabanı ve tümleşik bilgi sistemidir [173-175].

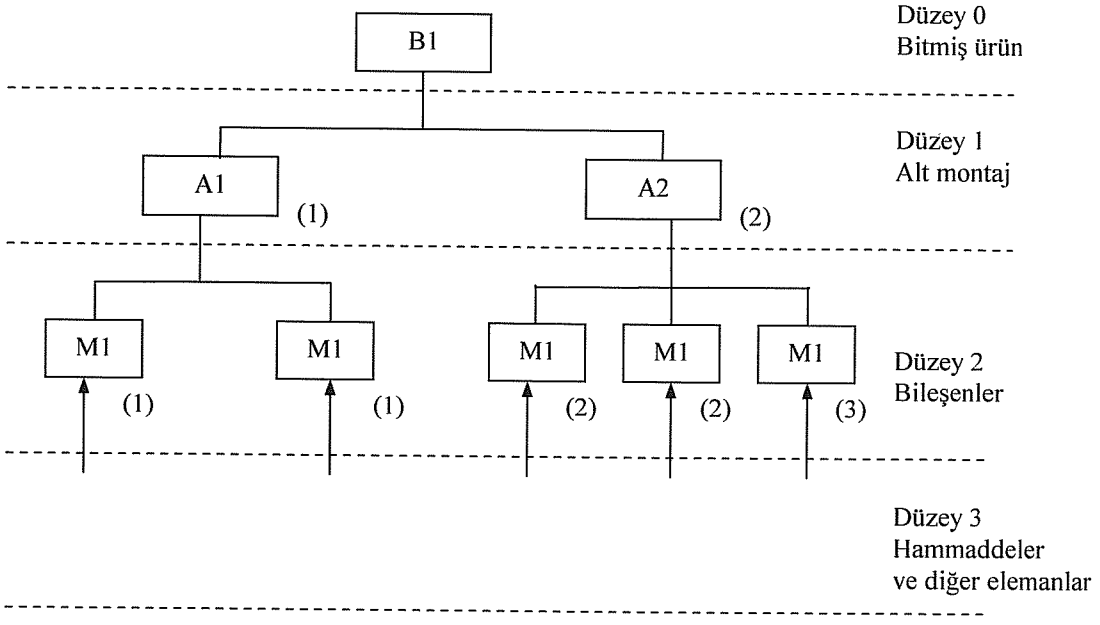
Geleneksel sipariş noktası sistemi genellikle bağımsız ürünlerin üretildiği sistemler için uygundur. Malzeme ihtiyaç planlaması ise otomobil ve takım tezgahı üretiminde olduğu gibi nihai ürünün parçaların hiyerarşik bir yapıda bir araya getirilmesi ile oluşturulduğu parti tipi kesikli üretimin planlanması ve kontrolunda uygulanır. Satışa hazır son ürünlerin talebine bağlı olarak bu ürünü oluşturan gerekli parça, malzeme ve yarı mamul talebinin belirlenebilmesi malzeme ihtiyaç planlamasının geliştirilmesindeki ana prensiptir. Bağımlı talep kavramı ilk defa 1965' de Orlicky [133, 134] tarafından son ürünün talebinin belirlenmesi sonucu üretim için gerekli parça ve malzeme miktarlarının kesin olarak hesaplanabileceği prensibi temelinde uygulandı.

Malzeme ihtiyaç planlaması bilgisayar tabanlı bir veri dokümantasyon sistemidir ve üretim planlama işlemine destek sağlar. Malzeme ihtiyaç planlamasının nasıl işlediği şematik olarak Şekil 4.4' de görülmektedir. Malzeme ihtiyaç planlamasının üç ana girdisi aşağıda açıklanmıştır [6, 28]:

1. Ana üretim çizelgesi (İng: master production schedule): Belirli bir zaman diliminde üretilecek son ürünler ile bunların miktar ve müşteri teslim tarihlerini belirten çizelge [135].
2. Malzeme listesi (İng: bill of materials) veya ürün yapısı (İng: product structure): Bir son ürünün üretimi için gerekli malzemeler ile miktarlarını gösteren liste (Şekil 4.5).
3. Envanter durum kayıtları (İng: inventory status records): Ana üretim çizelgesindeki ihtiyacın bir kısmını karşılayabilecek ve stokta mevcut olan malzemeler ile ilgili kayıtlar. Bu kayıtlar arasında malzeme tanımı, stoktaki malzemeler ile miktarları, siparişi yapılan malzemeler ile miktarları, parça temin süreleri ve parti hacmi gibi bilgiler yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Malzeme ihtiyaç planlamasının yapısı



Şekil 4.5 : Bir ürüne ait ürün ağacı ve malzeme ihtiyaç listesi

Malzeme ihtiyaç planlamasında ana üretim çizelgesi ve malzeme listesi kullanılarak son ürünler ve ilgili parçaları için gerekli miktarlar saptanır. Daha sonra envanter kayıtlarına göre stoklarda mevcut olan parçaların miktarları bulunan bu değerden çıkarılmak sureti ile üretilmesi gereken parçalara ait gerçek adetler bulunur. Malzeme listesi, işlem artı hazırlık artı kuyrukta bekleme sürelerinden oluşan işlemler arasındaki tahmini süreler, ön montaj ve son montaj bilgileri bilgisayardaki dosyalarda yüklüdür. Her parçaya ait daha önce belirlenen üretim miktarları ve parça üretim sürelerinin tahmini kullanılarak ürün teslim tarihlerinden itibaren geriye doğru çizelgeleme yöntemi ile her bir iş merkezine ait zaman fazlı üretim çizelgeleri ya da planlanmış sipariş raporu bilgisayar yardımı ile düzenlenir. Sonuçta tarihlere göre hangi parçalara ihtiyaç olduğu belirlenir ve düzenlenen bu üretim çizelgesi ya da planlan sipariş raporu ilgili iş merkezlerinde belirli bir zaman birimi (genellikle bir hafta) içinde tamamlanması gereken parçaları gösteren bir listedir. Malzeme ihtiyaç planlamasındaki ana hedef iş merkezlerinde giren ve çıkan işlerin akışını kontrol etmektir [6].

Malzeme ihtiyaç planlamasının bir diğer safhası da, mevcut sınırlı kapasite kısıt'ının değerlendirilerek, planın uygulanabilme olanağının belirlenmesidir. Bu ise planın ait olduğu zaman dilimi içindeki üretim ihtiyacının gerektirdiği üretim kapasitesinin hesaplaması sonucu bulunan miktarın mevcut kapasite miktarı ile karşılaştırılmasını sağlayan kapasite ihtiyaç planı (İng: capacity requirements plan) uygulaması ile sağlanır [6, 28]. Eğer mevcut kapasite üretim gereksinimini karşılayamaz ise fazla mesai, ek vardiya, taşeron kullanma gibi önlemler dikkate alınmalıdır. Bu önlemler uygulandığı zaman bile kapasite gereksiniminin karşılanamadığı durumda da ana üretim planının uygun şekilde yeniden düzenlenmesi veya mevcut işletme kapasitesinin genişletilmesi düşünülmelidir. Eğer kapasite ihtiyaç planı mevcut kapasite üretim için gerekli kapasiteden fazla ise plan uygulanır ve çizelgeye uygun olarak iş emirleri atölyeye gönderilmek sureti ile üretim başlatılır. İtme sisteminin kuralları gereği üretilen partiler girdi ürünlerden son ürüne kadar plan üzerinde detaylı olarak gösterilir. Malzeme ihtiyaç planlaması genellikle güncelleştirilmiş ana üretim planı ve tamamlanacak işlerin listesi (İng: work completion list) takip edilerek her hafta ya da iki haftada bir uygulanır. Malzeme ihtiyaç planlamasının hedefi, gerekli tüm parçaların, üretimin her aşamasına zamanında ulaştırılmasının sağlanmasıdır.

Grup teknolojisindeki işlemler arasındaki benzerlik ve hazırlık sürelerindeki kısalma ile malzeme ihtiyaç planlamasının zaman fazlı üretim çizelgesinin faydalı yönlerini birleştirmek için grup teknolojisi ve malzeme ihtiyaç planlaması birlikte uygulanabilir [28]. Hücresel üretimde üretim planlama ve kontrol için grup teknolojisi ve malzeme ihtiyaç planlamasının birlikte uygulanmasından oluşan yöntemler Singh ve Rajamani [5], Hyer ve Wemmerlov [3], Sato ve diğerleri [136] ile Ham ve diğerleri [28] tarafından incelenmiş ve geliştirilmiştir.

4.2.1.3. Tam Zamanında Üretim Yaklaşımı ve Hücresel Üretim

Tam zamanında üretim felsefesinin amacı toplam üretim seviyesini en düşük düzeye indirmek şeklinde ifade edilebilir [5]. İmal edilmesi gereken ürünlerin uygun miktarlarının uygun zaman ve yerde hazır olması tam zamanında üretim yaklaşımının uygulanması sureti ile sağlanır. Kalite, üretkenlik, verim ve iletişimin iyileşmesi ile maliyet ve israfın azalması tam zamanında üretimin sağladığı en önemli faydalardır

[24]. Tam zamanında üretim felsefesine göre stoklar israf olarak kabul edilir ve stokların en düşük seviyede tutulması amaçlanır [5].

Tam zamanında üretimin uygulanabilmesi için üretim hücrelerinin mevcut olması gerekir [17]. Tam zamanında üretimin bir uygulaması kanban sistemidir [41]. Kanban sisteminde iş merkezleri arasında kanban denilen kartların taşıdığı iletişim işaretleri ile gerekli miktardaki parçalar üretilmek üzere iş merkezleri arasında hareket eder. Bu sistem talep ile üretimi birleştirilir ve talep edilen miktar kadar üretim yapılır. Örneğin, son montaj hattı talep oranına eşit ya da çok yakın bir oranda bir önceki işlemin gerçekleştirdiği iş merkezine kanban kartlarını yollamak sureti ile parça sipariş eder. Bu neden ile tam zamanında üretim yaklaşımı çekme tipi bir üretim planlama ve kontrol sistemi yapısına sahiptir [41].

Malzeme ihtiyaç planlaması kısa periyotlarla ve tek bir parti düzeyinde kullanılırsa çekme sisteminin uygulaması olan tam zamanında üretim sistemine (TZÜS, İng: just in time, JIT) benzer. Bu nedenle malzeme ihtiyaç planlaması ve tam zamanında üretim sistemini birlikte uygulayabilmek olanaklıdır. Bu uygulamalara örnekler şunlardır; mikro kanban veya bilgisayar destekli tam zamanında üretim sistemi, eşzamanlı malzeme ihtiyaç planlaması (İng: synchro MRP) ve periyodik çekme sistemi (İng: periodic pull system).

4.3. Üretim Çizelgeleme

Üretim planlama ve kontrol hiyerarşik yapısının, Şekil 4.2 'deki, en alt düzeyinde yer alan üretim çizelgeleme üretim sistemlerindeki faaliyetlerinin zamanlanması ile ilgilidir. Üretim sistemlerinde çizelgeleme üretim faaliyetlerinin ne zaman ve nerede icra edileceğine karar verilmesidir. Çizelgeleme ile ilgili karar adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Yükleme: Yükleme işlerin iş merkezlerine dağıtılmasıdır. Yükleme işleminin icra edilmesi sonucunda hangi iş merkezlerinde hangi işlerin yapılması gerektiğine karar verilir. Bu aşamada işlemlerin icraat sırası belirlenmez. Aynı işlemin farklı iş merkezlerinde gerçekleştirilebilmesi ve aynı üretim sisteminde birden fazla işin işlenebilmesi durumunda yükleme probleminin çözümü zorlaşır. Bu durumda işler iş merkezleri kapasitesini aşmamak koşulu

ile tamamlanmak üzere makinalara atanır. Yüklemenin diğer amaçları ise iş merkezleri arasında işlerin dengelenmesi ya da herhangi bir makinadaki maksimum yükün minimize edilmesi olabilir.

2. İş sıralama: İşlerin makinalara yüklenmesinin ardından işlerin sıralanması gerekir. İş sıralama iş merkezlerinde işlerin hangi sırada işleneceğinin belirlenmesidir. Genelde en kısa işlem zamanı, ilk giren ilk çıkar, erken teslim zamanı gibi öncelik kuralları kullanılır. Öncelik kuralları belli bir kıstası sağlamak üzere işlerin sistem içindeki akışını belirler.
3. Çizelgelemenin güncelleştirilmesi: Üretim sistemlerinin dinamik ortamı nedeni ile çizelgelerin genellikle güncelleştirilmesi gerekmektedir. Üretim koşullarında değişimler oldukça, yükleme ve iş sıralama işlemi yeniden değerlendirilmeli ve gerekli değişikler yapılarak uygulanmalıdır. Fakat çizelgeleme sisteminin, iş önceliklerinin yeniden planlanabilmesi için elverişli olması anlamında, esnek olmasına karşın, bu esneklik zaman ilerledikçe azalır ve partilerin tamamlanması için arta kalan işlem sayısı azaldıkça çizelgelemede değişiklik yapmanın pratik bir anlamı kalmaz [133,134].

Çizelgeleme kuralları, genelde üretim sistemlerindeki iş akış yapısının özelliklerinden faydalanmak sureti ile geliştirilir ve iş akış yapısına göre üretim sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [32]:

- Açık sistem: işlerin operasyonlarının sırası önemli değildir, yani işin operasyonları herhangi bir sırada olabilir.
- Akış tipi sistem: işlerin öncelik sırası belirlidir ve her iş aynı öncelik sırasına sahiptir. Akış tipi sistemde işler her makinada aynı sırada işlenir.
- Atelye tipi sistem: akış tipinden farklı olarak işler aynı öncelik sırasına sahip değildir, farklı işler farklı öncelik sırasına sahip olabilir.

4.4. Geleneksel Atelye Çizelgeleme

Hücresel üretimdeki çizelgeleme yöntemlerinin pek çoğu hücresel üretim sistemlerinin özelliklerini dikkate almak sureti ile atelye tipi üretime ait çizelgeleme tekniklerinin belirli ölçülerde değiştirilmesi ve geliştirilmesinden türetilmiştir.

Dolayısı ile bu kısımda geleneksel atelye tipi çizelgeleme teknikleri incelemiştir. Ayrıca geleneksel atelye çizelgeleme üzerine yapılan çalışmaların incelenmesi, hücresel üretimle ilgili olan bu çalışmada kuyruktaki işlerin sıralanması ile ilgili kuralların seçimi açısından da yararlıdır.

Atelye çizelgeleme problemi çeşitli çizelgeleme problemleri arasında en karmaşık ve zor olanıdır. Atelye çizelgeleme alanında yayınlanmış çok sayıda çalışma vardır. Graves [138] çeşitli çizelgeleme problemlerini incelemiştir. Baker [138], Gupta [139], Lageweg ve diğerleri [140], Day ve Hottenstein [141] ile atelye çizelgeleme konusunu inceleyen önemli araştırmacılar arasındadır.

Atelye tipi üretim sistemi statik veya dinamik sistem olarak modellenebilir. Statik sistem halinde işler biriktirilerek belli zaman aralıklarında çizelgelenir. İşler bir defa çizelgelendikten sonra, çizelge değiştirilmeden uygulanır. Dinamik sistemlerde ise işler atelye ya da makinalara ulaştıkça çizelgelenir. Bu sistemlerdeki esneklik makina kuyruğundaki işlerin sıralarının ilgili kuyruk kuralına göre sürekli değişmesine neden olur [142].

Eğer atelye statik sistem olarak modellenirse, çizelgeleme yöntemleri kombinasyonsal matematik programlama ve Monte Carlo örneklemesi olarak üç sınıfa ayrılır. Kombinasyonsal metotlar işlerin değişik şekillerde çizelgelenmesi ile değişik kombinasyonların incelenmesi esasına dayanır. Johnson [143] kuralları kombinasyonsal çizelgeleme için iyi bir örnektir [138]. Kombinasyonsal yöntemler üç ya da daha az sayıda makina olan ufak problemler için uygundur. Bunun nedeni permütasyon sayısının faktöriyel olarak artması ve tüm olası kombinasyonları incelemenin olanaksız derecede zor olmasıdır. Kombinasyonsal metotlardaki bu gibi zorluk ve sınırlamalar nedeni ile son yıllarda bu alanda fazla çalışma yapılmamıştır.

Çizelgeleme probleminin tamsayılı programlama gibi matematik programlama teknikleri ile çözümü olanaklıdır. Fakat ufak ölçekli problemler durumunda bile, çözüm için aşırı derecede bilgisayar zamanı ve hafıza kapasitesi gereksinimi nedeni ile matematik programlamanın uygulama alanı kısıtlıdır [139]. Ayrıca gerçekçi olmayan varsayımlar gerektirmesi de matematik programlama modelinin sunduğu olanakları kısıtlamaktadır.

Eğer atelye tipi üretim sistemi dinamik bir sistem olarak modellenirse, çizelgeleme yöntemleri kuyruk teorisi, sezgisel sıralama kuralları ve Monte Carlo benzetimi yöntemleri olarak üç sınıfa ayrılır. Analitik kuyruk teorisinde işlerin çeşitli şebekeler (ağlar) şeklinde tasarımı nedeni ile küçük atelyelerin dahi modellenmesi oldukça karmaşık olmaktadır [144]. Kuyruk teorisi işlerin sisteme gelişleri arasındaki sürenin dağılımı, işlem sürelerinin dağılımı, kuyruk kuralları ve iş akışı ile ilgili katı varsayımları gerektirir. Ayrıca kısıtlayıcı varsayımların yapılması ile kuyruk teorisinin uygulanabilmesi durumunda dahi atelye tipi üretimin karmaşık yapısı kuyruk teorisinin uygulanmasını kısıtlamaktadır. Kuyruk teorisinin kullanılabileceği bu kısıtlı modellerin daha kapsamlı ve genel olarak incelenebilmesi için sezgisel sıralama kurallarının kullanılması daha uygun olmaktadır.

Sezgisel sıralama kurallarının analizi için bilgisayar ile Monte Carlo benzetimi en uygun yöntemdir. Bunun en önemli sebebi ise aşağıda sıralanan 5 ana parametrenin stokastik ya da olasılıklı yapısıdır:

- Gelişler arasındaki süre (dağılımı, ortalaması, varyansı).
- İşlem süresi (dağılımı, ortalaması, varyansı).
- Atelyenin boyutları (makina sayısı, makina kompozisyonu).
- İşlerin akış hatları (olasılıklı, önceden belirli)
- Teslim süresinin tespiti (dağılımı, ortalaması, varyansı)

Performans kriterleri sıralama kurallarının etkinliğini belirlemek için kullanılır. En çok kullanılan performans kriterleri aşağıda verilmektedir;

- İş akış süresi (toplam, ortalama, varyans).
- Makina kullanım oranı (yüzde).
- Geç teslim süresi (toplam, ortalama, varyans)
- Geç ya da erken teslim süresi (toplam, ortalama, varyans)

Sıralama kuralları işlerin belli bir makinada işlenme sıralarını belirler. Sıralama kurallarının çoğu işin tek bir karakteristiğine bağlıdır ve bunlara "basit iş kuralları" denir. Eğer bu kurallar işin çeşitli özelliklerinin karışımından oluşur ise bunlara da "karmaşık iş kuralları" denir. Sıralama kurallarına temel oluşturan çeşitli özellikler aşağıda verilmektedir:

- İşin işlem süresi.
- İşin teslim süresi.
- İşin operasyon sayısı.
- İşin maliyeti.
- İşin hazırlık süreleri.
- İşin sisteme geldiği an.
- İşin akış hattı üzerinde bulunan bir sonraki makina veya işlem.

Üretim sistemleri ile ilgilenen bazı araştırmacılar çeşitli kuyruk sıralama kurallarını bilgisayar benzetimi tekniği ile inceledi. İşlerin sisteme geliş dağılımı, iş istasyonlarının sayısı, işlem zamanı dağılımı ile ilgili çok sayıda değişik tasarımların mümkün olması nedeni ile farklı sıralama kurallarının karşılaştırılması zordur. Ayrıca farklı sıralama kurallarını karşılaştırmak için farklı performans ölçütleri kullanılması da sıralama kurallarının karşılaştırılmasını zorlaştıran bir diğer nedendir. Sezgisel sıralama kurallarını karşılaştırmada sık sık kullanılan performans kriterleri aşağıda görülmektedir:

- Ortalama akış ya da temin süresi (işlerin sistemde kaldığı ortalama süre).
- İşlerin gerçek tamamlanma tarihi ile teslim tarihi arasındaki fark ya da gecikmenin pozitif, sıfır veya negatif değerleri alabildiği ortalama gecikme (İng: lateness).
- Teslimi geciken işlerin tamamlanma tarihi ile teslim tarihleri arasındaki farkın sıfır veya pozitif değerleri alabildiği ortalama teslim gecikmesi (İng: tardiness).
- Geciken işlerin üretilen toplam iş sayısına oranı şeklinde tanımlanan geciken işlerin oranı.

Atelye tipi üretim sistemlerinde iş sıralama kurallarının benzetimi ile ilgili çok sayıda araştırma vardır. Benzetim deneyleri uygulamak sureti ile iş sıralama kurallarının bir üretim sisteminin performansı üzerindeki etkisi belirlenebilir [176]. Panwalker ve Iskander [142] bu alanda yapılan 36 çalışmayı inceledi, varsayımlardaki, simülasyon parametrelerindeki ve sıralama kurallarındaki ufak değişimlerin performans ölçütlerinin değişik sonuçlar vermesine neden olduğu sonucuna vardı. Bazı kuralların ise tek makina ve tek operatör ortamında özel bir kritere göre en iyi performansı

sağladığı kanıtlanmıştır [138]. Her koşulda ve her performans kriterine göre en iyi performansı gösteren bir sezgisel prosedür bulunmamaktadır, fakat bazı kurallar sistem parametrelerinin olanaklı her kombinasyonu için bazı performans kriterlerine göre devamlı aynı sonucu vermektedir [145]. Bunlara örnek olarak, en kısa işlem süresi gibi, işlem süresine bağlı kuralların kısa ortalama akış süreleri sağladığı belirlenmiş olmak ile birlikte bazı işlerin çok geç teslimine ve akış süreleri değişkenliğinin fazla olmasına neden olduğu görülmüştür. Diğer taraftan en yakın teslim tarihli işi öncelikle seçen En Erken Teslim Tarihi (EETT) kuralı gibi teslim tarihine dayalı kurallar teslim tarihi ölçütüne göre iyi performans gösterir ve değişkenliği ya da varyansı ufaktır. Fakat bu kuralların akış zamanı ölçütüne göre performansları ise kötüdür. İşlem süresi veya teslim tarihine bağlı olmayan Önce Gelen Önce Çıkar (ÖGÖÇ) gibi kurallar performans kriterlerinin birçoğu açısından işlem süresi veya teslim tarihine bağlı kurallara göre daha kötü sonuç vermekle birlikte bu kuralların değişkenlikleri ya da varyansları daha ufaktır. Sonuç olarak Kısa İşlem Zamanı Önce (KİZÖ) kuralı ortalama akış süreleri açısından en iyi performansı gösteren baskın bir kuraldır. Teslim tarihine dayalı kurallar teslim tarihi kriterine göre en iyi sonucu verir. Fakat bazı özel durumlarda Kısa İşlem Zamanı Önce (KİZÖ) kuralı daha etkindir [145]. Bazı araştırmacılar Önce Gelen Önce Çıkar (ÖGÖÇ) gibi bazı kuyruk kurallarının statik olduğunu kabul eder. Aslında işlerin kuyruğa girmesi ve kuyruktan çıkması ile kuyruktaki işlerin sırası değişmediği için bunlar statik kurallardır.

Genel olarak işlem ve işleme sürelerine bağlı kurallar Sisteme İlk Gelen Önce (SİGÖ), Kuyruğa İlk Gelen Önce (KİGÖ) v.s gibi kurallara göre daha iyi performans değerleri verir. Kısa İşleme Zamanı Önce (KİZÖ) ve Kısa Operasyon (işlem) Zamanı Önce (KOZÖ) kurallarının daha iyi sonuç vermesi için dönüşümlü kurallar uygulanabilir. Bu dönüşümlü kurallar KİZÖ ve KOZÖ gibi birincil kuralların belli zaman aralıklarında SİGÖ ve KİGÖ gibi ikincil kuralları belli bir süre için uygulayarak tekrar birincil kurallara dönülmesi şeklinde uygulanır. Bu dönüşüm belli zaman aralıklarında periyodik olarak devamlı uygulanır. Dönüşümlü kurallar literatürde budama (İng: truncation) kuralları olarak da isimlendirilmektedir. Dönüşümlü kuralların uygulanması ile KİZÖ ve KOZÖ kurallarının daha uzun işleme (İng: process) ve işlem (İng: operation) süresine sahip partilerin sistemde

gereğinden daha uzun süre kalmalarına neden olması önlenerek, sistemi daha kısa sürede terk edebilmeleri sağlanır.

Geliştirilen diğer sezgisel kurallar maliyet, hazırlık süresi, makinaların durumuna bağlı kurallar ve çeşitli karma kurallardır. Bazı sıralama kuralları ise atelyenin durumuna bağlı olup, işlerin karakteristiğine bağlı değildir ve bunlara "makinaya bağlı kurallar" denir. Bu kurallar dinamik çizelgeme kuralları olup sistemin dinamik modeli ile oluşturulurlar. Makinaya bağlı kurallardan bazıları, atelyedeki yük dengesini sağlamak için seçenek iş akış hatları üzerine kurulmuştur ve diğer bir kısım makinaya bağlı kurallar ise ileride oluşabilecek darboğaz veya düşük makina yüklenmelerini önlemek amacına yöneliktir. Sırlama kuralları hakkında kapsamlı bilgi için, Blackstone ve diğerleri [144], Panwalker ve Iskander [142], Baker [138], Day ve Hottenstein [141] gibi araştırmacılar tarafından yapılan ilgili çalışmalardan faydalanılabilir.

4.5. Hücresel Üretimde Çizelgeleme : Grup Çizelgeleme

Hücresel Üretim Sistemleri veya grup teknolojisi üretim sistemlerinin çizelgelenmesi için uygulanan grup çizelgeleme alanında yapılmış araştırma sayısı oldukça azdır. Önceki kısımlarda incelenmiş olan geleneksel atelye tipi çizelgeleme teknikleri üzerinde hazırlık işlemleri arasındaki benzerlikleri dikkate alan bazı değişiklikler yapılmak sureti ile uygun grup çizelgeleme tekniklerinin geliştirilebileceği Ham ve diğerleri [28] tarafından gösterilmiştir.

Grup çizelgeleme problemlerinin genel amacı uzun hazırlık sürelerinden sakınmak ve kısa hazırlık sürelerinin sağladığı faydalardan yaralanmak şeklinde ifade edilebilir. Grup çizelgeleme yöntemleri genellikle aşağıdaki gibi iki kısımdan oluşur:

1. Her bir alt aile içindeki işlerin sıralanması,
2. Alt ailelerin arasındaki sıralamanın belirlenmesi.

Hücresel üretimde amaçlanan performansın gerçekleştirilmesi, atelye tipi üretime göre, daha kolaydır ve üretim çizelgeleme grup teknolojisinin uygulanması ile basitleşir [1]. Makinaların hücrelerde gruplanması çizelgelenecek makina merkezi sayısını azaltır ve parçaların aileler halinde gruplanması da çizelgelenecek parça

sayısını azaltır. Hücresel üretimin çizelgelenmesinde aşağıda açıklanan makina yükleme ve hücre yükleme şeklindeki iki genel yükleme tipi uygulanabilir [147].

Makina Yükleme: Hücreye gelen her parti önce hücre önündeki ortak kuyrukta bekler ve makina serbest kaldığı zaman kuyruktaki işlerin öncelik kuralına göre uygun parti hazırlık işlemi yapılarak makinaya yüklenir. Hazırlık işleminin tamamlanması ile parti makinada işlenmeye başlar. Eğer iş akış yapısı karmaşık ise makina yükleme uygulamalarında bir parti alt partilere bölünmeden tümü ile işlenir. Fakat iş akış düzgün ise parti bölmeli işleme uygulanabilir. Daha sonra işlemi tamamlanan partiler bir sonraki makinaya taşınır. Eğer makina kuyruğunda ve üzerinde bekleyen bir parti yok ise makinadaki hazırlık işlemi tamamlanır ve parti makinaya yüklenerek işlenir. Aksi halde parti ilgili makinanın kuyruğa girer ve kuyruktaki öncelik kuralına göre işlenmek üzere bekler. Makina yükleme uygulamasında birden fazla parti aynı hücre içinde aynı anda işlenebilir.

Hücre yükleme: Hücre girişindeki kuyrukta bekleyen partiler alt partilere bölünür ve parti bölmeli işleme uygulanır. Bir alt partinin işlem süresi ait olduğu partinin işlem süresi ile orantılıdır. Bir alt parti bir makinada işlenince iş akış hattı üzerinde belirlenmiş olan bir sonraki makinaya işlenmek üzere yollanır. Partiye ait diğer alt partilerde işlendikçe hücre içinde ilerler. Bu şekilde aynı partiye ait alt partiler iş akış hatları üzerindeki makinaların birçoğu ya da hepsi üzerinde aynı anda işlenir. Bir sonraki partiye ait alt partiler ancak bir önceki partiye ait son alt partinin iş akış hattı üzerindeki son makinada işlenmesi tamamlanınca hücreye alınarak işlenmeye başlanır. Bu durumda hücre içinde aynı anda bölünerek işlenen parti sayısı sadece bir adet olmaktadır. Hücre yükleme hazırlık sürelerinden tasarruf etme olanağı sağlar. Alt partilere bölerek parti bölmeli işleme makinaların kısa sürede serbest bırakılması ile kuyruktaki partilerin daha sık ve kısa aralıklarla işlenmek üzere hücreye gönderilmesini sağlamaktadır.

Hücresel üretimde çizelgeleme alanındaki ilk çalışmaların bir kısmı Ham ve diğerleri [28] tarafından topluca sunulmuştur. Fakat hücresel üretimde çizelgeleme ile ilgili az sayıda çalışma mevcuttur. Bu alandaki çalışma sayısının az olmasının en önemli nedeni ise her bir üretim hücresini ufak bir akış tipi sistem olarak varsaymak sureti ile uygun ve basit çizelgeleme kurallarının geliştirilebileceği düşüncesidir. Hücresel

üretimde çizelgeleme yöntemi incelenirken, sistemin aşağıda belirtilen özelliklerini dikkate almak gerekir [28,138]:

1. Tek aşamalı (İng: singlestage) veya çok aşamalı (İng: multistage) olarak üretim yapan hücreler.
2. İşlerin sisteme statik veya dinamik olarak gelmesi.
3. Atelye tipi veya akış tipi hücreler.

Tek aşamalı çizelgeleme problemindeki modellerde her bir hücrenin tek bir makinadan oluştuğu varsayılır. Eğer araştırmanın amacı, hücreyi oluşturan makinaların etkisini izole ederek, hücrenin genel performansını incelemek ve anlamak ise her hücre ayrı bir makina şeklinde ele alınabilir. Hücreler içindeki her bir makinanın etkisinin incelenmesinin oldukça karmaşık olması halinde bu basitleştirme yapılabilir. Çok aşamalı grup çizelgeleme ise işlerin hücre içinde her bir makinada işlenmesini dikkate alan bir model ve inceleme yöntemidir.

İşlerin adedi ve üretime hazır olduğu zamanlar belirli ise statik çizelgeleme problemi şeklinde bir inceleme yapılabilir. Bu durumda tüm işler eşzamanlı olarak işlenebilecek şekilde hazır bulunmaktadır. İşlerin sisteme girişleri zaman içine dağılmış olan olasılıklı bir yapıda ise problem dinamik çizelgeleme şeklinde incelenir. Hücresel sistemlerde çizelgelemenin dinamik bir model ile incelenmesi için sezgisel sıralama kurallarının kullanılması ve bu kuralların bilgisayar ile benzetimi en uygun yöntemlerdir.

Çok aşamalı grup çizelgeleme probleminde işler hücre içindeki makinalarda sıra ile işlenir. İşlerin makinalarda işlenme sıraları üretim teknolojisi ile belirlenmiştir. Her bir işin makinalarda işlenme sırası aynı ise üretim hücresi akış tipi (İng: flow shop) hücredir. Bu tip bir hücrenin çizelgelenmesi akış tipi çizelgeleme (İng: flow shop scheduling) olarak adlandırılır. Değişik tipteki işlerin makinalardaki teknolojik işlem sıraları genelde birbirinden farklı ise üretim hücresi atelye tipi (İng: job shop) hücre olarak tanımlanır.

4.6. Tek Aşamalı Grup Çizelgeleme Problemi

Tek aşamalı grup çizelgeleme probleminde her bir hücre tek bir makina gibi ele alınarak modeli oluşturulur ve amaç aileler arasındaki en iyi işlem sırasını ve ayrıca

her bir aile kapsamındaki parçaların en iyi işlem sırasını belirlemektir. Parçalar aileler halinde gruplanarak aynı aile kapsamındaki parçalar arasındaki hazırlık süreleri en aza indirilir. Atelye içindeki makinaların gruplar halinde hücreleri oluşturmak üzere yerleştirilmediği grup teknolojisi merkezi (sanal hücreler veya mantıksal hücreler; İng: GT center, virtual cells veya logical layout) durumunda bile, hazırlık süreleri makinalarda işlerin işlenme sıralarına bağlı olduğu için, parçaların aileler halinde gruplanması atelye tipi akışa oranla hazırlık sürelerinde dikkate değer bir azalma sağlar.

Hitomi ve Ham [147,148] tek aşamalı çizelgelemeyi incelemiştir. Problem makina yükleme ve ürün karışımını belirleme şeklinde ele alınmıştır. Makina yükleme de üretim sisteminin kapasite sınırları dahilinde işlenebilecek iş adedi belirlenmektedir. Ürün karışımın da ise sınırlı bir üretim süresi içinde işlenebilecek iş tipleri belirlenmektedir. Belirli bir zaman dilimindeki üretim miktarını maksimum yapabilen parça ailelerinin ve her bir ailedeki parçaların işlem sıralarını oluşturmak yaptıkları bu çalışmanın amacı olarak belirlenmiştir. Tüm işler aynı anda mevcut olduğu için problem statik çizelgeme problemi olarak analiz edilmiştir. Problemin matematik modeli geliştirilmiş ve dal sınır algoritması kullanılarak genelde en uygun çözüme yakın (İng: near optimal) bir çözüm elde edilmiştir.

Foo ve Wager [149] bir hücresel üretim sistemi için tek aşamalı bir model geliştirmek sureti ile parça aileleri arasındaki ve aileler içindeki parçaların işlem sıralarının belirlenmesini statik çizelgeleme problemi şeklinde incelemiştir. Çevrimli (İng: cyclic) ve çevrimsiz (İng: acyclic) problemler ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmadaki amaç toplam hazırlık süresini ya da maliyetleri minimize yapan iş sıralamasının belirlenmesi şeklinde formüle edilmiştir. Çevrimli sistemlerde aynı makina üzerinde tekrarlanan her bir üretim çevrimindeki işlem sıraları daima aynı şekilde gerçekleştirilir. Çevrimli grup çizelgeleme uygulamasının bir örneği farklı renkteki boyaların aynı makinadaki her bir üretim çevriminde önceden belirlenmiş sabit bir sıra da üretimidir. Aynı makinanın, bir renkteki boyanın üretiminden farklı renkteki diğer bir boyanın üretimine geçişi sırasında, temizlenme ya da hazırlık süresi boyalar arasındaki renk farkına bağlıdır Çevrimsiz sistem de ise üretilecek parçalar geniş bir parça ailesi içinden seçilir, fakat her bir üretim çevriminde seçilen parçalar değişmektedir. Parti üretimi yapan ve her bir üretim çevriminde farklı parçaların

üretildiği bir metal işleri firmasında üretimin çizelgelenmesi çevrimsiz grup çizelgelemesine bir örnek olabilir. Çevrimli çizelgeleme problemi gezgin satıcı (İng: travelling salesman) ve çevrimsiz çizelgeleme problemi ise dal sınır (İng: branch and bound) yöntemleri ile çözülebilir.

Ham, Hitomi ve Yoshida [28] tek aşamalı grup çizelgeleme problemlerini incelemiş ve en iyi grup çizelgelerini belirleyen teorem ve algoritmaları geliştirmiştir. Ortalama veya ağırlıklı ortalama akış sürelerini minimum yapan gruplar ile grupların kapsadığı parçaların en iyi çizelgelerini belirleyen problem formüle edilmiştir. Grup sıralaması ile iş sıralamasının birbirinden bağımsız olarak belirlenebileceği neticesini elde etmişlerdir. Her bir grup içinde ve gruplar arasındaki parçaların en kısa işlem süresi önce (EKİSÖ, İng: shortest processing time first, SPT) çizelgeleme kuralı ile sıralanıp çizelgelemesi yolu ile ortalama temin (veya akış) süresi (İng: mean flow time) en aza indirilmiştir. Ağırlıklı ortalama temin (veya akış) süresini (İng: weighted mean flow time) minimum yapma amacı ise işlerin ağırlıklı en kısa işlem süresi önce (AEKİSÖ, İng: weighted shortest processing time first) kuralına göre dizilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Kuo ve Inman [150] tek aşamalı grup çizelgeleme problemini ekonomik parti çizelgeleme problemi (İng: economic lot scheduling problem, ELSP) şeklinde incelemiştir. Grup teknolojisi ekonomik parti çizelgeleme probleminin gruplar arası hazırlık işlemini de kapsayan geleneksel ekonomik parti çizelgeleme problemi şeklinde olduğunu vurgulamışlardır. Bir grubun üretiminden diğer bir grubun üretimine geçiş sırasında gruplar arası hazırlık işleminin önem kazandığını ve grup içi hazırlık işleminin ise aynı grup içindeki farklı parçaların işlenmesi sırasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Grup içi hazırlık süre ve maliyetlerinin gruplar arası hazırlık süre ve maliyetleri yanında ufak olduğu varsayımı yapılmıştır. Problemi J adet grup ya da aileye bölünen N adet ürünün ortalama hazırlık ve ortalama stok maliyetini minimum yapmak üzere tek bir makinada çizelgelenmesi şeklinde formüle etmişlerdir. Bu problemi çözmek için bir sezgisel metot geliştirmiş ve bu sezgiselin Ham, Hitomi ve Yoshida [28] tarafından geliştirilen sezgiselden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

4.7. Çok Aşamalı Grup Çizelgeleme

Tek aşamalı grup çizelgeleme problemleri için dal sınır ve gezgin satıcı yöntemleri gibi analitik çözümler iyi sonuçlar sağlamaktadır. Çok aşamalı grup çizelgeleme problemlerindeki hücreler akış tipi ve atelye tipi arasında çeşitli tiplerdedir.

4.7.1. Akış Tipi Üretim Hücrelerinde Grup Çizelgeleme

Akış tipi grup çizelgeleme statik ve dinamik çizelgeleme şeklinde iki bölüme ayrılmaktadır. Ham, Hitomi ve Yoshida [28] akış tipi hücrelerde çizelgeleme problemleri çözümlerinin tek aşamalı çizelgeleme problemlerine göre daha zor olduğunu, fakat bu problemlerin atelye tipi hücrelerdeki çizelgeleme problemlerine göre daha kolay çözülebileceğini belirtmiştir.

4.7.1.1 Akış Tipi Hücrelerde Statik Grup Çizelgeleme

Hücresel üretim sistemindeki hücreler ideal olarak akış tipi üretim hücreleri olarak düzenlenir. Akış tipi üretimde tüm işler aynı iş akış hattına sahiptir. Hücrelerin akış tipi sistemler olarak tasarlanması sureti ile hücresel üretimin faydalı yönlerinden daha iyi istifade edilebilir. Fakat zaman içinde ürün karışımındaki değişim nedeni ile işlerin akışı akış tipi üretim şeklinden ayrılabilir ya da hücre tasarımı akış tipi üretime uygun olmayabilir. Faaliyet sürelerinin en azından bir kısmı için hücrelerin akış tipi sistemler olması nedeni ile akış tipi çizelgeleme çalışmaları aşağıda incelenmektedir. Baker [138], Ashour [151], Gupta [152], Bansal [153], Ingall ve Schrage [154], Smith ve Dudek [155] çeşitli matematik programlama ve kombinasyonsal yöntemler uygulamak sureti ile akış tipi üretim çizelgeleme tekniklerini inceledi.

Hitomi ve Ham [156] çok aşamalı ve çok ürünlü bir üretim sistemi için çizelgeleme yöntemi geliştirdi. Çizelgeleme problemi akış tipi üretim için permütasyon çizelgeleme şeklinde modellenmiştir. Dal sınır algoritması kullanılarak toplam akış süresini (İng: makespan) minimum yapacak şekilde en iyi aile ve parça sıralamasını elde etmişlerdir. Ayrıca her bir parça için her makinada işlenme aşamasındaki en iyi işleme hızlarını toplam üretim maliyetini minimum yapmak üzere elde etmişlerdir. Ham, Hitomi, Nakamura ve Yoshida [157] daha önce Hitomi ve Ham [147] tarafından yapılan bir çalışmayı teslim süresi (İng: due date) kısıt'ını da kapsayacak

şekilde genişletmiştir. Araştırmacıların bu çalışmasının ilk aşamasında geciken iş adedini en az yapan en iyi aile çizelgesi dal sınır algoritması ile oluşturulmuş ve sonraki aşamada ise ve çizelgede boş geçen süreleri dikkate alan dal sınır algoritması uygulaması ile üretim maliyetlerini minimum yapan işlem hızları belirlenmiştir.

Hitomi ve Ham [158] daha önceki tek aşamalı çizelgeleme modellerini çok aşamalı ürün karışımı karar modeli şeklinde tasarlamıştır. Ürün karışımı karar problemi sınırlı miktardaki zaman, kapasite gibi üretim kaynakları ile üretilecek parça adedini belirleme olarak düşünülmüştür. Modelin amacını üretimi maksimum ve üretim maliyetlerini de minimum yapmak şeklinde tanımlamışlardır. Aile ve parçaların sıralanmasını dikkate almadan dal sınır algoritması ile problemin çözümünü elde etmişlerdir.

Park, Pegden ve Enscore [159] 12 adedi daha önceki çalışmalara ait ve 4 adedi de kendi geliştirdikleri olmak üzere 16 adet statik akış tipi üretim çizelgeleme sezgiselini incelemiştir. Farklı büyüklükteki 30 adet akış tipi sisteme bu sezgiselleri uygulamışlardır. Bunlar arasında Nawaz, Enscore ve Ham [160] tarafından geliştirilen NEH sezgiselinin en etkini olduğu sonucuna varmışlardır.

Ham, Hitomi ve Yoshida [28] statik akış tipi çizelgeleme problemini Johnson probleminin genişletilmiş şekli olarak çözmüşlerdir [138]. Büyük ölçekli ve çok aşamalı genel akış tipi çizelgeleme problemi için minimum akış zamanı gibi basit bir kriter durumunda bile en uygun (İng: optimal) çözümü sağlayabilecek basit bir algoritma geliştirmenin oldukça zor olduğu da çalışmada belirtilmektedir. Problem iki aşamalı çizelgeleme problemine indirgenmiş ve teorik olarak dal sınır metodu ile çözülmüştür. Statik akış tipi üretimdeki grup çizelgeleme alanında yapılan çalışmaların pek çoğunda çözüm metotları, dinamik programlama ve dal sınır algoritmaları gibi analitik teknikler şeklindedir. En çok kullanılan performans ölçütü ise işlerin tamamlanması ile ilgili olan toplam iş akış süresidir (İng: makespan). Statik çizelgeleme probleminde tüm işler işlenmek üzere önceden hazır olup, amaç işlerin makinalara ve zamana dağıtılması şeklindedir. Ayrıca statik akış tipi grup çizelgeleme oldukça kolay inceleme yapılabilen bir grup çizelgeleme alanıdır [28,138].

4.7.1.2. Akış Tipi Hücrelerde Dinamik Grup Çizelgeleme

Gelders ve Sambandom [161], Dannenbring [162] sezgisel sıralama prosedürleri üzerinde araştırma yaptı. Dannenbring [162] 11 farklı sıralama kuralını ufak ve büyük çaplı problemler için inceledi. Gelders ve Sambandom [161] ileride oluşabilecek darboğazları önleyen ve aynı zamanda teslim gecikmesini minimum yapmayı amaçlayan dengeleme teknikleri ile ilgili 4 adet sezgisel sıralama kuralını inceledi.

Chan ve Bedworth [163] dinamik akış tipi grup çizelgeleme problemini analiz etmiştir. Ortalama temin (veya akış) süresini (İng: mean flow time) minimum yapan statik bir hücre çizelgeleme sezgiseli geliştirmiş ve bunu işlerin hücreye sürekli geldiği gerçek durumu daha iyi ifade eden dinamik hücre çizelgeleme modelini geliştirmek için uyarlamıştır. Ortalama makina kullanım oranı (İng: mean machine utilization), ortalama akış süresi (İng: mean throughput time) ve toplam akış süresi (İng: makespan) gibi performans ölçütlerini kullanarak en uygun (İng: optimal) çözüm veya en iyi çözüme yakın sonuçları kısa bilgisayar koşum süresi içinde elde etmişlerdir.

Park ve Steudel [164] makinalar arasında sınırlı stok seviyeleri olan bir akış tipi üretim hücresine ait iş akış sürelerini (İng: job throughput times) belirleyen bir modeli yapılandırmıştır. Ayrıca geçiş ve kararlı rejim dönemleri için sistem performansını belirleyen bir tekrarlı (İng: recursive) yöntem geliştirmişlerdir.

İşlerin sisteme dinamik olarak gelmelerinin oluşturduğu karmaşıklık dinamik çizelgeleme probleminin analitik çözümünü zorlaştırmaktadır. Dinamik çizelgeleme problemlerinin incelenmesi ve sezgisel çözümlerin karşılaştırılması için bilgisayar ile benzetim önemli bir teknik olarak kullanılmaktadır [94,138].

4.7.2. Atelye Tipi Hücrelerde Grup Çizelgeleme

Atelye tipi grup çizelgeleme statik ve dinamik çizelgeleme şeklinde iki bölüme ayrılmaktadır. Ailelerin ve bu ailelere ait partilerin işlenme sıralarının çizelgelenmesi bu alanda çözülmesi gereken en önemli problemdir.

4.7.2.1. Atelye Tipi Hücrelerde Statik Grup Çizelgeleme

Bu alandaki sezgisel algoritmalar Giffler ve Thompson tarafından aktif çizelgeleme için geliştirilen algoritma üzerine kurulabilir [138]. Bu algoritmadaki amaç toplam akış süresini (İng: makespan) minimum yapmak şeklinde belirlenmiştir.

İncelenen atelye için uygulanan modelin yapısına bağlı olarak, atelye tipi akış ile ilgili problemlerin bir kısmı dal sınır algoritması gibi analitik yöntemler ile çözülebilir. Ayrıca atelye tipi hücrelerdeki işlere ait iş akış hatlarının karmaşıklığı sebebi ile sezgisel yöntemler de bu sınıfa giren problemlerin çözümünde önemli bir yere sahiptir. Bu sınıfa giren problemlere ait sezgiseller, genişletilmiş Johnson kuralı ve Petrov algoritması gibi, statik atelye çizelgelemenin incelenmesi için kullanılan yöntemlerin dolaysız uygulaması şeklinde olmaktadır [28,138].

4.7.2.2. Atelye Tipi Hücrelerde Dinamik Grup Çizelgeleme

Partilerin sisteme dinamik ve stokastik olarak gelmesi ile atelye tipi hücre düzeni içindeki iş akışının karmaşıklığı bu problemlerin çözümünde benzetim ve sezgisel yöntemlerin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bilgisayar üzerinde gerçekleştirilen benzetim modelleme yaklaşımları önerilen bir sistemin beklenen performansını incelemek için kullanılabilir [177]. Atelye tipi hücrelerde dinamik grup çizelgeleme alanındaki önemli çalışmalar bu kısımda incelenecektir.

Grup çizelgeleme problemlerinin genel amacı, uzun hazırlık sürelerinden sakınmak ve kısa hazırlık sürelerinin sağladığı faydalardan yaralanmak şeklinde ifade edilebilir. Foo ve Wager [149] hücresel üretimin uygulanmasının hazırlık sürelerinin azalmasını sağlamakla birlikte, sıraya bağlı hazırlık zamanlarını dikkate alan çizelgeleme teknikleri ile hazırlık sürelerinin daha fazla kısaltılmasının olanaklı olduğunu belirtir. Grup çizelgeleme ile ilgili bazı araştırmalar kesikli (İng: exhaustive) ve sürekli (İng: non-exhaustive) sezgisel prosedürlerin hücresel üretimde uygulanması ile ilgilidir. Sürekli prosedürlerde bir alt ailedeki tüm partiler, yeni gelenler de dahil olmak üzere, işlendikten sonra alt aile sıralama kuralı tarafından belirlenen diğer alt partinin işlenmesine başlanır. Kesikli alt aile işleme uygulamasında ise bir alt ailede belirli sayıda parti işlendikten sonra, alt aile sıralama kuralınca belirlenen diğer bir alt aile işlenmeye başlanır.

Mahmoodi ve Dooley [168] atelye tipi hücreler için geliştirdikleri kesikli (İng: exhaustive) sezgiselleri mevcut sürekli (İng: non-exhaustive) sezgiseller ile mukayese etmiştir. Altı adet sürekli (İng: non-exhaustive) ve altı adet de kesikli (İng: exhaustive) sezgisel sekiz farklı deneysel koşulda benzetim tekniği ile karşılaştırılmıştır. Sürekli grup çizelgeleme kurallarının genelde iyi olduğu ve hücre yüklerinin az ve teslim sürelerinin uzun olduğu koşullarda ise özellikle daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Mahmoodi ve diğerleri [166] hücresel üretimde grup veya aile çizelgeleme için dinamik bir çizelgeleme sezgiseli geliştirmiştir. Bu grup çizelgeleme sistemi iki aşama halinde düşünülmüştür. Sisteminin ilk aşamasında; ilk gelen ilk işlenir (İGİİ, İng: first-come-first-served, FCFS) en kısa işlem süresi (EKİS, İng: shortest processing time, SPT) ve budanmış en kısa işlem süresi (BEKİS, İng: truncated shortest processing time, truncated SPT) gibi üç adet parti sıralama kuralı hücre makina kuyruklarındaki işlerin sıralanmasına uygulanmıştır. İkinci kademe grup çizelgeleme sezgiseli ise aile kuyruklarının seçim önceliği ile diğer bir aile kuyruğundaki işlerin işlenmesine geçiş zamanını belirlemek için kullanılmıştır. Çalışmada benzetim tekniği ile sezgiselleri karşılaştırmak için işlerin erken yada geç olma süresinin ortalaması (İng: average job tardiness), erken yada geç tamamlanan iş yüzdesinin ortalaması (İng: average percentage of jobs tardy) ve işlerin sistemde kaldığı ortalama süre (İng: average job time in system) gibi üç adet performans ölçütü kullanılmıştır. Ayrıca Mahmoodi ve diğerleri [167] daha önce yaptıkları çalışmayı genişleterek üç adet işi başlatma (İng: order releasing) ve iki adet teslim tarihi belirleme (İng: due-date assignment) sezgiselini karşılaştırmıştır.

Morris ve Tersine [146] hücre yükleme (İng: cell loading) ve makina yükleme (İng: machine loading) uygulanan hücreleri karşılaştırmalı olarak inceledi. Çalışmadaki hücresel sistemler ile atelye tipi sistem modelleri düşünsel olarak kurulmuş ve benzetim yazılımı Siman [94] ortamında kodlanmıştır. Bu benzetim çalışması sonucu hücre yükleme tekniğinin düşük sistem kullanım oranı durumunda daha iyi performans gösterdiği görüldü. Sistem kullanım oranı (İng: utilization) yüksek değerlere ulaşınca, hücresel üretimde bir performans azalması gözlendi.

Mosier ve diğerleri [169] üç adet sezgisel grup çizelgeleme kuralı ve beş adet geleneksel atelye çizelgeleme kuralını düşünsel bir grup teknolojisi üretim sistemi modeli üzerinde benzetim deneyleri gerçekleştirmek sureti ile karşılaştırmıştır. Çalışmadaki grup teknolojisi üretim sistemi üç adet hücre ve bunların her birine atanan üçer adet parça ailesinden oluşmaktadır. İncelenen üç grup çizelgeleme kuralının ikisinin yapısında maliyet ile ilgili etkenler özellikle dikkate alınmıştır, Ayrıca iki kural kesikli ve bir kural ise sürekli tiptedir. Grup çizelgeleme kurallarının geleneksel atelye çizelgeleme kurallarına göre daha iyi netice verdiği sonucuna varılmıştır. İncelenen performans ölçütleri makina hazırlık süresi, ortalama akış süresi, teslim gecikmesi, boşta makina süresi gibi ölçütleri kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan modeldeki atelye ufak ve tek tiptir ve malzeme taşıma araçları model yapısı içinde düşünülmemiştir.

Flynn [170] diğer bazı çalışmalarında kullandığı hücresel üretim ve atelye tipi üretim sistemleri modelleri için farklı çizelgeleme kurallarının uygulanması durumunu benzetim yöntemi ile incelemektedir. Çalışmada ilk giren ilk çıkar (İGİÇ) kuralı ile tekrarlı partiler kuralı karşılaştırılmaktadır. Tekrarlı partiler kuralına tarafından kuyruktan işlenmek için seçilen parti bir önce işlenen parti için gerekli takım, tertibat ve ayarları kullanmalıdır [171]. Kuralın amacı ise aşırı derecede uzun kuyrukların önlenmesidir. Benzetim çalışması sonucunda ise tekrarlı partiler kuralının uygulanması koşulu ile hücresel üretimde performansın iyileştiği belirlenmiştir. Fakat bu iyileşme hücresel üretimin performansının atelye tipi üretimin performansından daha iyi olmasını sağlayamamıştır.

Vaithianathan ve McRoberts [165] parça ailelerini hazırlık işlemlerinin benzerliğine göre alt aileler şeklinde gruplandırdı ve alt aileler akış tipi üretime uygun olarak düzenlendi. Bu alt ailelerin sıralanmasında beş ayrı sıralama kuralı uygulandı. Alt ailelerin kendi içinde ise en kısa işlem zamanı önce (EKİZÖ) sıralama kuralı kullanıldı. Bu sıralama kuralları tek kademeli EKİZÖ ile karşılaştırıldı. Alt aile sıralama kuralı daha kısa akış zamanı ve daha az sayıda hazırlık işlemi sonucunu verdi. Bununla birlikte en iyi alt aile sıralama kuralı uygulansa bile teslim sürelerindeki gecikmenin arttığı görüldü.

5. DIŞSAL İŞ AKIŞI ESNEKLİĞİNE SAHİP HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME İÇİN GELİŞTİRİLEN KURALLAR VE BENZETİM MODELLERİ

5.1. Giriş

Bu çalışmada değişen içsel veya dışsal çevre şartlarında faaliyet gösteren hücresel üretim sistemlerinde dışsal iş akışı esnekliği (DİAE) uygulamasının sistem performansı üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Diğer bir ifade ile ürün karışımındaki veya talep dağılımındaki değişimler sonucu oluşan hücreler arası iş yükü dağılımındaki dengesizliğin, dışsal iş akışı esnekliğinden faydalanmak sureti ile dengelenmesi incelenmektedir. Bu çalışmadaki "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır. Mevcut problemi incelemek için bir matematiksel programlama modelinin geliştirilmesi düşünülebilir; fakat konunun karmaşıklığı, problemin boyutu ve üretimin gerçekleştirildiği çevrenin dinamik doğası nedeni ile bu tür bir yaklaşım yetersiz olacaktır. Dolayısı ile çalışma konusunun dinamik yapısının kapsamlı olarak incelenebilmesi için üretim benzetimi yöntemi ve benzetim sonuçlarının anlamlı olarak değerlendirilmesi için de istatistik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Modele ait parametreler; 1994-1996 yılları arasında B. Durmuşoğlu tarafından gerçekleştirilen ŞİŞECAM Holding Camiş Makina ve Kalıp Sanayii A.Ş. Cam Kalıbı Atelyesi'nin aşamalı olarak hücresel üretime dönüşümü projesi kapsamında derlenen ürün talep dağılımı, parça hazırlık ve işlem süreleri gibi üretim değerlerinin, bu çalışmanın amacına uyması için, kısmen ayarlanması sureti ile belirlenmiştir [221-225]. Bu bölümde, bu araştırma kapsamında dikkate alınan ana faktörler olan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralları (DİAEKK), yük dengesizliği (yüzdesi) seviyesi (YDS), hazırlık süresindeki artış yüzdesi (HSAY) ve işlem süresindeki artış yüzdesi (İSAY) ile parti işlem süresi ve hücre yükü tanımlanacaktır. Ayrıca geliştirilen benzetim modellerinin performans ölçütleri, parametreleri, yapıları ve varsayımları belirlenecek ve modelin testi ile geçerliliği hususu açıklanacaktır.

5.2. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları

Bu çalışmanın ilk aşamasında hücreler arası yük dengesizliği durumunda dışsal iş akışı esnekliğinin nasıl kullanılacağını belirlemek için 14 adet karar kuralı tasarlanmıştır. Geliştirilen bu kurallar yapısı daha sonra açıklanacak olan benzetim modelleri ile bir dizi ön koşumlar yapılmak sureti ile test edilmiştir. Yapılan ön testler sonucu bu 14 adet kuraldan en iyi ve en kötü olduğu kanaatine varılan iki adet karar kuralı ayrıntılı olarak incelenmek üzere seçilmiştir. İki uç noktadaki bu iki kuralın seçim nedeni ise dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinlik derecesini karşılaştırmak ve en uygun kuralı uygulamanın önemini araştırmaktır. Çalışmada geliştirilen karar kurallarının karşılaştırılması için ana mukayese noktası oluşturması amacı ile hücreler arası yük dengesizliğinin giderilmesi yönünde hiçbir kuralı uygulamama durumu da dikkate alınmıştır. Konunun rahat izlenebilmesi ve yazım kolaylığı bakımından son analiz için seçilen bu iki kural **Kural A** ile **Kural B** ve yük dengesizliğini giderme amacına yönelik hiçbir girişimin olmadığı durum ise **BAZ** olarak adlandırılmıştır. Aşağıdaki kısımlarda, öncelikle geliştirilen bu kurallara esas olan bazı kavramlar ve daha sonra ise kuralların yapıları açıklanacaktır.

5.2.1. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Ana Koşulu

Talep dağılımının dengeli olması durumunda bir hücre kendisine yüklenen işlerin tamamını işleyebilir ve hücre etkin bir şekilde çalışmaktadır. Bu durumda hücrenin kapasitesi yük miktarından daha fazladır. Eğer ürün karışımı veya talep dağılımı değişir ise hücreler arası iş yükü dağılımı da değişir ve bazı hücrelerin yükü hücre kapasite sınırına çok yaklaşabilir veya hücre kapasite sınırını aşabilir. Bu durumda hücre aşırı yüklüdür. Dolayısı ile hücre önündeki işlenecek parti kuyruğu uzar ve işler çizelgelendikleri tarihten daha geç tamamlanır.

Eğer aşırı yüklenen bir hücrenin kapasitesi arttırılamaz veya yük miktarı azaltılamaz ise sistem performansının iyileştirilebilmesi için tek çözüm aşırı yüklü hücredeki işlerin bir kısmını kapasite fazlası olan daha az yüklenmiş ve benzer makinalara sahip diğer bir hücrede işlenmesidir. Eğer yüklerin hücreler arasında dengeli olarak dağıldığı bir ortamda, aşırı yüklenmeyen bir hücredeki partilerin bir kısmı ikincil bir hücreye işlenmek üzere yollanırsa sistemin genel performansı kötüleşir. Bu performans azalmasının nedeni ise ikincil hücrenin kendi ailesinden olmayan yabancı

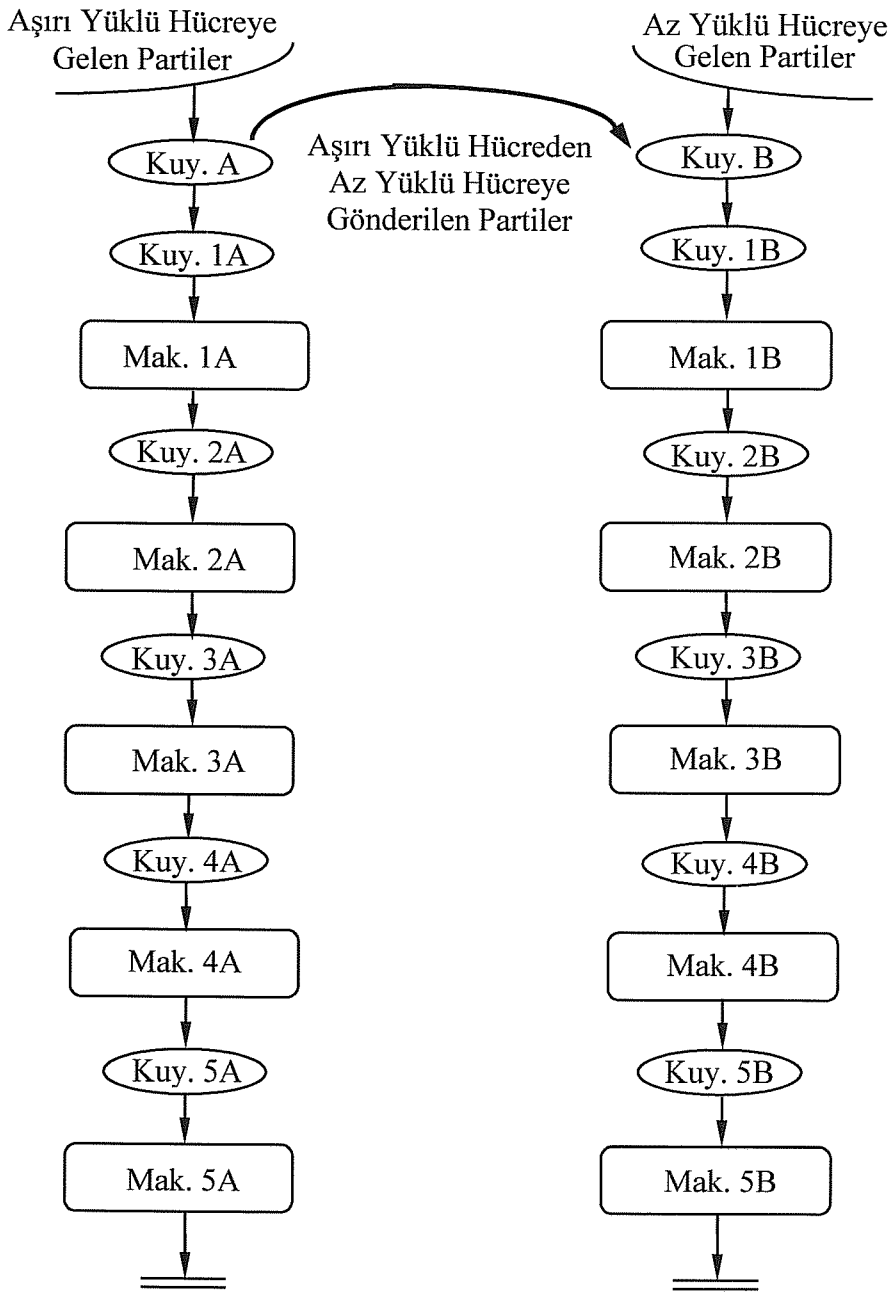
partileri, doğal olarak, bu partilerin asıl hücrelerinde üretilmesinden daha düşük bir verim ile işlemesi ve ayrıca ikincil hücrenin yükünün gereksiz olarak artmasıdır. Dolayısı ile yük dağılımının hücreler arasında dengesiz olarak dağılması durumunda uygulanmak amacı ile geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uyması gereken ana koşul sadece aşırı yüklü hücrenin ana giriş kuyruğundan, uygulanan kurala göre, seçilecek partilerin daha az yüklü bir diğer hücrenin ana giriş kuyruğuna gönderilmesi ve bu daha az yüklü hücrede işlenmesi durumu olmaktadır (Şekil 5.1).

5.2.2. Uzman Hücre ve Seçenek Hücre Tanımları

Çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinliğini karşılaştırmak için geliştirilen hücresel sistem modelleri, incelemeyi gereksiz ayrıntılardan arındırmak ve basitleştirmek amacı ile daha büyük bir sistemin alt sistemi olarak düşünülen iki adet hücreden oluşan bir sistem şeklinde tasarlanmıştır. Bu iki hücreden aşırı yüklü olan hücre uzman hücre olarak adlandırılmıştır. Daha az yüklü ve uzman hücredeki parçaları aynı veya daha düşük bir verim ile işleyebilen ve benzer makinalara sahip diğer hücre ise seçenek hücre olarak adlandırılmıştır. Uzman ve seçenek hücreler normal olarak kendi parça ailelerine ait parçaları üretebilme yeteneğine sahiptir. Yük dengesizliğini gidermek için yapıları ilerideki kısımlarda açıklanacak olan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması durumunda ise, yukarıda belirtilen ana karakteristik gereği, daha az yükü olan seçenek hücre, kendi parça ailesi ile birlikte aşırı yüklü uzman hücreden uygulanan dışsal iş akışı esnekliği kuralına göre seçilerek kendisine gönderilen partilerin üretimini de gerçekleştirir.

5.2.3. Hücresel Sistem Üzerinde Etkili Olan Faktörler: Geliştirilen Modelin Bağımsız Değişkenleri

Hücresel üretim ile ilgili literatür araştırması sonucu 12 adet faktörün sistem performansı üzerinde etkili olduğu belirlendi: 1. sistem tasarımı, 2. parça makina matrisinin yapısı, 3. talep dağılımı veya karışımı, 4. işlem süreleri, 5. hazırlık süreleri, 6. sipariş çevrimi, 7. parti hacmi, 8. ürün karışımı, 9. partilerin işlem (operasyon) adetleri, 10. partilerin iş akış hatları ve işlem sıraları, 11. makina çeşitleri ve adetleri, 12. parça çeşitleri ve adetleri.



Kuy. A : Aşırı yüklü A hücresi ana giriş kuyruğu. Mak. iA : Aşırı yüklü A hücresinin i makinası.
Kuy. B : Az yüklü B hücresi ana giriş kuyruğu. Mak. iB : Az yüklü A hücresinin i makinası.
Kuy. iA : Aşırı yüklü A hücresinin i makinası kuyruğu. i : Makina veya kuyruk numarası
Kuy. iB : Az yüklü B hücresinin i makinası kuyruğu. (i = 1,2,3,4 veya 5).

Şekil 5.1 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının ana koşulu

Bilgisayar kapasite ve zaman sınırlaması ile faktörlerin önem dereceleri dikkate alınmak sureti ile çalışmanın sınırları çizilmiş ve yukarıda belirtilen bazı faktörlerin değerleri benzetim deneyi süresince sabit kabul edilmiştir. Dolayısı ile bazı faktörlerin etkileri çalışma kapsamı dışında tutulmuştur ve bu çalışmada dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı (DİAEKK), yük dengesizliği seviyesi (veya talep dağılımındaki değişim yüzdesi) (YDS), hazırlık süresindeki artış yüzdesi (HSAY) ve işlem süresindeki artış yüzdesi (İSAY) olmak üzere dört adet bağımsız değişken (ana faktör) kullanılmıştır. Yük dengesizlik düzeyi ile seçenek hücrenin uzman hücreye ait bir partiyi işleme yeteneğini (verimini) ifade eden işlem artış yüzdesi ve hazırlık artış yüzdesi terimlerinin, çalışmanın amacına uygun olacak tarzda, nicel anlamda belirlenmesini sağlayan tanımlar aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır. Bu faktörlere ait seviyelerin çalışmada dikkate alınan değerleri de altıncı bölümün 6.4. kısmında deney tasarımı ve faktörlerin seviyeleri şeklinde sunulacaktır. Ayrıca bu bölümün 5.2.6. kısmında bu çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini uygulama kurallarının yapısı da ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

5.2.3.1. Yük Dengesizlik Seviyesi

Yük dengesizlik faktörünün seviyeleri uzman ve seçenek hücrelere gelen partilerin ortalama gelişler arası sürelerini, sistem kullanım oranı (ortalama sistem yükü) sabit kalacak şekilde, değiştirmek suretiyle belirlenir. Yük dengesizlik seviyesi aşağıdaki bağıntılara göre tanımlanan yük dengesizlik yüzdesi ile ilişkilidir.

$$YDS = f(YDY) \tag{5.1}$$

$$YDY = \%\left(\frac{G_s - G_n}{G_n}\right)\times 100 = \%\left(\frac{G_n - G_u}{G_n}\right)\times 100 \tag{5.2}$$

$$G_n = \frac{G_u + G_s}{2} = \text{SABİT} \tag{5.3}$$

YDS : Yük dengesizlik seviyesi.

YDY : Yük dengesizlik yüzdesi.

G_u : Uzman hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi.

G_s : Seçenek hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi.

G_n : Hücresel sisteme gelen tüm partilerin gelişleri arasındaki normal ortalama gelişler arası süre (çalışmadaki tüm sistemlerin ortalama talep düzeylerinin aynı olabilmesi için G_n sabit kabul edilmiştir).

Yük dengesizlik yüzdesini ifade eden yük dengesizlik faktörünün çalışma kapsamında dikkate alınan seviyeleri ise altıncı bölümdeki deney tasarımı kısmında belirlenecektir.

5.2.3.2. İşlem Süresi Artış Yüzdesi

İşlem süresi artış yüzdesi faktörü seviyesi aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır:

$$\text{İSAY} = \%\left(\frac{I_{si} - I_{ui}}{I_{ui}}\right) \times 100 \qquad (5.4)$$

İSAY : İşlem süresi artış yüzdesi.

I_{ui} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan partiye ait bir parçanın uzman hücrenin i makinasındaki parça işlem süresi.

I_{si} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan partiye ait bir parçanın seçenek hücrenin i makinasındaki parça işlem süresi.

İşlem süresindeki artış yüzdesi uzman hücre ailesine ait bir parçanın seçenek hücrede işlenmesi durumunda işlem süresindeki artış yüzdesini belirtir. Eğer seçenek hücredeki makinalar uzman hücredeki makinalar ile eşdeğer ise seçenek hücredeki bir makinada uzman hücreye ait bir parçanın işlenme süresi uzman hücrenin aynı makinasındaki işlenme süresi ile aynı değerdedir ve işlem süreleri artış yüzdesi sıfır olur. Eğer makinaların özellikleri oldukça farklı ise seçenek hücredeki benzer makinada uzman hücreye ait bir parçanın işlenmesi daha uzun sürecek ve işlem süresi artış yüzdesi de sıfırdan büyük olacaktır. İşlem süresi artış yüzdesi farklı iki hücredeki makinaların benzerlik düzeyini ifade etmektedir. İşlem süresi artış yüzdesinin yüksek olması seçenek hücredeki makinalarda uzman hücreye ait parçaların daha düşük bir verimlilik ile işlenebileceğini belirtir. İşlem süresi artış yüzdesi faktörünün çalışma kapsamında dikkate alınan seviyeleri ise altıncı bölümdeki deney tasarımı kısmında verilecektir.

5.2.3.3. Hazırlık Süresi Artış Yüzdesi

Hazırlık süresi artış yüzdesi faktörünün seviyesi aşağıdaki ifadeye göre tanımlanır:

$$HSAY = \%\left(\frac{H_{si} - H_{ui}}{H_{ui}}\right) \times 100 \qquad (5.5)$$

HSAY : Hazırlık süresi artış yüzdesi.

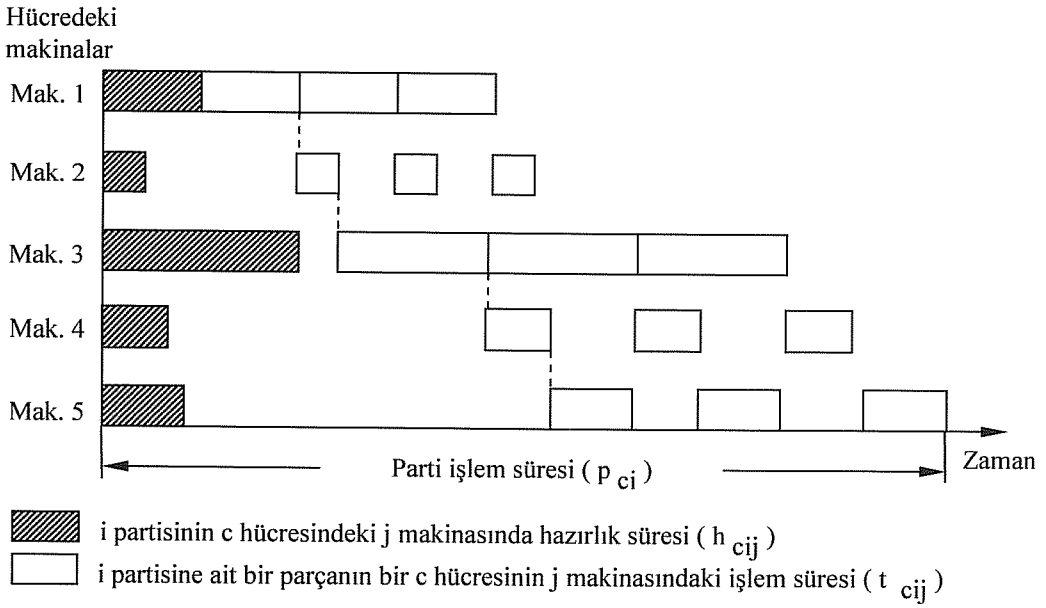
H_{ui} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan parti için uzman hücredeki i makinasının hazırlık süresi.

H_{si} : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralına göre uzman hücreden seçenek hücreye işlenmek üzere yollanan parti için seçenek hücredeki i makinasının hazırlık süresi.

Hazırlık süresi bir tezgahı (makinayı) bir partiyi işlemek üzere hazırlamak için gerekli süredir. Hücresel üretim sistemlerinin tasarım felsefesi gereği, her hücrenin kendi parça ailesine ait olan parçaları işlemesi nedeni ile hazırlık süreleri atelye tipi üretime göre oldukça kısa olmaktadır. Eğer bir dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralının uygulanması sonucunda bir parti ait olduğu kendi uzman hücresi yerine seçenek hücrede işlenir ise hazırlık süresinde bir artış olabilir. Dolayısı ile hazırlık süresi artış yüzdesi, uzman hücre ailesine ait bir parçanın seçenek hücrede işlenmesi durumunda hazırlık süresindeki artış yüzdesini belirtir. Eğer uzman hücreden gelen partilerin işlenebilmesi için seçenek hücredeki makinaların hazırlanmasında benzer yöntem ve donanım (takım tertibat) kullanılabiliyor ise hazırlık süresi artış yüzdesi sıfır olur. Aksine seçenek hücrede uzman hücreden gelen partinin hazırlığı için uygulanan yöntem ve kullanılan donanım oldukça farklı ise hazırlık süresi artar ve hazırlık süresi artış yüzdesi sıfırdan büyük olur. Hazırlık süresi artış yüzdesi uzman ve seçenek hücredeki makinaların ve özellikle hazırlık işleminin benzerlik düzeyini nicel olarak ifade etmektedir. Hazırlık süresi artış yüzdesinin yüksek olması seçenek hücredeki makinaların uzman hücreye ait partileri işlemek için daha düşük bir verimlilik ile hazırlanabileceğini ifade eder. Hazırlık süresi artış yüzdesi faktörünün çalışma kapsamında dikkate alınan seviyeleri ise altıncı bölümdeki deney tasarımı kısmında açıklanacaktır.

5.2.4. Parti İşlem Süresi Tanımı

Parti işlem süresi, hücrenin sadece tek bir partiye tahsis edilmesi koşulu altında aynı partinin parti bindirmeli (paralel) olarak işlenebileceği süre olarak tanımlanabilir ve hücredeki mevcut olanaklar dahilinde bir partinin işlenebileceği en kısa süredir. Parti işlem süresi; parti hacmi, partinin makinalardaki hazırlık süreleri, partiye ait bir parçanın hücredeki makinalarda işlenme süreleri ile partinin darboğaz makinada işlenme süresi tarafından belirlidir ve Şekil 5.2'nin incelenmesinden de anlaşılabileceği üzere aşağıdaki gibi ifade edilir:



Şekil 5.2 : Parti bindirmeli (paralel) işleme ve parti işlem süresi

$$p_{ci} = h_{ci1} + (n_i - 1) \times \max_{j \in S_{ci}} \{ t_{cij} \} + \sum_{j \in S_{ci}} t_{cij} \qquad (5.6)$$

c : Uzman veya seçenek hücre: c = u ise uzman hücre,
c = s ise seçenek hücre.

n_i : i partisindeki parça adedi.

p_{ci} : i partisinin c hücresindeki parti işlem süresi.

h_{ci1} : i partisinin c hücresi içinde işleneceği ilk makinadaki hazırlık süresi.

h_{cij} : i partisinin c hücresi içinde işleneceği j makinasındaki hazırlık süresi.

t_{cij} : i partisine ait bir parçanın c hücresinin j makinasındaki parça işlem süresi.

S_{ci} : i partisinin c hücresinde işleneceği makinaların cümlesi.

Genel olarak parti işlem süresinin hesaplanması yukarıda ifade edildiği gibi olmakla birlikte bir partinin ilk makinadan sonra gelen herhangi bir makinadaki hazırlık süresinin oldukça uzun olması durumunda parti işlem süresinin hesaplanması ise Ek A' da açıklandığı gibi biraz farklıdır. Bunun sebebi ise ilk makina sonrasındaki bir makinadaki çok uzun bir hazırlık süresinin bu makinaya gelen partiye ait parçaların işlenmesine başlanmasını ve dolayısı ile partinin tüm parçalarının işlenip tamamlanma zamanını çok geciktirmesi olasılığıdır. Bu durumun gerçekleşmesi durumunda o makina ile o makinadan sonra gelen tüm makinalarda ilgili partinin tamamlanma zamanları da gecikir ve dolayısı ile ilgili partiye ait parti işlem süresi de yukarıdaki 5.6 ifadesine göre hesaplanan parti işlem süresi (p_{ci}) değerinden daha büyük olur. Çalışmada geliştirilen modelin kısım 5.4.1 de belirlenmiş olan parametrelerinin incelenmesi sonucu parti işlem sürelerinin p_{ci} den daha uzun olması durumu olasılığının çok düşük olduğu belirlenmiştir ve dolayısı ile pratik olarak hemen her durumda yukarıdaki p_{ci} ifadesi geçerlidir. Çalışmada geliştirilen benzetim modeli programında ise düşük olasılıkla oluşan bu durumda ait p_{ci} den daha büyük olabilecek parti işlem sürelerini Ek A 'da açıklandığı gibi hesaplayarak dikkate alan farklı bir algoritma kullanılmıştır.

5.2.5. Hücrelerin Yüklenme Yöntemi ve Hücre Yükü Tanımı

Sistemdeki herhangi bir hücreye gelen her parti hücre önündeki giriş kuyruğunda bekler ve partinin hücre içindeki iş akış hattı üzerindeki ilk makinadaki diğer partinin son parçasının tamamlanması sonucu bu makina ve kuyruğunun boşalmasının hemen ardından hücre giriş kuyruğundaki diğer parti boşalan bu makinada işlenmek üzere hücre içine alınır. Hücre içindeki her makina önünde işlenmek üzere bekleyen partinin parçalarının bulunduğu bir adet kuyruk vardır ve bir makinada işlemi tamamlanan bir parça hemen hücre içindeki iş akış hattı üzerinde bulunan diğer makinaya yollanır. Hücre içindeki bir makinaya gelen parça eğer makinanın hazırlığı tamamlanmamış veya makinada bir parça işlenmekte ise makina boşalıncaya kadar makina kuyruğunda bekledikten sonra makinada işlenmeye başlar. Yani her partinin parçaları hücre içindeki makinalarda tek tek ve aynı anda parti bindirmeli olarak işlenmektedir. Hücrelerin bu şekilde yüklenmesi hücresel üretim yazınında makina yükleme yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemin aksine, hücrelerin tek bir makina gibi herhangi bir anda tek bir partiyi işlemek üzere yüklenmesi ise hücre yüklemesi

yöntemidir ve genellikle düşük sistem kullanım oranı ve kötü performansa neden olur. Dolayısı ile bu çalışmada, daha iyi sistem performansı sağlayan makina yükleme yöntemi ve paralel parti işleme tekniği uygulanmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi çalışmada geliştirilen modelde makina yükleme ve paralel parti işleme yöntemlerine uygun olarak üretim yapıldığı için hücre içinde aynı anda birden fazla parti işlenebilmektedir. Dolayısı ile bir uzman veya seçenek hücrenin yükü de o hücrenin ana giriş kuyruğunda bekleyen ve o hücre içinde işlenen tüm partilerin, ifade 5.6.' ya göre hesaplanan, parti işlem sürelerinin toplamı olarak aşağıdaki ifade ile belirlenir:

$$y_c = \sum_{i=1}^{m} p_{ci} \qquad (5.7)$$

c : Uzman veya seçenek hücre: c = u ise uzman hücre,
c = s ise seçenek hücre.

y_c : Uzman veya seçenek c hücresinin yükü.

m : Uzman veya seçenek c hücresinin ana giriş kuyruğu ile c hücresi içindeki toplam parti adedi.

p_{ci} : i partisinin c hücresindeki parti işlem süresi.

5.2.6. Geliştirilen Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Tanıtımı

Daha önce kısım 5.2. 'de belirtildiği gibi bu çalışmada geliştirilen Kural A ile Kural B ve yük dengesizliğini giderme amacına yönelik hiçbir girişimin olmadığı BAZ durumu ayrıntılı açıklamaları aşağıdaki kısımlarda verilmektedir.

5.2.6.1. Birinci Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralı: Kural A

Hücresel sistem içindeki üç farklı kontrol noktasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanmak amacı ile **kural A** aşağıda açıklandığı gibi uygulanır. **Kural A** 'nın uygulanmasının grafik olarak gösterimi ise Şekil 5.3 ve 5.4.'de verilmiştir.

Kontrol Noktası A-1: Uzman hücre giriş kuyruğuna her yeni partinin gelişi sırasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kararı aşağıdaki karar kademelerine göre yapılan kontroller sonucu gerçekleştirilir (Şekil 5.3 ve 5.4.):

EĞER: **A-1-1.** Uzman hücre giriş kuyruğunda üretim için bekleyen en az bir parti vardır.

VE

A-1-2. Seçenek hücre giriş kuyruğunda bekleyen bir parti yoktur.

VE

A-1-3. Seçenek hücrenin ilk makinasının kuyruğunda bekleyen bir parti yoktur.

VE

A-1-4. Seçenek hücrenin ilk makinası boşta beklemektedir.

VE

A-1-5. Uzman hücrenin yükü seçenek hücrenin yükünden daha fazladır. Yani,

uzman hücre yükü ($y1_u$) > seçenek hücre yükü ($y1_s$)

koşulu sağlanmaktadır.

VE

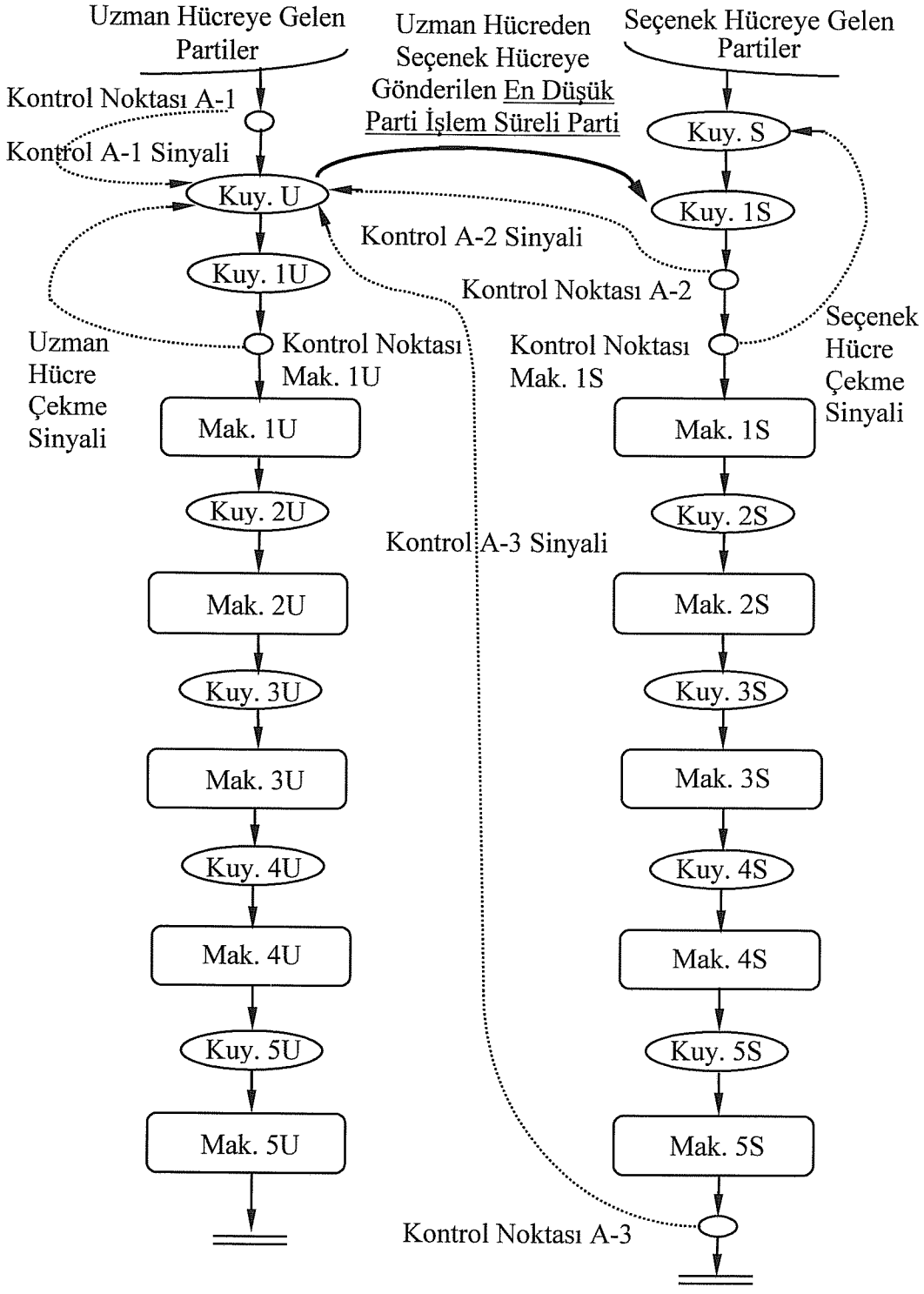
A-1-6. Uzman hücre kuyruğunda parti işlem süresi en düşük olan partinin seçenek hücrede işlenmesi durumunda hesaplanan uzman hücre yeni yükü ve seçenek hücre yeni yükü için

uzman hücre yeni yükü ($y2_u$) > seçenek hücre yeni yükü ($y2_s$)

koşulu sağlanmaktadır.

O HALDE: Dışsal iş akışı esnekliği kullanılmak sureti ile uzman hücre giriş kuyruğundaki **parti işlem süresi en düşük olan parti** seçenek hücrede işlenmelidir.

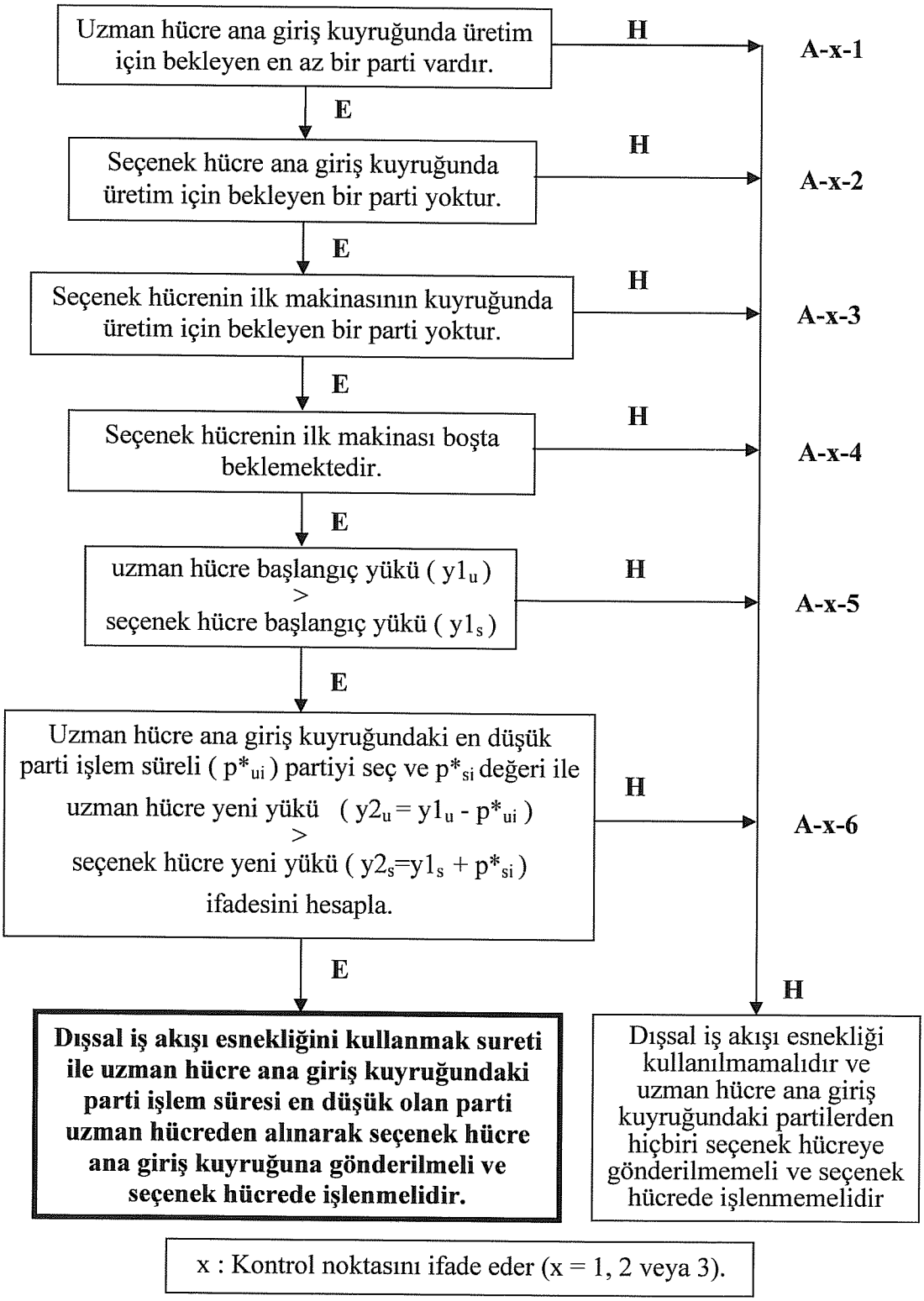
AKSİ HALDE: Dışsal iş akışı esnekliği kullanılmamalıdır ve uzman hücre giriş kuyruğundaki partilerden hiçbiri seçenek hücrede işlenmemelidir.



Kuy. U : Uzman hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. S : Seçenek hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. iU : Uzman hücredeki i makinasının kuyruğu.
Kuy. iS : Seçenek hücredeki i makinasının kuyruğu.

Mak. iU : Uzman hücredeki i makinası.
Mak. iS : Seçenek hücredeki i makinası.
i : Makina veya kuyruk numarası
(i = 1,2,3,4 veya 5).

Şekil 5.3 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının grafik gösterimi



Şekil 5.4 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A için Kontrol Noktası A-1, A-2 ve A-3' de uygulanan karar yapısının akış diyagramı ve karar kademeleri

Kural A 'nın A-1-5 ve A-1-6 kademelerindeki yük değerlerinin hesaplanma yöntemi ise aşağıdaki ifadeler ile verilmiştir:

ifade 5.6.'da c = u konmak sureti ile uzman hücre (başlangıç) yükü:

$$yl_u = \sum_{i=1}^{m} p_{ui} \tag{5.8}$$

ifade 5.6.'da c = s konmak sureti ile seçenek hücre (başlangıç) yükü:

$$yl_s = \sum_{k=1}^{n} p_{sk} \tag{5.9}$$

yl_u : Uzman hücre (başlangıç) yükü.

yl_s : Seçenek hücre (başlangıç) yükü.

m : Kural A uygulaması öncesi (başlangıçtaki) u uzman hücresi ana giriş kuyruğu ve u uzman hücresi içindeki toplam parti adedi.

n : Kural A uygulaması öncesi (başlangıçtaki) s seçenek hücresi ana giriş kuyruğu ve s seçenek hücresi içindeki toplam parti adedi.

p_{ui} : i partisinin u uzman hücresindeki parti işlem süresi (i = 1,2,3,....,m).

p_{sk} : k partisinin s seçenek hücresindeki parti işlem süresi (k = 1,2,3,....,n).

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralının uygulanması sonucunda uzman hücre giriş kuyruğundan alınarak seçenek hücrede üretilen partiler için seçenek hücredeki parti işlem süreleri ise işlem ve hazırlık süresi artış yüzdelerine bağlı olarak aşağıdaki bağıntıda ifade edildiği gibi belirli ölçüde artmaktadır ve bu durumda uzman hücre yeni yükü ile seçenek hücre yeni yükü ise aşağıdaki ifadelere göre belirlenmektedir:

$$p^*_{ui} = h^*_{uil} + (n^*_i - 1) \times \max_{j \in S_{ui}} \left\{ t^*_{uij} \right\} + \sum_{j \in S_{ui}} t^*_{uij} \tag{5.10}$$

$$p^*_{si} = (1+hsay) \times h^*_{uil} + (1+isay) \times \left((n^*_i - 1) \times \max_{j \in S_{ui}} \left\{ t^*_{uij} \right\} + \sum_{j \in S_{ui}} t^*_{uij} \right) \tag{5.11}$$

uzman hücre yeni yükü: $y2_u = yl_u - p^*_{ui}$ (5.12)

seçenek hücre yeni yükü: $y2_s = yl_s + p^*_{si}$ (5.13)

p^*_{ui} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin uzman u hücresindeki parti işlem süresi.

p^*_{si} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin seçenek s hücresindeki parti işlem süresi.

hsay : Hazırlık süresi artış yüzdesi.

isay : İşlem süresi artış yüzdesi.

h^*_{uil} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin u uzman hücresi içinde işleneceği ilk makinadaki hazırlık süresi.

h^*_{uij} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisinin u uzman hücresi içinde işleneceği j makinasındaki hazırlık süresi.

n^*_i : Kural A uygulaması sonucu uzman hücre ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilerek seçenek hücrede üretilmek üzere alınan i partisindeki parça adedi.

t^*_{uij} : Kural A uygulaması sonucu seçenek s hücresinde üretilmek üzere u uzman hücresi ana giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip i partisine ait bir parçanın u uzman hücresi içinde işleneceği j makinasındaki parça işlem süresi.

S_{ui} : i partisinin u uzman hücresinde işleneceği makinaların cümlesi (uzman ve seçenek hücrelerdeki makinalar karşılıklı benzer olduğu için bir i partisinin s seçenek hücresinde işleneceği makinaların cümlesi $\mathbf{S_{si}}$ ile u uzman hücresinde işleneceği makinaların cümlesi $\mathbf{S_{ui}}$ aynıdır).

yl_u : Uzman hücre (başlangıç) yükü.

yl_s : seçenek hücre (başlangıç) yükü.

$y2_u$: uzman hücre yeni yükü.

$y2_s$: seçenek hücre yeni yükü.

Çalışmada geliştirilen benzetim modeli programında, kısım 5.2.4 'de açıklanan nedenlerle, düşük olasılıkla da olsa bile p^*_{ui} ve p^*_{si}' den daha büyük olabilecek gerçek parti işlem sürelerini de dikkate alarak hesaplamak üzere Ek A' da ayrıntıları ile açıklanan biraz farklı bir algoritma kullanılmıştır.

Kontrol Noktası A-2: Seçenek hücrenin ilk makinasındaki partiye ait son parçanın işlenmesinin tamamlanması sonrasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kararı kontrol noktası A-1 deki ile aynı karar kademelerine göre gerçekleştirilir (Şekil 5.3 ve 5.4).

Kontrol Noktası A-3: Seçenek hücrenin son makinasındaki partiye ait son parçanın işlenmesinin tamamlanması sonrasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kararı kontrol noktası A-1 deki ile aynı karar kademelerine göre gerçekleştirilir (Şekil 5.3 ve 5.4.).

5.2.6.2. İkinci Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralı: Kural B

Hücresel sistem içindeki iki farklı kontrol noktasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanmak amacı ile kural B aşağıda açıklandığı gibi uygulanır. Kural B uygulanmasının grafik olarak gösterimi ise Şekil 5.5. ve 5.6.'da verilmiştir.

Kontrol Noktası B-1: Uzman hücre giriş kuyruğuna her yeni partinin gelişi sırasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kararı aşağıdaki karar kademelerine göre yapılan kontroller sonucu gerçekleştirilir (Şekil 5.5. ve 5.6.):

EĞER: **B-1-1.** Uzman hücre giriş kuyruğunda üretim için bekleyen en az bir parti vardır.

VE

B-1-2. Seçenek hücre giriş kuyruğunda bekleyen bir parti yoktur.

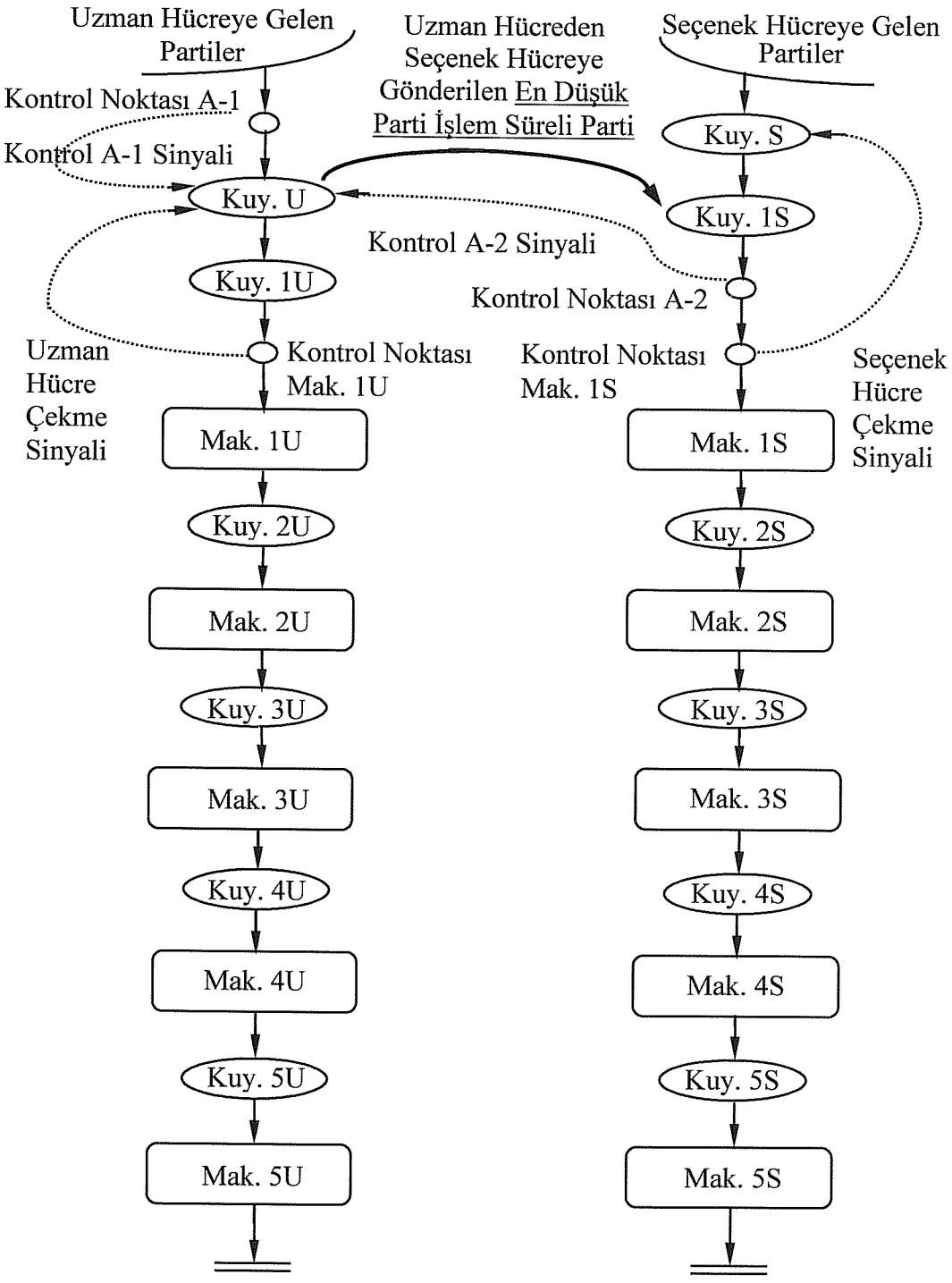
VE

B-1-3. Seçenek hücrenin ilk makinasının kuyruğunda bekleyen bir parti yoktur.

VE

B-1-4. Seçenek hücrenin ilk makinası boşta beklemektedir.

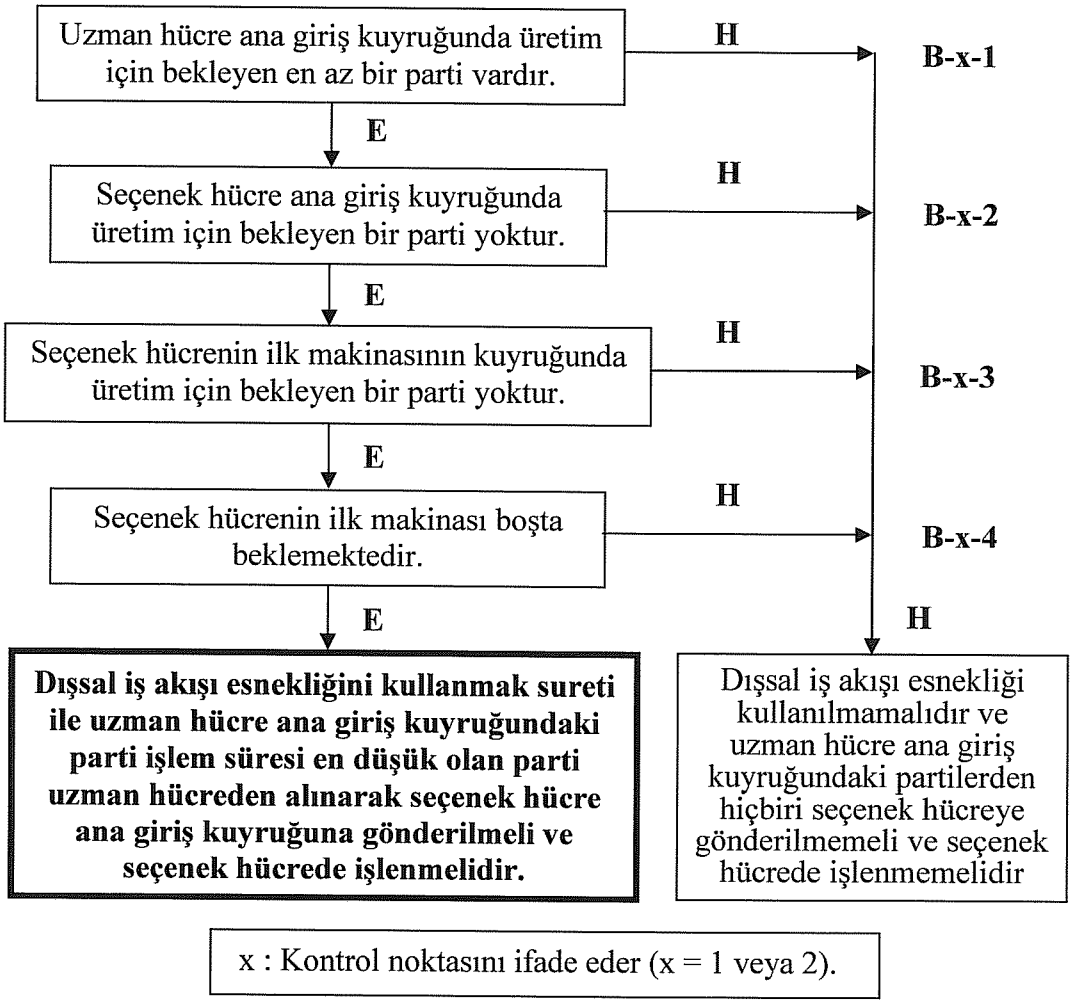
O HALDE: Dışsal iş akışı esnekliği kullanılmak sureti ile uzman hücre giriş kuyruğundaki **parti işlem süresi en düşük olan parti** seçenek hücrede işlenmelidir.



Kuy. U : Uzman hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. S : Seçenek hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. iU : Uzman hücredeki i makinasının kuyruğu.
Kuy. iS : Seçenek hücredeki i makinasının kuyruğu.

Mak. iU :Uzman hücredeki i makinası.
Mak. iS : Seçenek hücredeki i makinası.
i : Makina veya kuyruk numarası (i = 1,2,3,4 veya 5).

Şekil 5.5 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının grafik gösterimi



Şekil 5.6 : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B için Kontrol Noktası B-1 ve B-2'de uygulanan karar yapısının akış diyagramı ve karar kademeleri

AKSİ HALDE: Dışsal iş akışı esnekliği kullanılmamalıdır ve uzman hücre giriş kuyruğundaki partilerden hiçbiri seçenek hücrede işlenmemelidir.

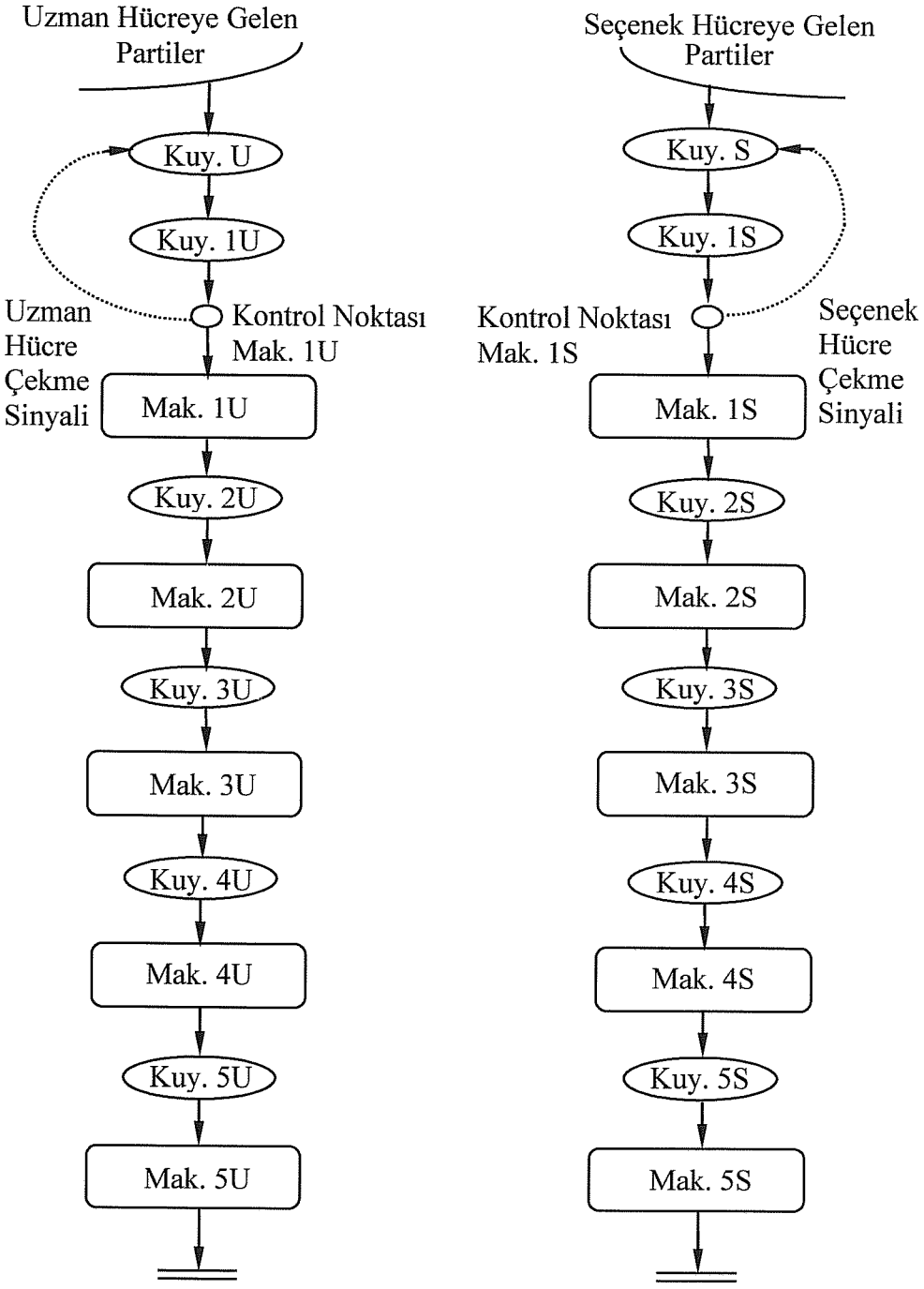
Kontrol Noktası B-2: Seçenek hücrenin ilk makinasındaki partiye ait son parçanın işlenmesinin tamamlanması sonrasında dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kararı kontrol noktası B-1 deki ile aynı karar kademelerine göre gerçekleştirilir (Şekil 5.5. ve 5.6.).

5.2.6.3. Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanmama Durumu: BAZ Durum

BAZ durumunda talep dengesizliğinin neden olduğu hücreler arasındaki yük dağılımının bozulması sonucu sistem performansındaki düşüşün giderilmesi için dışsal iş akışı esnekliğinden faydalanılmaz ve hiçbir müdahale yapılmaz. BAZ durum dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralları A ve B için bir karşılaştırma noktası olmaktadır ve grafik olarak gösterim de Şekil 5.7.' de verilmiştir.

5.2.7. Geliştirilen Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kurallarının Genel Değerlendirmesi

Yük dağılımının hücreler arasında dengesiz olarak dağılması koşulu altında uygulanmak amacı ile geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralları A ve B sadece aşırı yüklü uzman hücrenin ana giriş kuyruğundaki en düşük parti işlem süreli partiyi seçerek daha az yüklü seçenek hücreye işlenmek üzere göndermeleri dolayısı ile Kısım 5.2.1. de belirtilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının ana koşulunu sağlamaktadır. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A, tasarımı gereği, seçenek hücrenin giriş kuyruğu ile ilk makinasında işlerin olmaması ve uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip partinin seçenek hücrede üretilmesi durumundaki yeni seçenek hücre yükünün yeni uzman hücre yükünden daha düşük olmasını dikkate alarak yük dağılımının dengelenmesine daha fazla önem vermesi nedeni ile daha gelişmiş bir kural yapısına sahiptir. Diğer yandan kural B ise sadece kural A 'nın ilk safhasındaki karar aşamalarındaki yapıya göre seçenek hücrenin giriş kuyruğu ve ilk makinasında işlerin olmadığı her durum için bir seçim yapmasına karşın kural A 'nın son karar kademelerindeki yük dengesinin daha iyi bir şekilde korunmasına yönelik mekanizmayı kullanmaması nedeni ile kural A 'dan daha basit bir yapıya sahiptir.



Kuy. U : Uzman hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. S : Seçenek hücre ana giriş kuyruğu.
Kuy. iU : Uzman hücredeki i makinasının kuyruğu.
Kuy. iS : Seçenek hücredeki i makinasının kuyruğu.

Mak. iU: Uzman hücredeki i makinası.
Mak. iS : Seçenek hücredeki i makinası.
i : Makina veya kuyruk numarası
(i = 1,2,3,4 veya 5).

Şekil 5.7 : Baz durum uygulamasının grafik gösterimi

Ayrıca geliştirilen her iki dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralının dikkate değer bir diğer ortak özelliği ise her ikisinin de uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından sadece en düşük parti işlem süresine sahip partiyi seçmeleri ve ardından üretilmek üzere seçenek hücreye göndermeleridir.

5.3. Performans Ölçütleri: Geliştirilen Modelin Bağımlı Değişkenleri

Geliştirilen dışsal iş akışı esnekliği kurallarının etkinliğini karşılaştırabilmek ve değerlendirebilmek için hücresel sistemin performansını ölçmek gerekmektedir. Çalışmada dikkate alınan performans ölçütleri önem derecesine göre birincil (ana) performans ölçütleri ve ikincil (yardımcı, tamamlayıcı) performans ölçütleri olmak üzere aşağıdaki gibi iki gruba ayrılmıştır:

1. Birincil (ana) performans ölçütleri:
    a. Ortalama iş akış süresi.
    b. Ortalama katma değersiz süre oranı.
    c. Ortalama proses içi stok düzeyi.
2. İkincil (yardımcı) performans ölçütleri:
    a. Ortalama sistem kullanım oranı.
    b. Ortalama hücre kullanım oranları.
    c. Ortalama parti teslim gecikme süresi.
    d. Teslimi geciken parti adedi.

Çalışmada İkincil performans ölçütlerinin kullanılmasının ana nedeni dışsal iş akışı esnekliği kurallarının etkinlik derecesinin daha ayrıntılı olarak incelenebilmesi ve anlaşılabilmesidir. Performans ölçütlerinin birincil (ana) ve ikincil (yardımcı) ölçütler olarak ikiye ayrılmasının bir diğer nedeni ise çalışmada elde edilen sonuçların incelenme yöntemidir. Bu çalışmanın 6. Bölümünde birincil (ana) performans ölçütleri için ayrıntılı istatistik analiz ve grafik inceleme yapılacaktır, fakat ikincil (yardımcı) performans ölçütleri için ise sadece grafik irdeleme yapılacaktır.

5.3.1. Birincil (Ana) Performans Ölçütleri

Çalışmada dikkate alınan üç adet birincil (ana) performans ölçütünün tanımları aşağıdaki kısımlarda verilmektedir.

5.3.1.1. Ortalama İş Akış Süresi

Ortalama iş akış süresi hücresel sistemde işlenen partilerin dakika birimi ile ölçülen sistemde kalma sürelerinin ortalamasıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{OİAS} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_i - R_i) \tag{5.14}$$

OİAS : Ortalama iş akış süresi (dakika).

R_i : i partisinin işlenmek için hücresel sisteme geliş anı.

C_i : i partisinin tüm işlemlerinin tamamlanıp hücresel sistemden çıkış anı.

n : Bir üretim periyodunda hücresel sistemde üretilen parti adedi.

5.3.1.2. Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi

Hücresel sistemde herhangi bir anda işlenmek üzere bekleyen toplam parça adedinin zamana göre ağırlıklı ortalamasıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{OPİSD} = \frac{\sum_{i=1}^{M} N_i \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{M} \Delta t_i} \tag{5.15}$$

OPİSD: Ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi).

Δt_i : Sistem içindeki toplam parça adedinin değişmediği i zaman dilimlerinin uzunluğu.

N_i : Δt_i uzunluklu i zaman diliminde sistem içindeki toplam parça adedi.

M : Bir üretim periyodunda sistemdeki parça adedi N_i 'nin ve ilgili zaman dilimi Δt_i 'nin toplam değişim sayısı.

5.3.1.3. Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı

Bu çalışmada hücresel üretim alanında yeni bir performans ölçütü olabileceği düşünülen ortalama katma değersiz süre oranı (OKDSO) tanımlanmış ve incelenmiştir. Bir iş partisi için katma değersiz süre, partinin hücresel sistem içinde işlenmeden geçirdiği zaman dilimidir ve partinin taşınması ve kuyruklarda beklemesi sırasında harcadığı süreler toplamının bir ölçüsü olmaktadır. Ortalama katma değersiz süre oranı ise tamamlanan partilerin katma değersiz süresinin iş akış sürelerine oranlarının ortalaması olarak hesaplanan değerdir ve parça başına israf olunan zaman ya da kaynak oranı olarak yorumlanabilir. Ortalama katma değersiz süre oranı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$OKDSO = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(C_i - R_i - P_i)}{C_i - R_i} \qquad (5.16)$$

OKDSO : Ortalama katma değersiz süre oranı.

R_i : i partisinin işlenmek için hücresel sisteme geliş anı.

C_i : i partisinin tüm işlemlerinin tamamlanıp hücresel sistemden çıkış anı.

n : Bir üretim periyodunda hücresel sistemde üretilen parti adedi.

P_i : i partisinin parti işlem süresi.

5.3.2. İkincil (Yardımcı) Performans Ölçütleri

Çalışmada dikkate alınan dört adet ikincil (yardımcı) performans ölçütünün tanımları aşağıdaki kısımlarda verilmektedir.

5.3.2.1. Ortalama Sistem Kullanım Oranı

Çalışmada geliştirilen modellerin 5.4.1.'de tanımlanan parametrelerinin incelenmesinden anlaşıldığı üzere her bir partinin her bir makinadaki hazırlık ve işlem sürelerinin aynı olasılık dağılımına sahip olması nedeni ile hücresel sistemde darboğaz makina mevcut değildir. Sistemde darboğaz oluşturan bir makinanın olmaması sebebi ile tüm hücresel sistemin kullanım oranı aşağıdaki ifade ile belirlenir.

$$OSKO = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{\sum_{k_{ij}=1}^{L_{k_{ij}}} I_{k_{ij}} \times \Delta t_{k_{ij}}}{\left(\sum_{k_{ij}=1}^{L_{k_{ij}}} \Delta t_{k_{ij}} \right) \times T} \right) \quad (5.17)$$

OSKO : Ortalama sistem kullanım oranı.

k_{ij} : i hücresindeki j makinasının zaman ile değişen değerlerine ait indis.

$I_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının $\Delta t_{k_{ij}}$ zaman dilimindeki durumunu gösteren 0 veya 1 tamsayı değişkeni:

$I_{k_{ij}}$: 1, i hücresindeki j makinası hazırlık veya işleme durumunda,

$I_{k_{ij}}$: 0, i hücresindeki j makinası diğer durumlarda.

$\Delta t_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$'nin değişmediği k_{ij} zaman dilimlerinin uzunluğu.

$L_{k_{ij}}$: Bir üretim periyodunda i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$'nin ve ilgili zaman dilimi $\Delta t_{k_{ij}}$'nin toplam değişim sayısı.

M : Sistemdeki toplam hücre adedi.

N_i : i hücresindeki toplam makina adedi.

T : Hücresel sistemdeki toplam makina adedi.

5.3.2.2. Ortalama Hücre Kullanım Oranları

Çalışmada geliştirilen modellerin 5.4.1.'de tanımlanan parametrelerinin incelenmesinden anlaşıldığı üzere her bir partinin her bir makinadaki hazırlık ve işlem sürelerinin aynı olasılık dağılımına sahip olması nedeni ile hücrelerde darboğaz makina mevcut değildir. Hücrelerde darboğaz oluşturan bir makinanın olmaması sebebi ile hücre kullanım oranları aşağıdaki ifade ile belirlenir.

$$OHKO_i = \sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{\sum_{k_{ij}=1}^{L_{k_{ij}}} I_{k_{ij}} \times \Delta t_{k_{ij}}}{\left(\sum_{k_{ij}=1}^{L_{k_{ij}}} \Delta t_{k_{ij}} \right) \times N_i} \right) \quad (5.18)$$

$OHKO_i$: i hücresinin ortalama kullanım oranı.

k_{ij} : i hücresindeki j makinasının zaman ile değişen değerlerine ait indis.

$I_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının $\Delta t_{k_{ij}}$ zaman dilimindeki durumunu gösteren 0 veya 1 tamsayı değişkeni:

$I_{k_{ij}}$: 1, i hücresindeki j makinası hazırlık veya işleme durumunda,

$I_{k_{ij}}$: 0, i hücresindeki j makinası diğer durumlarda.

$\Delta t_{k_{ij}}$: i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$'nin değişmediği k_{ij} zaman dilimlerinin uzunluğu.

$L_{k_{ij}}$: Bir üretim periyodunda i hücresindeki j makinasının durumunu gösteren durum değişkeni $I_{k_{ij}}$' nin ve ilgili zaman dilimi $\Delta t_{k_{ij}}$'nin toplam değişim sayısı.

N_i : i hücresindeki toplam makina adedi.

5.3.2.3. Ortalama Parti Teslim Gecikme Süresi

Bir partinin teslim gecikmesi, o partinin müşteriye teslim edilmesi gereken zamandan daha geç bir zamanda bitirilmesi durumunda ortaya çıkan ve dakika birimi ile ölçülen gecikme süresidir. Ortalama gecikme süresi ise geç teslim edilen tüm partilerin gecikme sürelerinin ortalamasıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$OPTGS = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \max\left(B_i - T_i, 0\right)}{N_g} \quad (5.19)$$

$$T_i = K \cdot P_i = 1.5 \cdot P_i \quad (5.20)$$

OPTGS : Ortalama parti teslim gecikme süresi (dakika).

N_g : Üretimi teslim zamanından daha geç bitirilen parti adedi.

B_i : i partisinin (tüm paçalarının) üretiminin bitirilme zamanı.

T_i : i partisinin müşteriye teslim zamanı.

P_i : i partisinin parti işlem süresi.

K : Sabit çarpan (K=1.5).

Yukarıdaki 5.20 formülü bir partinin teslim zamanının o partinin parti işlem süresinin (partinin sistemde oluşturduğu iş yükünün) bir K sabiti ile çarpımı ile belirlendiğini ifade eder [141,145,226]. Teslim zamanı ifadesindeki K çarpanı genellikle 1' den daha büyük bir sayıdır ve bu çalışmada hücresel üretimin parti teslim sürelerinde kısalma sağlaması nedeni ile K=1.5 gibi oldukça ufak bir çarpan seçilmiştir [227].

5.3.2.4. Teslimi Geciken Parti Adedi

Bu performans ölçütü teslim zamanından daha geç bir zamanda üretimi tamamlanan parti adedidir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$TGPA = \sum_{i=1}^{N} \delta\left(\max\left(B_i - T_i, 0\right)\right) \tag{5.21}$$

TGPA : Teslimi geciken parti adedi ($= N_g$)

N : Üretimi tamamlanan toplam parti adedi.

B_i : i partisinin (tüm paçalarının) üretiminin bitirilme zamanı.

T_i : i partisinin müşteriye teslim zamanı.

$\delta\left(\max\left(B_i - T_i, 0\right)\right) = 1$, eğer $\delta\left(\max\left(B_i - T_i, 0\right)\right) > 0$ ise

$\delta\left(\max\left(B_i - T_i, 0\right)\right) = 0$, diğer durumlarda.

5.4. Çalışmada Geliştirilen Benzetim Modelleri

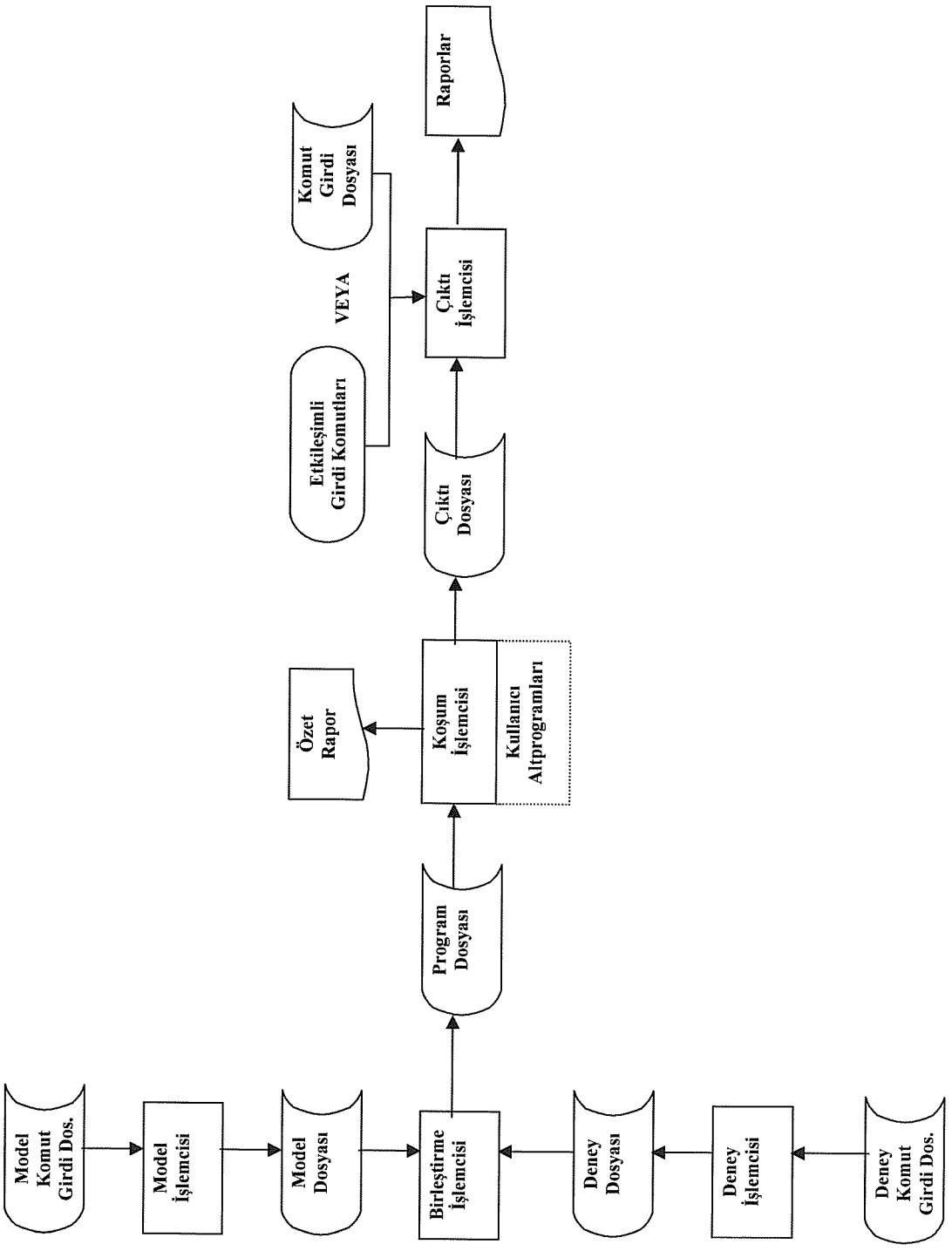
Daha önce de belirtildiği gibi problemin dinamik yapısının incelenmesi bakımından en uygun yaklaşım olarak benzetim yöntemi seçilmiştir. Bu kısımda ise dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının incelenmesi için geliştirilen benzetim modelleri

tanıtılacaktır. Benzetim konusu ile ilgili kapsamlı yayın taraması sonucu ayrık olaylara dayalı benzetim için en uygun yazılımlar arasında olan SIMAN seçilmiştir [94,228,229]. SIMAN yazılım ortamındaki çalışma planı Şekil 5.8.' de görüldüğü gibi sistem modeli geliştirme, deney çerçevesi geliştirme ve çıktı analizi olarak farklı 3 faaliyete bölünmüştür. Bu üç ana faaliyet alanının birleştirilmesi ise SIMAN yazılımının yapısındaki 5 farklı işlemcinin (derleyici) 4 farklı veri dosyası üzerinden etkileşmesi ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.8). SIMAN yazılımının sistem model olanağı kullanılmak sureti ile incelenen sistemin dinamik yapısı ve deney çerçevesi olanağı ile de modelin koşum şartları kodlanabilir.

Çalışmada, daha önce yapıları açıklanan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralları **kural A** ve **kural B** ile hiçbir kararın uygulanmadığı **BAZ** duruma ait 3 ayrı hücresel sistem için SIMAN sistem modelleri geliştirilmiş ve bu kuralların uygulama koşullarını belirleyen istatistiksel deney tasarımları için de SIMAN deney çerçeveleri oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem modelleri ile deney çerçevelerinin yapıları benzer olmakla birlikte kuralların ayrıntıları ve uygulama mantığına göre belirli düzeyde farklılıklar göstermektedir. Benzetim süresince model içindeki değişik noktalardan veri toplanır ve bu veriler ileride analiz edilmek üzere WRITE komutu ile uygun dosyalara yazdırılır. Benzetimin her tekrarın sona ermesi ile performans ölçütleri ve diğer bazı istatistikler standart SIMAN çıktı (sonuç) raporuna kaydedilir. Sistem modelleri ile deney çerçeveleri için geliştirilen SIMAN program kodlarına ait örnek program parçaları Ek B' de ve örnek SIMAN özet rapor çıktı parçası ise Ek C' de verilmiştir.

5.4.1. Modellerin Parametreleri

Bu bölümün giriş kısmında da belirtildiği gibi ŞİŞECAM Holding Camiş Makina ve Kalıp Sanayii A.Ş. Cam Kalıbı Atelyesi'nin hücresel üretime dönüşümü çalışması kapsamında derlenen üretim parametrelerinin, incelemenin amacı doğrultusunda, kısmen ayarlanması sureti ile belirlenmiş olan model parametreleri aşağıda verilmiştir [221-225]:

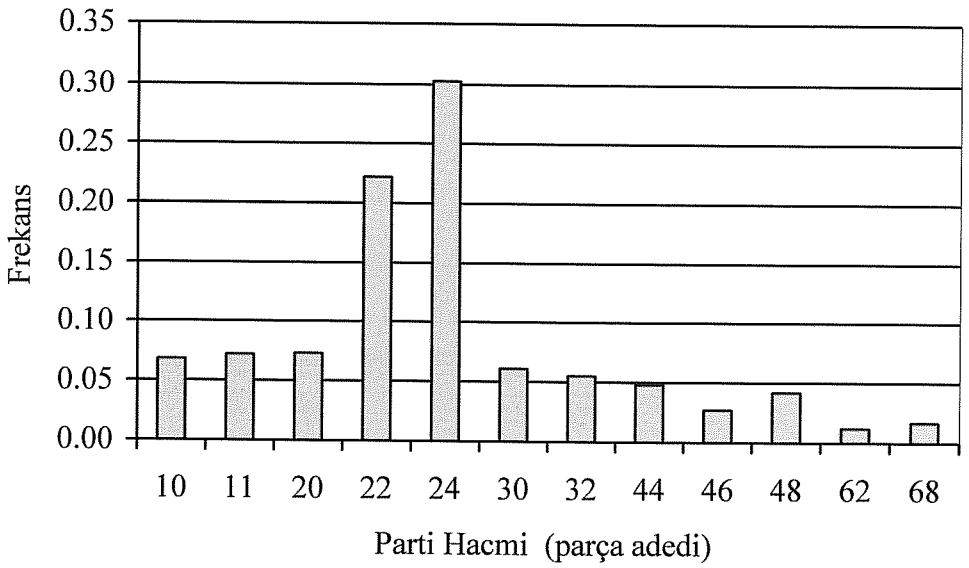


Şekil 5.8 : SIMAN yazılım düzeni

1. Parti talep hacmi dağılımı: Geçmiş cam kalıbı sipariş kayıtlarından alınan örnek sonucu bulunan cam kalıbı üretim parti hacimlerinin ortalaması (25.948 ≈) 26 parça adedi olan kesikli dağılım fonksiyonu Tablo 5.1 ve Şekil 5.9.' da görülmektedir.

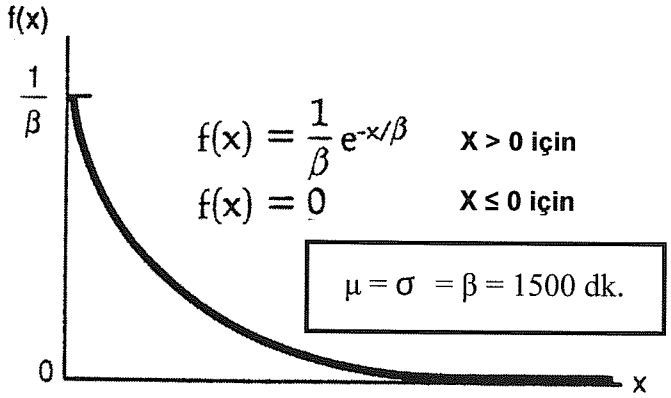
Tablo 5.1 : Parti hacmi dağılımı

Parti Hacmi (parça adedi)	10	11	20	22	24	30
Frekans (Olasılık)	0.068	0.072	0.073	0.222	0.303	0.061
Parti Hacmi (parça adedi)	32	44	46	48	62	68
Frekans (Olasılık)	0.055	0.048	0.027	0.042	0.012	0.017



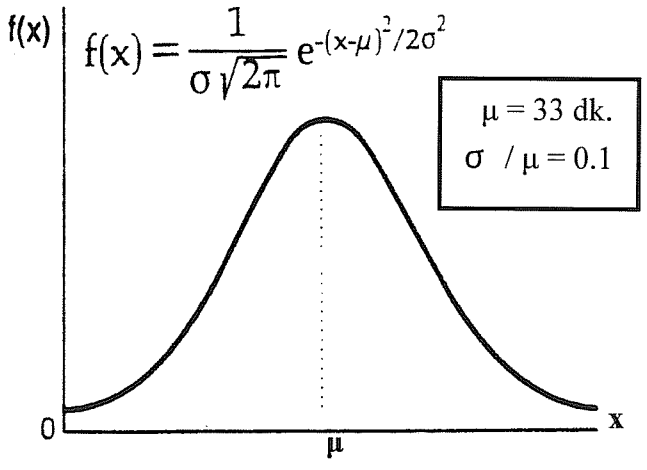
Şekil 5.9 : Parti hacmi dağılımı

2. Partilerin gelişleri arasındaki sürenin dağılımı: Cam kalıbı iş emirlerinin incelenmesi sureti ile partilerin hücresel sisteme gelişleri arasındaki süre dağılımının ortalaması ve standart sapması 1500 dakika (dk.) olan üstel dağılım ile ifade edilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir, Şekil 5.10.



Şekil 5.10 : Partilerin gelişleri arası sürelerinin dağılımı: üstel dağılım

3. Parça işlem sürelerinin dağılımı: Cam kalıbı parçalarının üretim bilgilerinin incelenmesi sonucu işlem süreleri için ortalaması 33 dakika (dk.) ve değişim katsayısı 0.1 olan normal dağılımın kullanılabileceği belirlenmiştir, Şekil 5.11.



Şekil 5.11 : Parça işlem sürelerinin dağılımı: normal dağılım

4. Parti hazırlık sürelerinin dağılımı: Hazırlık sürelerinin dağılımı için ortalaması 150 dakika ve standart sapması 46.5 dakika olan ve aşağıdaki ifadelerle belirlenen simetrik ve ölçekli bir beta dağılımının uygun olduğu belirlenmiştir:

$x^* = 75 + 150 \cdot x$ (dakika) (5.22)

$x = \text{Beta}\ (0.8, 0.8)$ (dakika) (5.23)

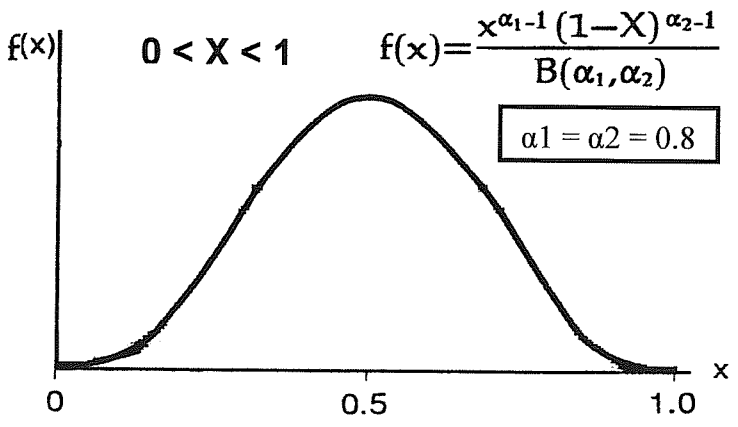
x^* : Simetrik ve ölçekli beta dağılımlı hazırlık süresinin olasılık değişkeni.

x : tanım parametreleri $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$ olan simetrik beta dağılımlı olasılık değişkeni, Şekil 5.12.

Beta (0.8, 0.8) : SIMAN fonksiyon kütüphanesindeki beta dağılımına uygun rassal sayı x' i üreten fonksiyon [Beta (α_1 , α_2) SIMAN fonksiyonun parametreleri için çalışmadaki modellerde $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$ olarak seçilmiştir, Şekil 5.12.].

Yukarıdaki ifadelerden anlaşıldığı üzere hazırlık sürelerinin dağılımı için çalışmada kullanılan simetrik ve ölçekli beta dağılımının ifadesi aşağıdaki olmaktadır:

$x^* = 75 + 150 \cdot \text{Beta}\ (0.8, 0.8)$ dk. $[\mu = 150$ dk., $\sigma = 46.5$ dk.] (5.24)



Şekil 5.12 : Simetrik beta dağılımı

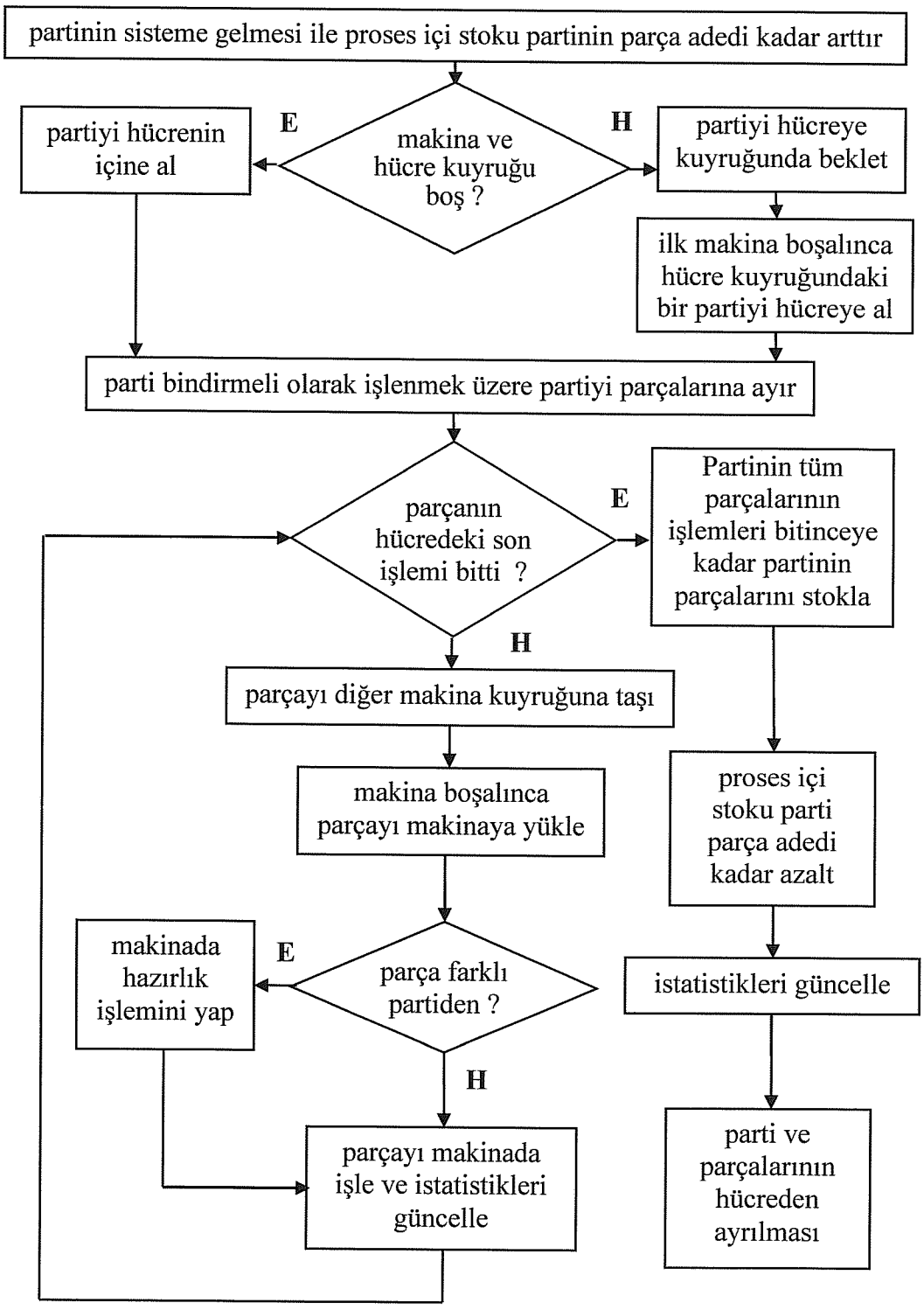
5.4.2. Benzetim Modellerinin Yapıları

Bu çalışmada talep dengesizliği sonucu aşırı yüklenen uzman hücredeki bazı partilerin, dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarından **kural A** veya **kural B** nin uygulanmasına bağlı olarak, daha az iş yükü olan seçenek hücrede üretilmesi sureti ile hücresel sistemin veriminin iyileştirilmesi durumu incelenmektedir. Dolayısı ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması uzman ve seçenek hücre olmak üzere iki adet hücre ile ilgili olduğu için, çalışmada geliştirilen hücresel sistem modelleri daha büyük bir sistemin alt sistemi olarak düşünülen iki adet hücreden oluşan bir sistem şeklinde tasarlanmıştır. Modellerdeki her hücrede 5 adet makina ve tüm sistemde ise toplam olarak 10 adet makina vardır. Uzman ve seçenek hücrelerdeki makinalar karşılıklı olarak benzerdir ve bu makinalar aynı işlemleri, aynı ya da farklı etkinliklerde gerçekleştirebilir.

Çalışmada geliştirilen benzetim modelleri SIMAN benzetim yazılımında kodlanmıştır. Sistem modelleri ile deney çerçeveleri için geliştirilen SIMAN program kodlarına ait örnek program parçaları Ek B' de ve örnek SIMAN özet rapor çıktı parçası ise Ek C' de verilmiştir. Çalışmada 5'er makinalı 2 hücreden oluşan modellerin seçilmesinin ana nedeni hücresel üretimde dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının incelenmesini gereksiz ayrıntılardan arındırıp basitleştirmek sureti ile değişik faktörlerin etkilerinin açık olarak analiz edilebilmesini sağlamaktır. Orta ölçekli modeller üzerinde çalışmanın bir diğer nedeni ise modelin SIMAN benzetim yazılımında kodlanarak, kişisel bilgisayarda koşumu sırasında karşılaşılabilecek hafıza yetersizliği ve uzun zaman gereksinimi gibi sorunların en alt düzeyde tutulabilmesini sağlamasıdır. Hücreler akış tipi olarak modellenmiştir ve bir iş bir hücreye girince tek bir iş akış hattı üzerindeki ilk makina, diğer ara makinalar ile son makinada sıra ile işlenerek hücreyi terk eder. Geliştirilen modeldeki hücrelerde her makina tipinden bir adet bulunduğu varsayılmaktadır. Ayrıca bir hücre içinde adedi birden fazla olan makina tiplerinin kapasitesini belli bir oranda arttırmak sureti ile modelle katmak olanaklıdır. Bu çalışmada geliştirilen benzetim programları farklı kuyruk sıralama kuralarının kullanılmasına olanak verecek şekilde kodlanmış olmakla birlikte çalışmanın kapsamının sınırlandırılması bakımından hücre girişlerindeki kuyruklarda ile hücre içindeki makina kuyruklarında bekleyen parti ve parçaların işlenme sırası için ilk gelen önce (İGÖ) kuyruk sıralama kuralı uygulanmıştır.

Benzetim modellerinin mantıksal yapıları Şekil 5.3' den Şekil 5.7' ye kadar olan şekillerde ve Şekil 5.13' de verilmiştir. Çalışmada geliştirilen hücresel üretim sistemlerinde partilerin sistem içinde ilerleme ve hücrelerin yüklenme mekanizması hücrenin ilk makinasında işlenmekte olan ve hücrenin ilk makina kuyruğunda bekleyen hiçbir partinin bulunmaması durumunda hücre ana giriş kuyruğuna gönderilen çekme sinyalleri sureti ile sağlandığı için geliştirilen hücresel sistem modellerinin çalışma mekanizmaları tam zamanında üretim sistemlerinin temeli olan çekme veya kanban sistemlerine benzemektedir (Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7). Aynı zamanda hücrelerin yukarıda açıklanan yüklenme tekniği yüke göre iş gönderme yöntemindeki sistem yükleme mekanizmasına oldukça benzemektedir. Benzetime sistem değişkenlerine başlangıç değerlerinin atanması ile başlanır. Başlangıç değerlerinin bir kısmı deney çerçevesinde içinde belirlenmiştir ve bir diğer kısmı ise model tarafından girdi dosyasından okunur ve partilerin hücre kuyruklarına gelişleri oluşturur. Eğer bir dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı (Şekil 5.4. ve Şekil 5.6.) uygulanıyor ise uzman hücre parti kuyruğu girişi öncesi yapılan kontrole göre uzman hücre giriş kuyruğundaki partilerden uygun olanı seçenek hücreye gönderilir (Şekil 5.3 ve 5.5). İşlerin sisteme yüklenmesi için makina yükleme yöntemi seçilmiştir ve buna uygun olarak da hücrelerde parti bindirmeli (paralel) üretim çizelgelemesi uygulanmıştır. Partilerin bölünmesi ile oluşan alt partilerdeki parça sayısı bir adettir ve bir makinada işlemi biten parça, partideki tüm parçaların işlenmesini beklemeden iş akış hattı üzerindeki diğer işlem için bir sonraki makina kuyruğuna gönderilir. Makinaların hazırlanması ise aşağıdaki üç duruma göre gerçekleştirilir (Şekil 5.13.):

1. Eğer bir makinada bir partinin tüm işi bitirilmiş ve makinanın kuyruğunda da başka bir partiye ait bir parça var ise kuyruktaki partinin işlenebilmesi için makinanın hazırlanmasına hemen başlanır.
2. Eğer bir makinada bir partinin tüm işlemleri tamamlandığı zaman makina kuyruğu boş ve hücre içinde de bu makinadan önceki herhangi bir makinada işlenmekte olan ve iş akış hattı üzerinde de bu makinanın olduğu bir parti var ise bu parti makinaya gelmeden önce makina hemen hazırlanır.
3. Eğer bir makinada hazırlanmakta veya işlenmekte olan bir partinin iş akış hattı üzerindeki bir sonraki makina boş ise önceki makinadaki parti daha makinaya gelmeden önce boş makina bu partiyi işlemek üzere hemen hazırlanır.



Şekil 5.13 : Benzetim modellerinin basitleştirilmiş akış diyagramı

Hücrelerin yüklenmesi bakımından makina yükleme tekniğinin uygulanmış olmasına rağmen yukarıda açıklanan tarzda bir hazırlık metodunun benimsenmesi sonucu aslında hücre yüklemesi yöntemindeki hücre hazırlanmasına benzer bir hazırlık

taktiği kullanılmıştır ve dolayısı ile hazırlık sürelerinin de en düşük düzeyde tutulabilmesi sağlanmıştır (Şek 5.13.). Seçenek hücredeki bir makinada işlenen bir partinin ardından farklı aileye ait diğer bir parti işlenirse normal hazırlık süresi aşağıdaki bağıntıya göre belli bir miktarda artmaktadır:

$$yhs = nhs \times (1 + (0.5 \times hsay)) \tag{5.25}$$

yhs : Artan yeni hazırlık süresi.
nhs : Normal hazırlık süresi.
hsay : Hazırlık süresi artış yüzdesi.

5.4.3. Modeli Tasarlanan Hücresel Sistemin Dışsal İş Akışı Esneklik Yeteneği

Bir hücresel sistemin dışsal iş akışı esneklik yeteneği, sisteme gelen değişik işlerin üretilebileceği farklı hücrelerin oranı şeklinde tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$DREY = \frac{\left[\sum_{i=1}^{J}\sum_{k=1}^{N} I_{ik}\right] - J}{J*(N-1)} \tag{5.26}$$

DREY : Dışsal iş akışı esneklik yeteneği.
I_{ik} : 1, eğer i partisinin (işinin) k hücresinde üretilebilmesi olanaklı ise
0, aksi halde.
J : Farklı tipteki toplam iş (parti) adedi.
N : Toplam hücre adedi.

Dışsal iş akışı esneklik yeteneği hücresel sistemin makina yoğunluğu ile yakından ilgilidir. Makina yoğunluğu bir hücresel sistemin farklı hücrelerinde bulunan benzer makinaların sıklık derecesi olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$MY = \frac{\left[\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N} I_{jk}\right] - M}{M*(N-1)} \tag{5.27}$$

MY : Makina yoğunluğu.

I_{jk} : 1, eğer j tipi makina k hücresinde mevcut ise
0, aksi halde.

M : Farklı tipteki toplam makina adedi.

N : Toplam hücre adedi.

Benzetim modellerindeki hücresel sistemin dışsal iş akışı esneklik yeteneği ve makina yoğunluğunun her ikisi de bire eşittir. Dolayısı ile çalışma kapsamında incelenen hücresel sistemin dışsal iş akışı esneklik yeteneği en üst düzeydedir.

5.4.4. Benzetim Modelinin Genel Varsayımları

Akış veya atelye tipi hücrelerdeki çizelgeleme problemi ile ilgili yapılan çalışmalarda uygulanan bir dizi varsayım vardır. Aşağıda listesi verilen varsayımlar kapsamlı olmamakla birlikte, çalışmanın gereksiz ayrıntılardan arındırıp basitleştirmesini sağlayan en önemli ve belirgin varsayımlardır:

1. Hücreler akış tipidir.
2. Partilerin hücresel sisteme yüklenmesi için makina yükleme yöntemi kullanılmaktadır ve hücreye giren partilere ait parçalar birer birer parti bindirmeli (paralel) olarak işlenmektedir.
3. Partilerin sisteme gelişleri arasındaki süre, parti hazırlık süreleri ve parça işlem süreleri uygun olasılık dağılım fonksiyonları ile ifade edilebilir.
4. Her iş partisine ait bir uzman hücre ile aynı iş partisine ait tüm işlemleri yapabilen benzer makinalara sahip en az bir adet seçenek hücre vardır.
5. Uzman hücre yerine seçenek hücre tarafından işlenen işlerin hazırlık ve işlem sürelerinde belirli bir oranda artış olmaktadır.
6. Her partiye ait tüm işlemler sadece ve sadece partinin ait olduğu uzman veya seçenek hücrede gerçekleştirilebilir. Yani bir partiye ait parçalar değişik hücrelere dağıtılmak sureti ile işlenemez.
7. Her hücrede her bir makina tipine ait sadece ve sadece bir adet makina vardır.
8. Makina bozulmaları dikkate alınmamaktadır.
9. İş gücü, malzeme ve takım-tertibat sınırsız kaynaklardır.
10. Hazırlık süreleri ve işlem süreleri ayrı ayrı faktörler olarak dikkate alınmıştır ve işlem süreleri hazırlık sürelerini kapsamaz.

11. Partilerin makinalar arasında taşınma süreleri ihmal edilebilir veya işlem süreleri taşıma sürelerini de kapsamaktadır.
12. Ancak ve ancak, bir makinada işlenmekte olan bir partiye ait tüm parçalar işlendikten sonra, aynı makinada, diğer bir partiye ait parçaların işlenmesine başlanabilir.
13. Hücresel üretim sisteminin kapasitesi sabit ve sınırlıdır.
14. Hatalı üretilen ve/veya hurda parçalar yoktur.
15. Sistem kararlı rejim halinde üretim yapmaktadır.
16. Bir iş bir makinaya en çok bir kez uğrayabilir.
17. İşler arasında işlenme sırası açısından bir kısıt yoktur ve birbirlerinden bağımsızdır.
18. İşlerin akış hatları (işlendiği makinalar) ve teslim tarihleri belirlidir.
19. Bu çalışmada geliştirilen benzetim programları farklı kuyruk sıralama kuralarının kullanılmasına olanak verecek şekilde tasarlanmış olmakla birlikte çalışmanın kapsamının sınırlandırılması bakımından hücre girişlerindeki kuyruklarda ile hücre içindeki makina kuyruklarında bekleyen parti ve parçaların işlenme sırası için ilk gelen önce (İGÖ) kuyruk sıralama kuralı uygulanmıştır.

5.5. Benzetim Modelinin Testi ve Geçerliliği

Bir benzetim modelinin testi (İng: verification) tasarlanan modelin bilgisayar kodlarına hatasız olarak dönüştürüldüğünü ve oluşturulan benzetim programının doğru çalıştığını belirlemek anlamına gelmektedir [94,230]. SIMAN yazılımının programın adımlarını izleme olanağı sağlayan iz sürme (TRACE) ve etkileşimli hata bulma (İng: interactive debugger) modülü ile sistem içindeki parçaların kendi iş akış hatlarına ve dışsal iş akışı esnekliği kurallarına uygun olarak kuyruk ve makinalar üzerinden akışının kontrolu sureti ile tüm kodlama hataları düzeltilmiştir. İz sürme (TRACE) modülünü kullanarak hata giderme işlemine ait bir çıktı parçası örneği Ek D' de verilmiştir. Benzetim programının mantık yapısında oluşabilecek hatalara karşı programa uyarı mesajları yerleştirilmiştir. SIMAN yazdırma (WRITE) komutu kullanılarak model içinde hesaplanan bazı değişkenlerin değerlerinin çıktı dosyalarına yazdırılması ve elle yapılan hesaplarla karşılaştırılması yolu ile tespiti oldukça zor olan bazı hataların düzeltilmesi sağlanmıştır. Benzetim programının

geliştirilmesi aşamasında gerçekleştirilen oldukça çok sayıdaki test koşumları üzerinde yukarıda açıklanan hata bulma işleminin uygulanması sonucu benzetim modelinin bilgisayar kodları olası tüm hatalardan arındırılmıştır.

Benzetim modellerinin geçerliliği (İng: validation), gerçek sistemlerin davranışı ve özelliklerini kabul edilebilir bir yaklaşıklık ile temsil edebilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir [94,230]. Ayrıca benzetim modellerinin geçerli olabilmesi için modelin ürettiği çıktıların mevcut teorik bulgular ve inceleme alanındaki genel bilgiler ile uyumlu olması gerekir. Çalışmada geliştirilen benzetim modelleri aşağıdaki özellikleri dolayısı ile geçerli modeller olarak değerlendirilebilir.

1. Bu çalışmada yapılan varsayımlar üretim benzetimi alanındaki diğer çalışmalarda yaygın olarak kullanılan varsayımlar arasındadır.
2. Modele ait parametreler, bu bölümün giriş kısmında da belirtildiği gibi, gerçek bir cam kalıbı atelyesinden toplanan üretim bilgilerinin derlenmesi ile türetilmiştir.
3. Tasarım faktörlerinin 6. bölümde açıklanacak olan seviyelerinin seçimi yapılırken değerlerinin gerçek üretim ortamlarında oluşabilecek değerler olabilmelerine özellikle dikkat edilmiştir.
4. Modellerde toplam on adet makina vardır ve yapılan diğer çalışmalardaki makina adetleri ise dört ile otuz arasında değişmektedir [147,156-158,231]. Dolayısı ile modeller makina sayısı bakımından yeterli büyüklüktedir.
5. Partilerin hücresel sisteme gelişleri arasındaki ortalama süre ortalama sistem kullanım oranı % 67 ile % 71 arasında olacak şekilde seçilmiştir. Bu kullanım oranı düzeyi hücresel üretim alanındaki diğer çalışmalardaki değerler alanında bulunmaktadır [93,138,146]. Ortalama sistem kullanım oranı çalışmanın 6. bölümünde belirlenen faktörlerin seviyelerine bağlı olarak diğer çalışmalarda da kullanılan % 89 değerine kadar çıkabilmektedir [89,90,127,128].
6. Geliştirilen benzetim modellerindeki hazırlık süresinin işlem süresine oranı çalışmanın 6. bölümünde dikkate alınan faktörlerin seviyelerine bağlı olarak % 17 ile % 34 arsında değişmektedir ve hücresel üretim benzetimi alanında yapılmış olan diğer çalışmalardaki değerler ile örtüşmektedir [89,90,127,128,171,232].

7. Bu çalışmada geliştirilen modellerin yapısında sistem performansını sınırlayan darboğaz makinalar yoktur. Modellerdeki işlem ve hazırlık sürelerinin değişkenliğinin makinalar ve parçalar bakımından homojen olması nedeni ile oluşabilecek darboğazlar kısa peryodlu ve geçicidir. Dolayısı ile benzetim çıktılarının analizinden sistemin genel davranışını yansıtan oldukça ayrıntılı sonuçlar elde edilebilir.
8. Bu çalışmada işlerin sisteme gelişleri arasındaki süre için üstel dağılım ve işlem süreleri için de normal dağılım kullanılmıştır ve bu iki dağılım türü diğer çalışmalarda da yaygın olarak aynı amaç ile kullanılmaktadır. Ayrıca işlem süreleri için kullanılan normal dağılımın ortalamasının standart sapmasının dört katından ve sıfırdan büyük olma koşulu sağlanmıştır [94].
9. Çalışmada geliştirilen modellerdeki hücreler akış tipidir. Atelye tipi akışın olduğu hücrelerde de akış tipi hücrelere benzer şekilde her bir partiye ait parçalar aynı makinalar üzerinden aynı sırada işlendiği için bu çalışmadan elde edilecek sonuçların değişik hücresel sistem yapılarında genel olarak geçerli olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak bu çalışmadaki modellerin özelliklerinin bu alanda yapılan önemli diğer çalışmalardaki modellerin özelliklerinin kapsamı içinde bulunması ve sistem parametrelerinin de gerçek bir hücresel sisteme ait verilerden türetilmiş olması nedeni ile geliştirilen benzetim modelleri geçerli modeller olmaktadır.

6. BENZETİM SONUÇLARININ ANALİZİ VE YORUMU

6.1. Giriş

Bu bölümde yük dengesizliği seviyesi ile işlem süresi ve hazırlık süresi artış yüzdesi faktörlerinin tanımlanacak olan seviyelerinin oluşturduğu değişik üretim koşullarında faaliyet gösteren bir hücresel sistemde geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması sonucunda, bir önceki bölümde tanımlanan, birincil ve ikincil performans ölçütlerinde oluşan değişimin analiz ve yorumu yapılacaktır. Bu çalışmadaki "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır. İncelemenin asıl amacı geliştirilen kuralların etkinliğini karşılaştırmaktır. Kuralların uygulanmasının ortalama iş akış süresi (OİAS), ortalama proses içi stok düzeyi (OPİSD) ve ortalama katma değersiz süre oranı (OKDSO) gibi üç birincil performans ölçütü üzerindeki etkisi eşleştirilmiş t testi yöntemi ile istatistiksel anlamda karşılaştırılacaktır. Eşleştirilmiş t testi ile karşılaştırmalar: 1. kural A ile baz durum, 2. kural B ile baz durum, 3. kural A ile kural B arasında olmak üzere üç grup halinde yapılacaktır.

Benzetim deneyinin tasarımı ve sonuçların analizi incelenen sistemin sonlanan (İng: terminating) veya sonlamayan (İng: non-terminating) tipte olmasına göre değişmektedir. Sonlanan sistemlerde faaliyetler belirli bir zamanda başlar, belirli bir süre devam eder ve belirli bir zamanda biter. Sonlanmayan sistemlerde ise faaliyetler bir kez başladıktan sonra sona ermeden sürekli devam eder. Ürün stoklarının bir vardiyadan diğerine aktarılarak üretim faaliyetine sürekli devam edildiği için üretim sistemleri sonlanmayan (İng: non-terminating) sistemlerdir. Aşağıdaki kısımlarda, öncelikle geliştirilen benzetim modellerinin çıktıları olan ortalama performans ölçütlerinin üzerinde istatistik analizlerin yapılabilmesi amacı ile çıktıların başlangıç yanlılığını gidermek için budama noktasının belirlenmesi ve tekrarlı koşumların uygulanması konuları açıklanacaktır. Daha sonra da deney tasarımının tanıtımı ile bu tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen ana benzetim koşumlarından elde edilen

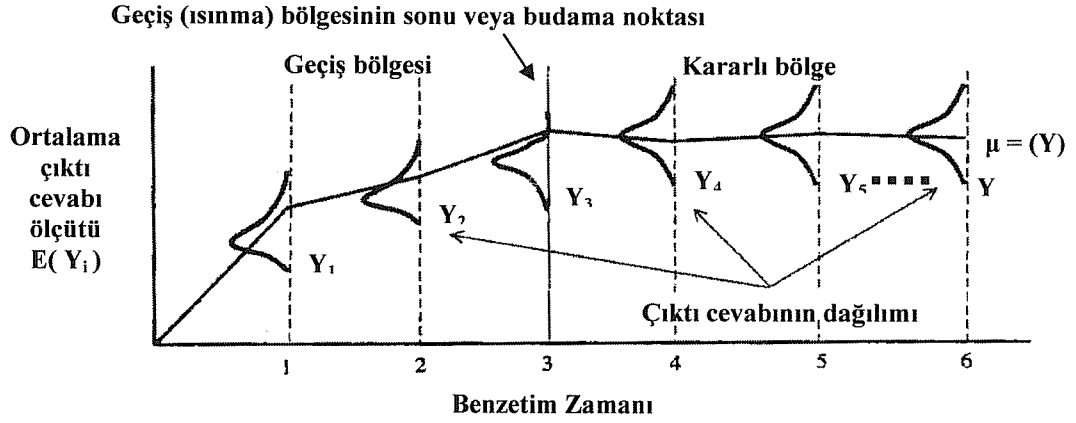
birincil ve ikincil performans ölçütlerinin analiz ve yorumu yapılacaktır. Bu çalışmadaki istatistik yaklaşımın ana hatları Şekil 6.1 'de görülmektedir.

Şekil 6.1 : Çalışmadaki istatistik yaklaşımın ana kademeleri

6.2. Budama Noktasının Belirlenmesi

Sonlanmayan (İng: non-terminating) ve kararlı benzetim modellerinin performans ölçütü çıktılarının başlangıç anından itibaren geçen belirli bir süre sonunda Şekil 6.2' de görüldüğü gibi stokastik olarak kararlı hale gelmesi için geçen süreye geçiş dönemi denir. Kararlı bir olasılıklı benzetim sistemi için bir partinin darboğaz makinadaki ortalama işlem süresi ile ortalama hazırlık süresi toplamının ortalama parti gelişleri arasındaki süreye oranı ile ifade edilen sistem yük oranın 1' den küçük olması gerekir. Bu çalışmadaki geliştirilen hücresel sistemlerin modellerine ait bir önceki bölümde verilen parametreler ile bu bölümün daha sonraki kısımlarında tanıtılacak olan deney tasarım faktörlerinin seviyeleri dikkate alınır ise uzman

hücrenin en yoğun yüklenme durumunda oluşabilecek en büyük sistem yüklenme oranı 0.89 (≈ [150 + 25.948 × 33] dk. / 1125 dk.) değerindedir ve dolayısı ile en yüksek yüklenme oranı 1 'den ufak olduğu için geliştirilen modeller kararlı modeller olmaktadır. Gerçek üretim sistemlerinin üretim yükünü karşılayabilmesi için kararlı olmasının gerekliliği dolayısı ile çalışmada geliştirilen kararlı hücresel üretim sistemleri gerçek endüstriyel uygulamayı sağlamaktadır.



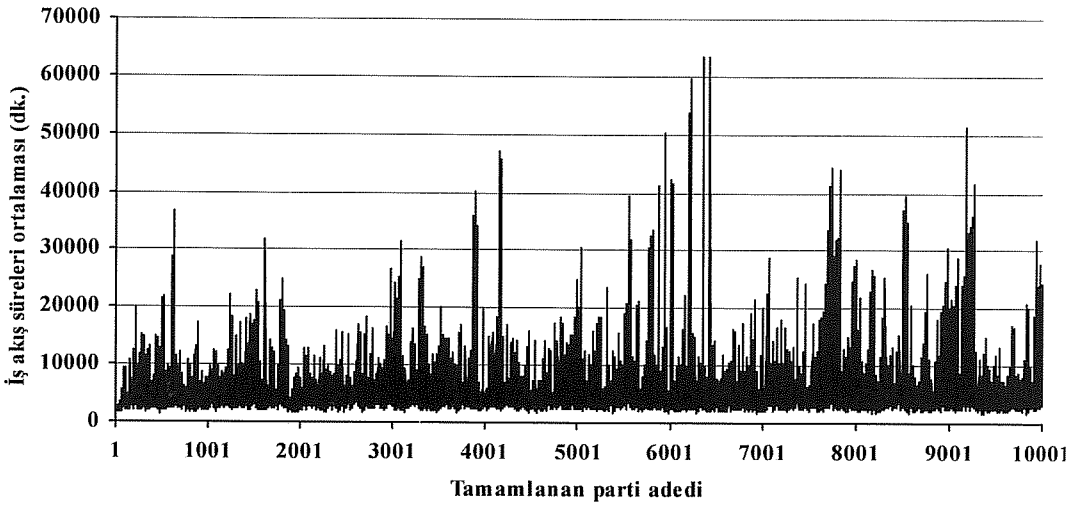
Şekil 6.2 : Çalışmadaki benzetim modellerinin performans ölçütü çıktılarının genel davranışı

Şekil 6.2 'de görüldüğü üzere geçiş döneminin uzunluğu sistemin başlangıç koşullarına bağlı olmasına karşın geçiş döneminin ardından gelen kararlı bölgedeki sistem davranışı başlangıç koşullarına bağlı değildir [233-237]. Dolayısı ile benzetimin başlangıcındaki geçiş dönemine ait çıktılar üzerinde başlangıç koşullarının oluşturduğu yanlılık (İng: bias) vardır. İstatistik analiz için benzetim çıktılarının kararlı olduğu bölgedeki değerler anlamlı olmaktadır. Sistemin kararlı olan performans değerlerinin analizi için başlangıç yanlılığı ve geçiş döneminin etkisinin en düşük düzeyde tutulması veya yok edilmesi gerekir. Bu amacı gerçekleştirmek için uygulanabilecek üç yaklaşım şunlardır: (a) geçiş dönemindeki gözlemlerin kararlı bölgedeki gözlemler üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği kadar uzun süren benzetim koşumları yapmak, (b) başlangıç yanlılığına sebep olmayan bir başlangıç durumu seçilerek benzetime başlamak, (c) başlangıç yanlılığının etkili olduğu geçiş dönemine ait gözlemleri değerlendirmeye almamak. [94,229]. Bu çalışmada geçiş dönemi gözlemlerinin değerlendirilmeye alınmaması yöntemi kullanılmıştır. Seçilen bu yaklaşımın uygulanabilmesi için performans ölçütü istatistiklerinin kararlı olmaya başladığı ve başlangıç yanlılığının yok olduğu

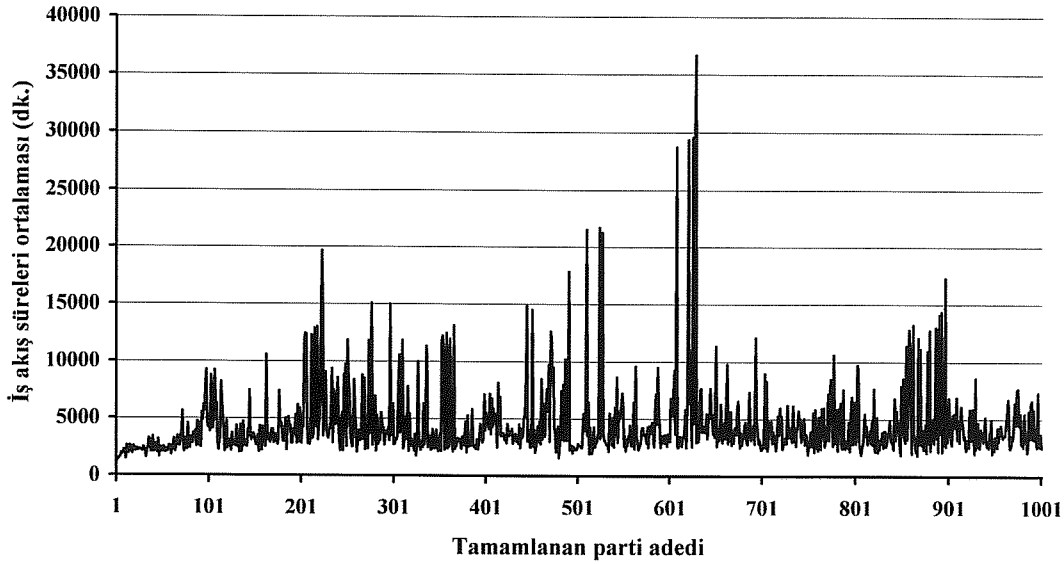
gözlem ya da zaman noktası olan budama noktasının belirlenmesi gerekir (Şekil 6.2). Gereğinden uzun bir geçiş dönemi belirlenirse veri ile zaman kaybı fazla olur ve ayrıca veri kaybı sebebi ile ortalama değerin kestirimi üzerindeki değişkenlik artar, aksine gereğinden kısa bir geçiş dönemi belirlenirse ortalama değerin kestirimi üzerindeki başlangıç yanlılığı fazla olur; dolayısı ile budama noktasını belirlerken bu iki çelişik durumun dengelenmesi gerekir [94,229].

Budama noktasının belirlenmesi için değişik kurallar geliştirilmiştir [238]. Kararlı duruma ancak asimptotik olarak yaklaşılabildiği için budama noktasını belirlenmek amacı ile geliştirilen tüm yöntemler sezgisel metotlardır ve pratikte ve teoride genel olarak kabul görmüş bir yöntem yoktur [238,239]. Convay gözlemlerin uygun sayıda gruplara ayrılması ile elde edilen gözlem ortalamaları arasında daha sonraki gurupların gözlem ortalamalarından ne daha büyük ve ne de daha küçük olmayan ilk guruptan önceki tüm gruplardaki gözlemlerin geçiş dönemine ait gözlemler olduğu ve bu gözlemlerin atılması sureti budama işleminin yapılmasını önermektedir [240]. Schriber grup ortalamalarının önceden belirlenmiş bir aralık içinde kalmaya başladığı noktada geçiş döneminin sona erdiğini ve bu noktanın budama noktası olduğunu belirtir [241]. Fishman gözlemlerin oluşturduğu zaman serisinin gözlemlerin birikimli ortalaması etrafında aşağı ve yukarı yönde önceden belirlenen bir adet kadar salınım yapmasından sonra gelen gözlemlerin istatistik bakımdan dikkate alınması gereken kararlı bölge gözlemleri olduğunu ifade etmiştir [242]. Ayrıca kümülatif veya Welch hareketli ortalamaları gibi yöntemler de budama noktasının belirlenmesi için kullanılabilir [233,234]. Budama noktasının belirlenmesi ile ilgili tüm sezgisel yöntemlerin ana stratejisi genel olarak gruplandırılmış gözlem ortalamalarının salınım veya değişkenliğinin önceden belirlenebilen sınırlar içinde kalması ile birlikte geçiş döneminin sona ermesi şeklinde ifade edilebilir [238]. Taha ise çok gelişmiş karmaşık budama noktasının belirleme tekniklerin kullanılması yerine yukarıda belirtilen ana strateji ile uyumlu ve kolay uygulanabilen gözle inceleme yöntemini önermektedir [238]. Esneklik ve kısa ürün hayat çevrimi nedeni ile oldukça dinamik olan günümüz rekabetçi üretim koşullarındaki üretim sistemlerinin davranışı kararlı duruma ulaşılamayabileceği için budama noktasının tam olarak belirlenmesi olanaksız ve gereksiz olabilir. Dolayısı ile bu çalışmada yaygın olarak uygulanan benzetim performans ölçütü çıktı grafiklerinin gözle incelenmesi sureti ile budama noktasının belirlenmesi yöntemi kullanılmıştır.

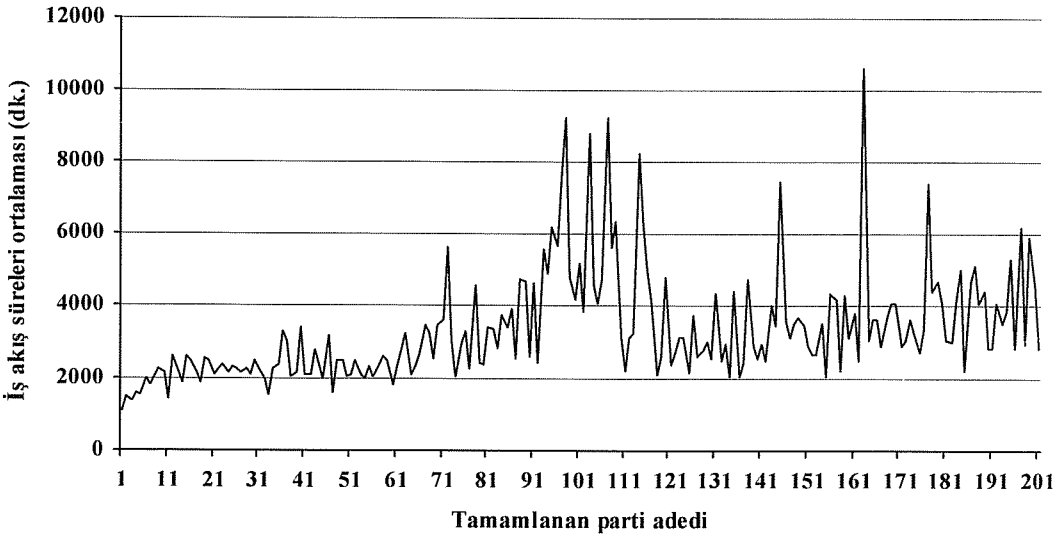
Bu bölümün deney tasarımı kısmındaki faktör seviyelerinin en büyük sistem kullanım oranını (sistem yükünü) sağlayan kombinasyonu için benzetim modelinin 15 defa tekrarlanan ön koşumları yapılmıştır. Bu ön koşumlardaki her bir benzetim tekrarı sistemin tamamen boş olması durumunda başlatılmış ve sistemden 10000 parti çıktığı zaman bitirilmiştir. Her tekrar süresince sistemden çıkan her partinin sistem içinde kaldığı süreler bir çıktı dosyasına yazdırılmıştır. Çıktının değişkenliğini azaltmak için sistemi terk eden bu 10 000 adet partinin her biri için 15 tekrarda elde edilen ve dosyada kayıtlı olan sistemde kalma süreleri karşılıklı olarak eşleştirilip toplanarak 15 'e bölünmek sureti ile hesaplanan ortalamaları ayrı bir çıktı dosyasına yazdırılmış ve bu değerlerin EXCEL ortamında grafiği çizilmiştir. Faktör seviyelerinin en büyük sistem yükünü sağlayan kombinasyonundan elde edilen işlerin sistemde kalma süreleri ortalamalarının 10000 parti bazlı ve budama noktasını daha iyi görmek için de 1000 ve 200 parti bazlı EXCEL grafikleri ise sırası ile Şekil 6.3, 6.4 ve 6.5' de sunulmuştur. Yaklaşık olarak ilk 20-25 adet partinin üretiminin tamamlanması ile birlikte sistemin kararlı duruma ulaştığı bu grafiklerin incelenmesinden açıkça anlaşılmaktadır. Diğer bazı kombinasyonlara ait benzer grafiklerin incelenmesi sonucunda budama noktasının yaklaşık olarak ilk 25 partinin sistemi terk ettiği noktada olduğu belirlenmiştir. Bir emniyet payı da dikkate alınmak sureti ile yaklaşık olarak ilk 60 partinin üretiminin tamamlandığı noktaya karşı gelen ilk 50.000 inci dakika budama zamanı noktası olarak seçilmiştir.



Şekil 6.3 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 10000 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği



Şekil 6.4 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 1000 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği

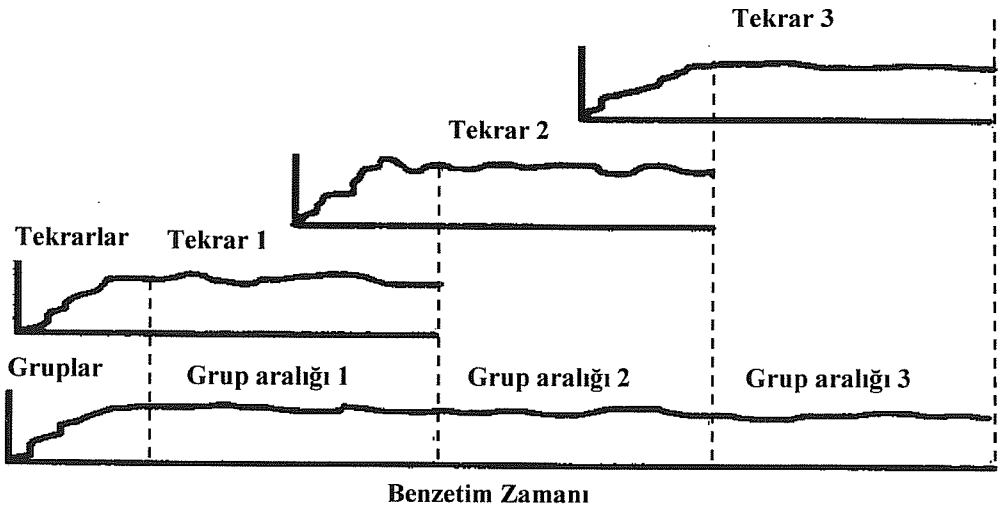


Şekil 6.5 : İşlerin (15 tekrara göre ortalama) sistemde kalma sürelerinin ilk 200 partinin üretimi boyunca değişiminin grafiği

6.3. Tekrarlı Koşum Yönteminin Uygulanması

Çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinliğini belirlemek için tasarlanan benzetim modellerinin stokastik doğası nedeni ile benzetim koşumlarının çıktılarından elde edilen ortalama performans ölçütleri gerçek ortalama performans ölçütünün istatistik bakımdan sadece bir nokta tahmini olmaktadır. Dolayısı ile geliştirilen karar kuralı sezgisellerinin etkinliğinin karşılaştırılması yapılırken ortalama performans ölçütleri arasındaki fark üzerinde tasarım faktörlerinin etki derecesi ile birlikte sistemin stokastik yapısından kaynaklanan tesadüfi değişimlerin etki derecesinin de özellikle belirlenmesi gerekmektedir. Yani karşılaştırılan sistemlerin ortalama performans ölçütleri arasındaki farkın tahminine ait yeterli genişlikte bir güven aralığı oluşturabilmek için benzetim koşumlarının çıktılarından uygun sayıda gözlemlerden oluşan bir örnek elde edilmelidir.

Benzetim koşumu sonuçlarından istatistik analiz için uygun olabilecek örnekler türetebilmek amacı ile tekrarlı koşumlar (İng: replication), gözlemlerin gruplandırılması (İng: batching observations), otoregresyonlu (İng: autoregressive), spektrum analizi (İng: spectrum analysis), standart zaman serileri (İng: standardized time series) yöntemleri gibi değişik yaklaşımlar geliştirilmiştir [94,229,233-237]. Gözlemlerin gruplandırılması yöntemi ve tekrarlı koşum yöntemi bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan önemli iki yaklaşımdır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 : Tekrarlı koşumlar ve gözlemlerin gruplandırılması yöntemleri

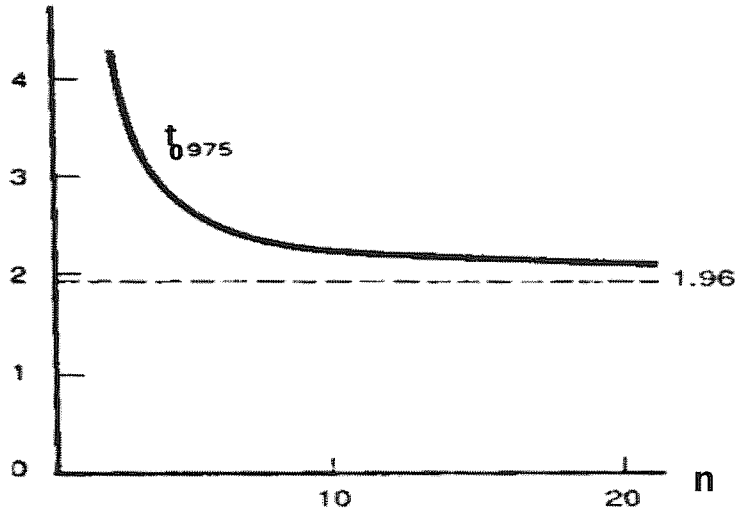
Gözlemlerin gruplandırılması yönteminde uzun bir koşum yapılır ve başlangıç yanlılığını gidermek için budama noktası öncesindeki gözlemler atılarak sadece kararlı duruma ait gözlemler uygun sayıdaki gruplara ayrılır. Bir grup içindeki gözlemlerin hesaplanan ortalaması sisteme ait bir ortalama performans ölçütü gözlemi olarak değerlendirilir. Üretim benzetim modellerinde oluşan ardışık veya birbirine yakın olaylar arasında otokorelasyon vardır. Örneğin bir üretim sisteminde üretilen bir iş sistemde uzun süre kalırsa doğal olarak bu işin ardından üretilmekte olan iş de sistemde uzun süre kalacaktır. Bu yöntemde aynı rassal sayı dizisini kullanan tek koşum yapıldığı için benzetimden elde edilen gözlemler arasında otokorelasyon oluşmaktadır [94,238]. Otokorelasyon sonucu oluşan kovaryans terimleri nedeni ile örnek standart sapması (s) yığına ait standart sapmanın (σ) yanlı (İng: biased) bir kestireci olmaktadır [238]. Gözlemler üzerinde istatistik analizin yapılabilmesi için gözlemlerin bağımsız (otokorelasyonsuz), özdeş (aynı dağılıma sahip olması anlamında) dağılması gerekmektedir. Dolayısı ile gözlemlerin gruplandırılması yöntemi sonucunda elde edilen gözlem ortalamaları üzerindeki istatistik analiz yapabilmek için gruplara ait gözlemlerin ortalamaları arasındaki otokorelasyonun karmaşık istatistik teknikler kullanılarak giderilmesinin veya azaltılmasının zorunlu olması nedeni ile bu yöntemin uygulanması zordur. Benzetim koşumunun başlangıç kısmındaki geçiş süresine ait gözlemlerin sadece bir kez budanması sebebi ile bilgisayar koşum süresinin kısalması ise bu yöntemin sağladığı önemli bir fayda olmaktadır [94,229,238].

Tekrarlı koşum yönteminde benzetim koşumu uygun sayıdaki tekrarlardan oluşur. Bu yöntemde her bir tekrar aynı başlangıç koşulları ile başlar ve her tekrar başlangıcındaki geçiş dönemine ait gözlemler budanarak sadece tekrarların kararlı bölgesindeki gözlemlerin ortalamaları istatistik değerlendirme için dikkate alınacak olan ortalama performans ölçütü gözlemlerini oluşturur. Dolayısı ile merkez limit teoremine göre gözlem ortalamalarının (veya ortalama performans ölçütü gözlemlerinin) olasılık dağılımı normal dağılıma oldukça uymaktadır [229,233]. Ayrıca her tekrar için farklı rassal sayı dizileri kullanıldığı için tekrarlara ait ortalama performans ölçütü gözlemleri bağımsız ve özdeş olarak dağılmaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda da açıklandığı üzere, eşleştirilmiş t testi gibi istatistik analiz yöntemlerinin uygulanması için gerekli koşul olan bağımsız, özdeş ve normal dağılan

ortalama performans ölçütü gözlemlerini kolaylıkla sağlayan tekrarlı koşum yöntemi kullanılmıştır. Tekrarlı koşum yönteminin kötü yanı sonuçlar üzerindeki başlangıç yanlılığını gidermek için her bir tekrar başlangıcındaki geçiş dönemine ait gözlemlerin budanmasını gerektirmesi sebebi ile veri kaybına neden olması ve dolayısı ile bilgisayar koşum süresinin de gözlemlerin gruplandırılması yöntemine göre daha uzun olmasıdır [94,229,235].

Benzetim koşumlarının tekrar sayısı istatistik bakımdan örnek hacmini ifade etmektedir. Örnek hacminin büyük seçilmesi durumunda t testinin serbestlik derecesinin de büyük olması dolayısı ile güven aralığı daralır ve istatistik analizin güvenilirliği artar. Tekrar sayısının 20 den daha büyük olması durumunda t testi istatistiğinde Şekil 6.7' de görüldüğü gibi dikkate değer bir değişim olmamaktadır [94,229,243]. Bu özellik dolayısı ile bu çalışmada tekrar sayısı 20 olarak seçilmiştir.



Şekil 6.7 : T testi istatistiğinin örnek hacmi (n) ile değişimi

Üretim sistemlerinin sonlanmayan (non-terminating) sistemler olması nedeni ile tekrar uzunluğu için benzetim zamanı yerine tamamlanan parti adedinin kullanılması daha uygun olmaktadır. Benzetim koşumlarındaki tekrarların kararlı olduğu bölgenin uzunluğunu ifade eden tekrar uzunluğunun geçiş bölgesi uzunluğunun en az 5 katı olması gerektiği Banks ve diğerleri [228] tarafından önerilmektedir. Ayrıca sistemde gerçekleşebilecek tüm faaliyetlerin kapsanması için tekrar uzunluğu süresince en az ortaya çıkan olaylarda dahil olmak üzere her tip olayın birçok kez oluşması

gereklidir [235]. Bu bölümün bir sonraki deney tasarımı kısmındaki koşullara uygun olarak gerçekleştirilen benzetim koşumları çıktı kayıtlarının incelenmesi sonucu, faktör seviyelerinin kombinasyonlarına bağlı olarak; (a) kararlı bölgenin uzunluğunun zaman veya parti bazında geçiş dönemi uzunluğunun 7.5 ile 10 katı aralığında olduğu ve (b) en az gerçekleşen olay olan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması olayının da her bir 600 partilik tekrarda yaklaşık olarak 17 ile 226 adet aralığında oluştuğu belirlenmiştir. Dolayısı ile budama noktasından itibaren 600 partinin tamamlanması için gereken süre olarak belirlenen bu çalışmadaki tekrar uzunluğu yukarıda belirtilen tüm koşulları sağlamaktadır ve benzetim modeli ile sonuçları da geçerli ve anlamlı olmaktadır.

6.4. Deney Tasarımı ve Faktörlerin Seviyeleri

Bu kısımda bir önceki bölümde modelin bağımsız değişkenleri olarak da tanımlanan dört adet faktörün seviyelerinin nasıl belirlendiği açıklanacaktır. Faktör seviyelerinin belirlenmesi için kullanılan ana ölçüt hücresel üretim alanındaki uygulamalara uygun değerlerin seçilmesine özellikle önem verilmiş olmasıdır. Bu çalışmada dikkate alınan faktörler ve seviyelerinin sayısı aşağıda verilmiştir:

1. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma (nitel) faktörü 3 adet seviyeye sahiptir.
2. Yük dengesizliği (nicel) faktörü 5 adet seviyeye sahiptir.
3. İşlem süresi artış yüzdesi (nicel) faktörü 4 adet seviyeye sahiptir.
4. Hazırlık süresi artış yüzdesi (nicel) faktörü 4 adet seviyeye sahiptir.

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma faktörünün seviyeleri olan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralları bir önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanan kural A ve kural B olmaktadır. Ayrıca kuralların karşılaştırılması için bir referans oluşturmak için yük dengesizliğinin olumsuz etkilerinin giderilmesi yönünde bir girişimin olmadığı durum da baz durum olarak seçilmiştir.

Yük dengesizliği faktörünün beş farklı seviyesi aşağıda açıklandığı gibi belirlenmiştir. Yük dengesizliği ortamında faaliyette bulunan hücresel sistemlerde dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinliğinin karşılaştırılması için hücreler arasında yük dengesizlik seviyelerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmadaki beş değişik yük dengesizliği seviyesini oluşturabilmek için uzman

hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi belirli oranlarda azaltılmak sureti ile uzman hücrenin aşırı yüklenmesi sağlanırken aynı zamanda seçenek hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi aynı oranlarda arttırılarak seçenek hücrenin daha az yüklenmesi sağlanır. Partilerin hücrelere gelişleri arasındaki ortalama sürelerin yukarıda açıklandığı gibi ters yönde ve aynı oranlarda değiştirme yöntemi ile beş farklı yük dengesizlik seviyesinin elde edilmesinin amacı ise sistemin ortalama talep düzeyini (iş yükünü) sabit tutmaktır. Faktörlerin seviyelerinin tüm kombinasyonları için modeli geliştirilen hücresel sistemlerin ortalama sistem kullanım oranının (iş yükünün veya talep düzeyinin) sabit tutulması sureti ile yapılacak istatistiksel karşılaştırmaların anlamlı olması sağlanmış ve karşılaştırma sonuçlarının ortalama sistem yükündeki değişimler nedeni ile maskelenmesi önlenmiştir.

Toplam talep düzeyindeki değişimlerin yukarıda açıklandığı gibi sabit tutularak yalıtılması koşulu ile yük dengesizlik seviyeleri (veya yüzdeleri) aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$YDS = f(YDY) \tag{6.1}$$

$$YDY = \%\left(\frac{G_S - G_n}{G_n}\right)\times 100 = \%\left(\frac{G_n - G_u}{G_n}\right)\times 100 \tag{6.2}$$

$$G_n = \frac{G_u + G_S}{2} = \text{SABİT} = 1500 \text{ dakika} \tag{6.3}$$

$$G_u = G_n \cdot (1 - \Delta G_{-u}) \tag{6.4}$$

$$G_s = G_n \cdot (1 + \Delta G_{+s}) \tag{6.5}$$

YDS : Yük dengesizlik seviyesi.

YDY : Yük dengesizlik yüzdesi.

G_u : Uzman hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi.

G_S : Seçenek hücreye gelen partilerin ortalama gelişler arası süresi.

G_n : Hücresel sisteme gelen tüm partilerin gelişleri arasındaki normal ortalama gelişler arası süre; çalışmada karşılaştırılan tüm sistemlerdeki ortalama talep düzeyinin (yük düzeyinin veya ortalama sistem kullanım oranının) aynı olabilmesi için geliştirilen her model için G_n = 1500 dk. olarak sabit kabul edilmiştir.

ΔG_{-u} : Uzman hücreye gelen partilerin normal ortalama gelişler arası süresindeki azalma oranı.

ΔG_{+s} : Seçenek hücreye gelen partilerin normal ortalama gelişler arası süresindeki artış oranı.

Eşitlik 6.2, 6.4 ve 6.5 dikkate alındığında YDY ile ΔG_{-u} ve ΔG_{+s} arasında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$YDY = \% \cdot \Delta G_{-u} \cdot 100 = \% \Delta G_{+s} \cdot 100 \qquad (6.6)$$

Bu 6.6. bağıntısı sistemin ortalama talep düzeyinin (iş yükünün) sabit tutması durumunda uzman hücreye gelen partilerin gelişleri arasındaki azalma yüzdesinin seçenek hücreye gelen partilerin gelişleri arasındaki artış yüzdesine eşit olması gerektiğini ifade eder ve yük değişim yüzdesi (YDY) de birbiriyle aynı olan bu iki değere eşit olarak 6.6. bağıntısı ile tanımlanır. Yük dengesizliği faktörün etkisinin analiz edilebilmesi için seçilen beş yük dengesizliği seviyesi (YDS) ve bu seviyelere YDS = f (YDY) fonksiyonuna göre karşı gelen yük dengesizlik yüzdeleri ile uzman ve seçenek hücrelerin ortalama gelişler arası süre değerleri tablo 6.1.' de verilmiştir.

Tablo 6.1 : Yük dengesizliği seviyelerine karşı gelen yük dengesizliği yüzdeleri ve YDS = f (YDY) fonksiyonunun tanımı

Yük Dengesizliği Seviyesi (YDS)	1	2	3	4	5
Yük Dengesizliği Yüzdesi (YDY)	% 5	% 10	% 15	% 20	% 25
Uzman Hücreye Gelen Partilerin Ortalama Gelişler Arası Süresi (G_u)	1425 dakika	1350 dakika	1275 dakika	1200 dakika	1125 dakika
Seçenek Hücreye Gelen Partilerin Ortalama Gelişler Arası Süresi (G_s)	1575 dakika	1650 dakika	1725 dakika	1800 dakika	1875 dakika
Tüm Sistem için Normal Ortalama Gelişler Arası Süre (G_n)	1500 dakika	1500 dakika	1500 dakika	1500 dakika	1500 dakika

İşlem süresi artış yüzdesi (İSAY) ve hazırlık süresi artış yüzdesi (HSAY) faktörlerinin seviyeleri ise yük dengesizliği seviyeleri (YDS) ve dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının değişik kombinasyonları için baz duruma göre daha iyi ve daha kötü performans değerlerini kapsayan geniş bir inceleme alanı sağlayacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca seçim yapılırken seviyelerin gerçek üretim ortamlarında oluşabilecek değerler olabilmelerine de özellikle dikkate edilmiştir. Sonuç olarak işlem süresi artış yüzdesi (İSAY) faktörünün dört seviyesi için sırası ile % 0, % 250, % 500 ile % 750 değerleri ve hazırlık süresi artış yüzdesi (HSAY) faktörünün dört seviyesi içinde sırası ile % 0, % 200, % 400 ile % 600 değerleri seçilmiştir. Bu çalışmadaki faktörler ve seviyeleri Tablo 6.2 'de toplu halde görülmektedir.

Tablo 6.2 : Faktörler ve seviyeleri

	FAKTÖRLER	**SEVİYELER**				
Nitel	**Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları**	Kural A	Kural B	Baz Durum	-	-
Nicel	**Yük Dengesizliği Seviyesi (YDS)**	1	2	3	4	5
Nicel	**İşlem Süresi Artış Yüzdesi (İSAY)**	% 0	% 250	% 500	% 750	-
Nicel	**Hazırlık Süresi Artış Yüzdesi (HSAY)**	% 0	% 200	% 400	% 600	-

6.5. Eşleştirilmiş T Testi Yöntemi ile İstatistik Analizin Uygulanması

Bu çalışma, değişik yük dengesizliği seviyelerinde üretim yapan bir hücresel sistemde iki farklı dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralının uygulanması sonucunda, değişik işlem ve hazırlık süresi artış yüzdeleri seviyelerine bağlı olarak, ortalama sistem performans ölçütlerindeki iyileşme düzeylerinin karşılaştırılmasını amaçlamaktadır. Bu çalışmadaki gibi stokastik davranış sergileyen üretim sistemi seçeneklerinin karşılaştırılması için eşleştirilmiş t testi yönteminin kullanılması üretim benzetimi alanındaki uzmanlar tarafından önerilmektedir [94,233,235]. Dolayısı ile çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının

benzetim modellerinin koşumu sonucu elde edilen ortalama performans ölçütlerinin karşılaştırılması için uygun ve etkili bir yöntem olan eşleştirilmiş t testi kullanılmıştır.

Eşleştirilmiş t testinin uygulanması ile aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

1. karşılaştırılan iki sistemin ortalama performans ölçütlerinin farkı,
2. ortalama performans ölçütleri farkı için güven aralığı,
3. ortalama performans ölçütleri farkının anlamlılığına ait hipotezin testi.

Eşleştirilmiş t testinin faydalı olan iki özelliği şunlardır: (a) Testin uygulanması için karşılaştırılan iki yığının varyanslarının eşit olması koşulu gerekmez ve (b) karşılaştırılan iki yığından elde edilen gözlemlerin karşılıklı olarak bağımsız olması testin uygulanması için gerekli değildir. Bu iki faydalı özelliğine karşın eşleştirilmiş t testi ile hipotez testini yapabilmek için karşılaştırması yapılan kurallar ile baz durumun (veya birbirleri ile karşılaştırılan iki kuralın) benzetim modellerinin koşumlarının tekrar (gözlem) sayısının aynı olması gerekmektedir.

Çift taraflı eşleştirilmiş t testi yöntemine göre hipotez testinin hipotezleri ve uygulanması aşağıda açıklanmaktadır.

$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$: Ortalama performans ölçütleri arasında fark yoktur. (6.7)

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$: Ortalama performans ölçütleri arasında fark vardır. (6.8)

$$Z_j = X_{1j} - X_{2j} \tag{6.9}$$

$$\delta = E(Z_j) = \mu_1 - \mu_2 \tag{6.10}$$

$$\overline{Z} = \frac{\sum_{j=1}^{n} Z_j}{n} \tag{6.11}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(Z_j - \overline{Z}\right)^2}{(n-1)} \tag{6.12}$$

$$t = \frac{\overline{Z}}{S/\sqrt{n}} \tag{6.13}$$

H_0 : Sıfır hipotezi.

H_1 : Alternatif hipotez.

μ_1 : Sistem 1' in ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri.

μ_2 : Sistem 2'nin ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri.

j : Benzetim koşumlarına ait j 'inci tekrar (j = 1,2, . . . n).

n : Örnek hacmi; yani sistem 1'in ve sistem 2 'nin koşumlarının tekrar adedi.

X_{1j} : Sistem 1'in koşumunun j inci tekrarına ait ortalama performans ölçütü.

X_{2j} : Sistem 2'nin koşumunun j inci tekrarına ait ortalama performans ölçütü.

Z_j : j tekrarı için sistemlerin ortalama performans ölçütleri arasındaki fark.

δ : Z_j 'nin beklenen değeri (üzerinde güven aralığı oluşturulacak olan değer; yani iki sistemin ortalama performans ölçütleri arasındaki gerçek fark).

S : Ortalama performans ölçütleri arasındaki farkların standart sapması (örnek standart sapması).

$\overline{Z}$: Ortalama performans ölçütleri arasındaki farkların ortalaması (örnek ortalaması veya δ değerinin kestireci).

t : T test istatistiği.

$t_{n-1,\,1-\alpha/2}$: n-1 serbestlik dereceli t dağılımı $\alpha/2$ üst uç olasılıklı değeri (Şekil 6.8).

Çift taraflı eşleştirilmiş t testi yöntemine göre H_0 hipotezinin α anlamlılık derecesi ile reddedilme koşulu Şekil 6.8 'de görüldüğü üzere aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{eğer } t < -t_{n-1,\,1-\alpha/2} \text{ veya } t_{n-1,\,1-\alpha/2} < t \quad \text{ise } H_0 \text{ reddedilir} \qquad (6.14)$$

ve diğer tüm durumlarda ise kabul edilir, yani;

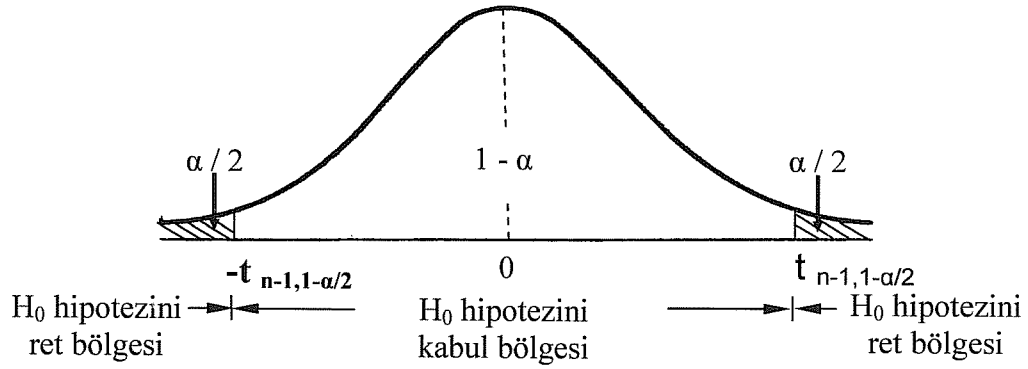
$$\text{eğer } -t_{n-1,\,1-\alpha/2} \le t \le t_{n-1,\,1-\alpha/2} \quad \text{ise } H_0 \text{ kabul edilir} \qquad (6.15)$$

Çift taraflı eşleştirilmiş t testi yöntemi kullanmak sureti ile iki sistemi karşılaştırma problemi δ parametresinin $\overline{Z}$ kestireci merkezli bir güven aralığı içinde kestirimi (tahmini) problemi olarak da yorumlanabilir ve $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerinin $\%(1-\alpha)\cdot 100$ çift taraflı güven aralığı ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\bar{Z} - t_{n-1,\,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}},\quad \bar{Z} + t_{n-1,\,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}\right) \tag{6.16}$$

ve yukarıdaki çift taraflı güven aralığının $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerini kapsama olasılığı ise 1-α güven düzeyi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Şekil 6.8):

$$P\left\{\bar{Z} - t_{n-1,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \le \mu_1 - \mu_2 \le \bar{Z} + t_{n-1,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - \alpha \tag{6.17}$$



Şekil 6.8 : Serbestlik derecesi n – 1 olan t dağılımı ve çift taraflı test için α anlamlılık düzeyi (veya 1 – α güven düzeyi)

Eğer Z_j değerleri normal dağılıyor ise güven aralığının $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerini kapsama olasılığı olan 1-α güven düzeyi hatasız (kesin) bir değeri ifade eder; fakat. Z_j değerlerinin dağılımı normal dağılıma uymuyor ise merkez limit teoremine göre ancak büyük n değerleri için güven aralığının $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerini kapsama olasılığı olan 1-α güven düzeyi yaklaşık bir değeri ifade eder. Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmadaki her bir benzetim koşumunun içindeki tekrarların kararlı bölgesine ait gözlemlerin ortalamaları istatistik değerlendirme için dikkate alınan ortalama performans ölçütü gözlemlerini oluşturduğu için merkez limit teoremine göre örnek ortalamalarını ifade eden bu ortalama performans ölçütü değerleri arasındaki fark olan Z_j değerinin olasılık dağılımı normal dağılıma oldukça uymaktadır ve dolayısı ile bu çalışmada hesaplanacak olan güven aralıklarının $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerini kapsama olasılıkları da 1-α güven düzeyi değerine yeterince yakın bir değer olmaktadır.

Ayrıca eşleştirilmiş t testinin uygulanması için aynı yığına ait olan gözlemlerin bağımsız ve özdeş olarak dağılması koşulu gereklidir. Bu çalışmadaki her bir benzetim koşumu içindeki her tekrar için farklı bir rassal sayı dizisi kullanılmış olması sebebi ile tekrarlardan elde edilen ortalama performans ölçütleri bağımsız ve özdeş dağılım koşulunu sağlamaktadır.

Yukarıda 6.7 ifadesindeki H_0 hipotezi $\mu_1 - \mu_2 = 0$ şeklinde ifade edildiği için ortalamalar arasındaki farkın sıfır olması hipotezi test edilmektedir ve eğer sıfır değeri yukarıdaki 6.16 ifadesindeki çift taraflı güven aralığının dışında kalmakta ise α anlamlılık düzeyi (veya $(1-\alpha)$ güven düzeyi veya olasılığı) ile H_0 hipotezi reddedilir ve iki sistemin ortalama performans ölçütlerinin $(1-\alpha)$ güven düzeyi (veya α anlamlılık düzeyi) ile farklı olduğu ifade edilebilir. Karşılaştırılan iki seçenek sistem arasından ortalama performans ölçütü değeri küçük olan sistem ise $\overline{Z}$' in işaretine göre belirlenir. Bu çalışmada MINITAB [244,245] istatistik analiz yazılımı kullanılarak uygulanacak olan çift taraflı eşleştirilmiş t testlerinde α anlamlılık düzeyinin 0.5 (veya güven düzeyinin 0.95) olarak seçilmesi sebebi ile 6.16 ifadesindeki güven aralığının sıfır değerini kapsamaması durumda karşılaştırılan sistemlerin dikkate alınan ortalama performans ölçütü değeri bakımından farklı olduğu 0.95 güven düzeyi (veya 0.5 anlamlılık düzeyi) ile ifade edilebilir. Bu çalışmadaki t testi analizinde karşılaştırılan iki sistem arasından ortalama performans ölçütü değeri daha ufak olan sistemin belirlenmesi amaçlandığı için aslında tek taraflı eşleştirilmiş t testi uygulanmalıdır. Bu nedenle MINITAB kullanılarak bu çalışmada elde edilecek olan çift taraflı eşleştirilmiş t testleri sonuçlarının tek taraflı eşleştirilmiş t testleri için yorumlanması durumunda güven düzeyinin $1-(\alpha/2) = 0.975$ (veya anlamlılık düzeyinin $\alpha/2 = 0.025$) olduğuna dikkat etmek gerekir.

Tek taraflı eşleştirilmiş t testinin uygulanabilmesi için yukarıda verilen 6.9 ile 6.13 arasındaki ifadeler aynı kalmak koşulu ile 6.7 ve 6.8 hipotezleri aşağıdaki gibi değiştirilmek sureti ile ifade edilmelidir:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \geq 0 \qquad (\text{veya } H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0) \tag{6.18}$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < 0 \tag{6.19}$$

tek taraflı eşleştirilmiş t testi yöntemine göre H_0 hipotezinin $\alpha/2$ anlamlılık derecesi ile reddedilme koşulu Şekil 6.9 'da görüldüğü üzere aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{eğer} \quad t = \frac{\bar{Z}}{S/\sqrt{n}} < -t_{n-1,\,1-\alpha/2} \qquad \text{ise } H_0 \text{ reddedilir} \tag{6.20}$$

ve diğer tüm durumlarda ise kabul edilir, yani;

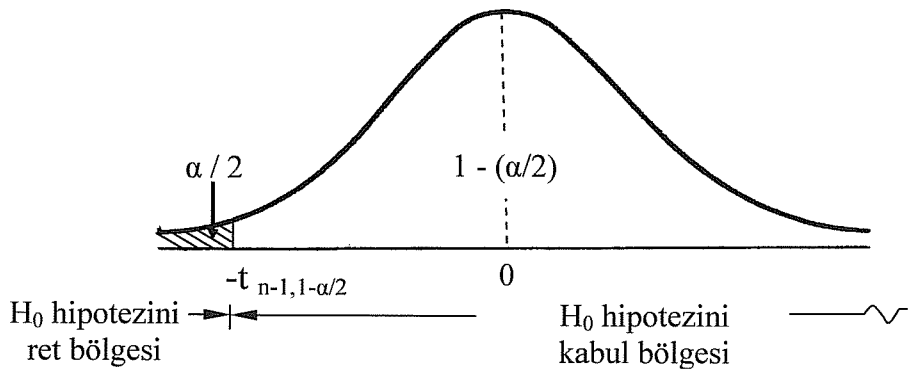
$$\text{eğer} \quad t = \frac{\bar{Z}}{S/\sqrt{n}} \geq -t_{n-1,\,1-\alpha/2} \qquad \text{ise } H_0 \text{ kabul edilir} \tag{6.21}$$

Ayrıca tek taraflı eşleştirilmiş t testinin güven aralığının kestirimi (tahmini) bakımından yorumu için 6.16'daki % $(1-\alpha)\cdot 100$ çift taraflı güven aralığı ifadesi yerine kullanılacak olan % $(1-(\alpha/2))\cdot 100$ tek taraflı güven aralığı ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(-\infty, \quad \bar{Z} + t_{n-1,\,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}\right) \tag{6.22}$$

ve yukarıdaki tek taraflı güven aralığının $\delta = \mu_1 - \mu_2$ değerini kapsama olasılığı olan $1-(\alpha/2)$ güven düzeyi ise aşağıdaki gibi ifade edilir (Şekil 6.9):

$$P\left\{\mu_1 - \mu_2 \leq \bar{Z} + t_{n-1,1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - (\alpha/2) \tag{6.23}$$



Şekil 6.9 : Serbestlik derecesi n – 1 olan t dağılımı ve tek taraflı test için α / 2 anlamlılık düzeyi (veya 1 – (α / 2) güven düzeyi)

Yukarıdaki 6.18 ve 6.19 ifadelerine göre ortalama performans ölçütleri arasındaki farkın sıfır veya sıfırdan daha büyük olması hipotezi test edilmektedir ve eğer 6.22 ifadesindeki tek taraflı güven aralığı sıfır değerini kapsamaz ise $\alpha/2$ anlamlılık düzeyi (veya $1-(\alpha/2)$ güven düzeyi) ile H_0 hipotezi reddedilir ve sistem 1' in dikkate alınan ortalama performans ölçütü bakımından sistem 2' den daha iyi olduğu $1-(\alpha/2)$ güven düzeyi (veya $\alpha/2$ anlamlılık düzeyi) ile ifade edilebilir. Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmadaki tek taraflı testler için güven düzeyleri 0.975 veya anlamlılık düzeyleri ise 0.025 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada tek taraflı eşleştirilmiş t testi kullanılarak test edilen hipotezlerin genel ifadeleri ise 6.18 ve 6.19 hipotezlerinde μ_1 ve μ_2 yerine incelenen sistemlerin ortalama performans ölçütlerinin beklenen (gerçek) değeri sembollerinin koyulması durumunda aşağıdaki gibidir.

1) Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı A ile baz durumun karşılaştırmasına ait hipotezler:

$$H_0 : \mu_A - \mu_R \geq 0 \qquad (\text{veya } H_0 : \mu_A - \mu_R = 0) \tag{6.24}$$

$$H_1 : \mu_A - \mu_R < 0 \tag{6.25}$$

2) Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı B ile baz durumun karşılaştırmasına ait hipotezler:

$$H_0 : \mu_B - \mu_R \geq 0 \qquad (\text{veya } H_0 : \mu_B - \mu_R = 0) \tag{6.26}$$

$$H_1 : \mu_B - \mu_R < 0 \tag{6.27}$$

3) Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı A ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı B 'nin karşılaştırmasına ait hipotezler:

$$H_0 : \mu_A - \mu_B \geq 0 \qquad (\text{veya } H_0 : \mu_A - \mu_B = 0) \tag{6.28}$$

$$H_1 : \mu_B - \mu_B < 0 \tag{6.29}$$

Yukarıdaki 6.24 ile 6.29 arasındaki ifadelerdeki sembollerin anlamları aşağıdaki gibidir:

μ_A : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı A uygulanması durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri.

μ_B : Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma Kuralı B uygulanması durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri.

μ_R : Hiçbir kuralın uygulanmaması durumu olan baz durumunda sağlanan ortalama performans ölçütünün beklenen (gerçek) değeri.

Bu çalışmadaki benzetim koşumlarının tekrar sayısı istatistik bakımdan örnek hacmini ifade etmektedir. Örnek hacminin büyük seçilmesi durumunda eşleştirilmiş t testinin serbestlik derecesi de büyük olduğu için güven aralığı daralır ve istatistik analizin güvenilirliği artar. Daha önce de belirtildiği gibi örnek hacminin 20 den daha büyük olması durumunda t testi istatistiğinde Şekil 6.7 'de görüldüğü gibi dikkate değer bir değişim olmamaktadır. Dolayısı ile benzetim deneylerinin gerektirdiği uzun bilgisayar koşum sürelerinden tasarruf etme hususu da dikkate alınarak bu çalışmadaki her bir benzetim koşumunun tekrar adedi 20 olarak seçilmiş olduğu için t testinin serbestlik derecesi de 19 olmaktadır. Yukarıda ayrıntıları açıklanan eşleştirilmiş t testi yöntemine uygun olarak MINITAB [244,245] istatistik yazılımı ortamında gerçekleştirilen istatistiksel karşılaştırma sonuçlarının analiz ve yorumu aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

6.6. Birincil Performans Ölçütleri Benzetim Sonuçlarının Analizi ve Yorumu

Daha önce açıklanan ve Tablo 6.2 'de sunulan deney tasarımı faktör seviyelerinin her bir kombinasyonu için eşleştirilmiş t testi istatistik analiz yönteminin uygulanmasına olanak verecek şekilde her koşumu 20 kez tekrarlanan benzetim modellerinin her bir tekrarındaki ilk 50.000 dakikalık benzetin zamanı ile belirlenen budama noktasından sonra tamamlanan 600 adet partinin gözlemlerine ait OİAS, OPİSD ve OKDSO birincil performans ölçütü değerlerinin oluşturduğu toplam 9900 (= (80+·80+5)·20·3) adet sonuç değeri Ek E' de tablolar halinde verilmiştir. Bu sonuçların alındığı SIMAN özet rapor çıktı parçası örneği ise Ek C 'de sunulmuştur. Çift taraflı eşleştirilmiş t testi yönteminin Ek E 'deki tablolarda sunulan bu 9900 adet veri üzerinde uygulanma planı ise aşağıda açıklanmıştır.

YDS nicel faktörünün 5 değişik seviyesi ile İSAY nicel faktörünün 4 seviyesi ve HSAY nicel faktörünün 4 değişik seviyesinin dışsal iş akışı esnekliğini uygulama kuralı A için oluşturduğu 80 (=5·4·4) adet kombinasyon ve dışsal iş akışı esnekliğini uygulama kuralı B için oluşturduğu 80 (=5·4·4) adet kombinasyon ile baz durum uygulaması için de sadece YDS nicel faktörünün 5 değişik seviyesi dikkate alındığında toplam 165 (=80+80+5) adet farklı üretim ortamı benzetim modellerinin, yukarıda açıklanan şartlarda gerçekleştirilen, koşumlarından elde edilen OİAS, OPİSD ve OKDSO olmak üzere 3 adet birincil performans ölçütü sonucunun her biri

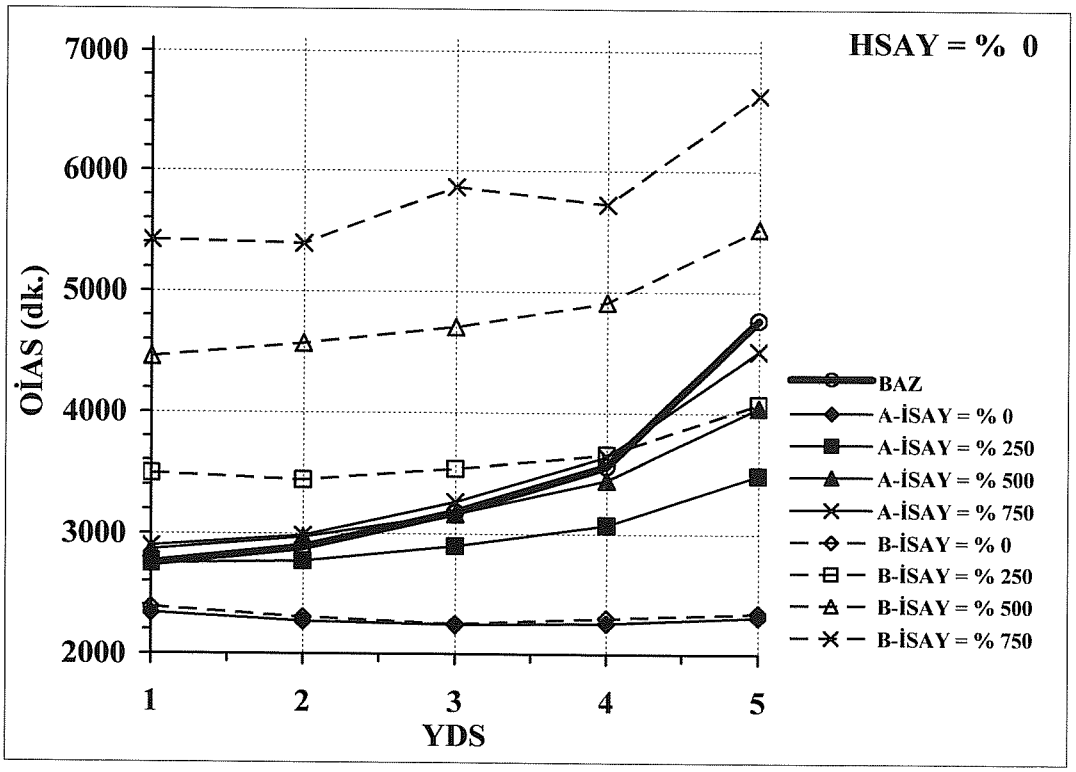
için kural A ile baz durum, kural B ile baz durum ve kural A ile Kural B uygulamalarının karşılıklı olarak benzer üretim ortamlarında eşleştirilerek karşılaştırılmasına ait genel yapıları 6.24 ile 6.29 arasındaki ifadelerde sunulan 3 grup hipotez için, her bir benzetim koşumunun tekrar sayısı olan 20 adetlik örnek hacmi üzerinden, toplam 720 (=80·3·3) adet çift taraflı eşleştirilmiş t testi MINITAB [244,245] istatistik yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Ek F' de tablolar halinde sunulmuştur. MINITAB ile sonuçların elde edilmesini gösteren bir MINITAB Proje Rapor dosya örneği parçası ise Ek F 'deki Şekil F.1 'de görülmektedir. Ayrıca aynı kombinasyonlara göre kural A için 80 adet ve kural B için 80 adet ve baz durum için 5 adet üretim koşulunun her birinin benzetiminin koşumlarından elde edilen 3 adet birincil performans ölçütünün her biri için benzetim koşumlarının tekrar adedi olan 20 adetlik örnek hacmi üzerinden hesaplanan toplam 495 (=(80+80+5)·3) adet birincil performans ölçütü ortalaması da toplu olarak Ek G 'deki tablolarda (ve aynı zamanda Ek F 'deki çift taraflı eşleştirilmiş t testi sonuç tablolarında) görülmektedir.

İSAY ile HSAY artış yüzdesi nicel faktörlerinin Tablo 6.2 'de sunulan seviyelerinin kombinasyonlarından oluşan değişik koşullarda üretim yapan bir hücresel sistemde nitel faktör seviyeleri olan kural A ve B ile baz durum uygulamasına ait benzetim modellerinden elde edilen OİAS, OPİSD ve OKDSO birincil performans ölçütleri sonuçlarının, YDS nicel faktörünün yine Tablo 6.2 'de tanımlanan seviyelerine göre değişiminin incelenmesi amacı ile aşağıdaki kısımlarda sunulacak olan istatistiksel analizler ve yorumlar için benzetim çıktılarından türetilen ve yukarıda tanıtımı yapılan verilerin tablolar ve grafikler olarak düzenlenmesinden yararlanılacaktır. MINITAB kullanılarak elde edilen Ek F 'de sunulan tablolardaki sonuçlar 0.5 anlamlılık düzeyi (veya 0.95 güven düzeyi) ile çift taraflı eşleştirilmiş t testleri için verilmiştir. Çalışmada 20 adetlik örnek hacmi üzerinden test edilen toplam 720 hipotezin 6.24 ile 6.29 arasındaki ifadelerden anlaşıldığı gibi iki sistem arasından ortalama performans ölçütü değeri daha ufak olan sistemin belirlenmesi amaçlandığı için aslında tek taraflı eşleştirilmiş t testi uygulanmalıdır. Bu nedenle sonuçların aşağıdaki kısımlarda sunulan analiz ve yorumları için Ek F 'de verilen çift taraflı eşleştirilmiş t testleri sonuçlarının 0.025 anlamlılık düzeyi (veya 0.975 güven düzeyi) ile 6.22 ifadesinde belirtilen % 97.5 tek taraflı güven aralığına sahip tek taraflı eşleştirilmiş t testleri olarak değerlendirilmesine özellikle dikkat etmek gerekir.

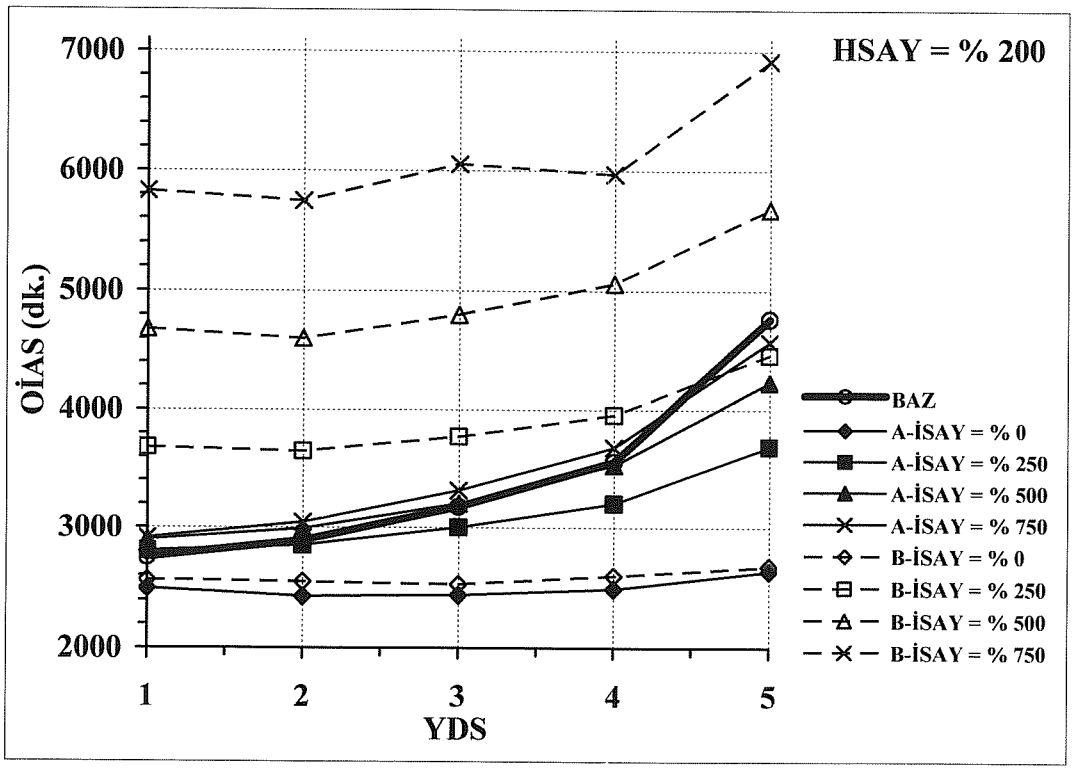
6.6.1. Ortalama İş Akış Süresi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A veya B stratejilerinden herhangi birisinin uygulanması durumunda dakika birimi ile ölçülen ortalama iş akış süresi performans ölçütüne ait benzetim deney sonuçlarının tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalamalarının yük dengesizlik seviyesine göre değişimi, işlem süresi artış yüzdesi ve hazırlık süresi artış yüzdesi faktörlerinin farklı seviyeleri için, Ek G' deki ilgili tablolarda ve grafik olarak da Şekil 6.10 'da sunulmaktadır. Ayrıca baz durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) yine Ek G 'deki ilgili tablolarda verilmektedir ve baz duruma ait bu ortalama OİAS değerleri Şekil 6.10 'daki grafiklerde koyu kalın çizgi ile temsil edilmektedir.

Şekil 6.10 'daki grafiklerden anlaşıldığı üzere İSAY, HSAY ve YDS nicel faktörlerine ait seviyelerin oluşturduğu tüm kombinasyonlar tarafından belirlenen üretim koşulları için dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması durumundaki ortalama OİAS değerleri için dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulaması durumundaki ortalama OİAS değerlerinden daha küçüktür. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ve baz durum için ortalama OİAS değerleri yük dengesizliğinin artması ile birlikte dikkate değer bir şekilde artmaktadır. Fakat dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulanması durumunda ortalama OİAS değerlerinin yük dengesizliği ile artışı daha azdır. Dolayısı ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının ortalama OİAS değerleri bakımından yük dengesizliğine olan duyarlılığı dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının duyarlılığından daha fazladır. Ayrıca dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A için gözlenen ortalama OİAS değerlerinin bir kısmı baz duruma ait ortalama OİAS değerlerinin üstünde olmakla birlikte bu değerler birbirlerine oldukça yakındır. Ortalama OİAS değerlerinde sağlanan iyileşme bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasından daha etkin olduğunu göstermekte olan yukarıdaki ana eğilimler, dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasından farklı olarak, dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının uzman hücreden alınarak seçenek hücrede üretilecek partinin seçiminde iki hücre arasında oluşacak yeni yük dağılım dengesinin seçenek hücre aleyhine bozulmasını önleyen kıstası uygulaması nedeni ile beklenen bir sonuçtur (Şekil 5.4 ve Şekil 5.6).

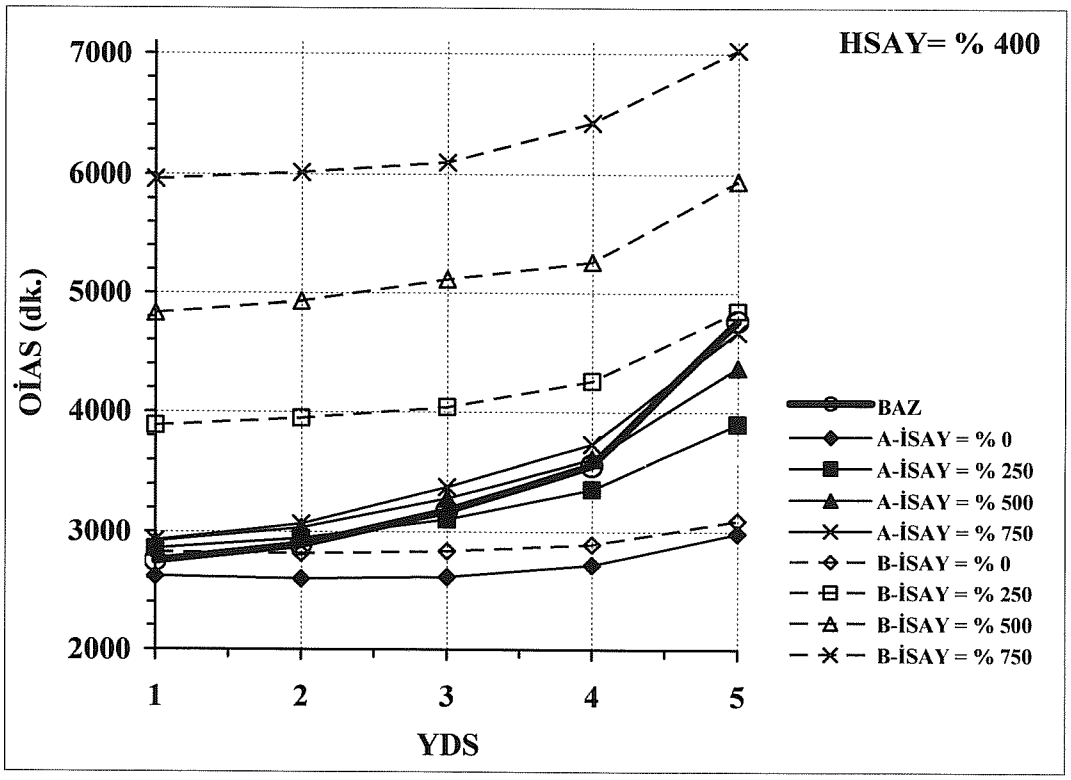


(a)

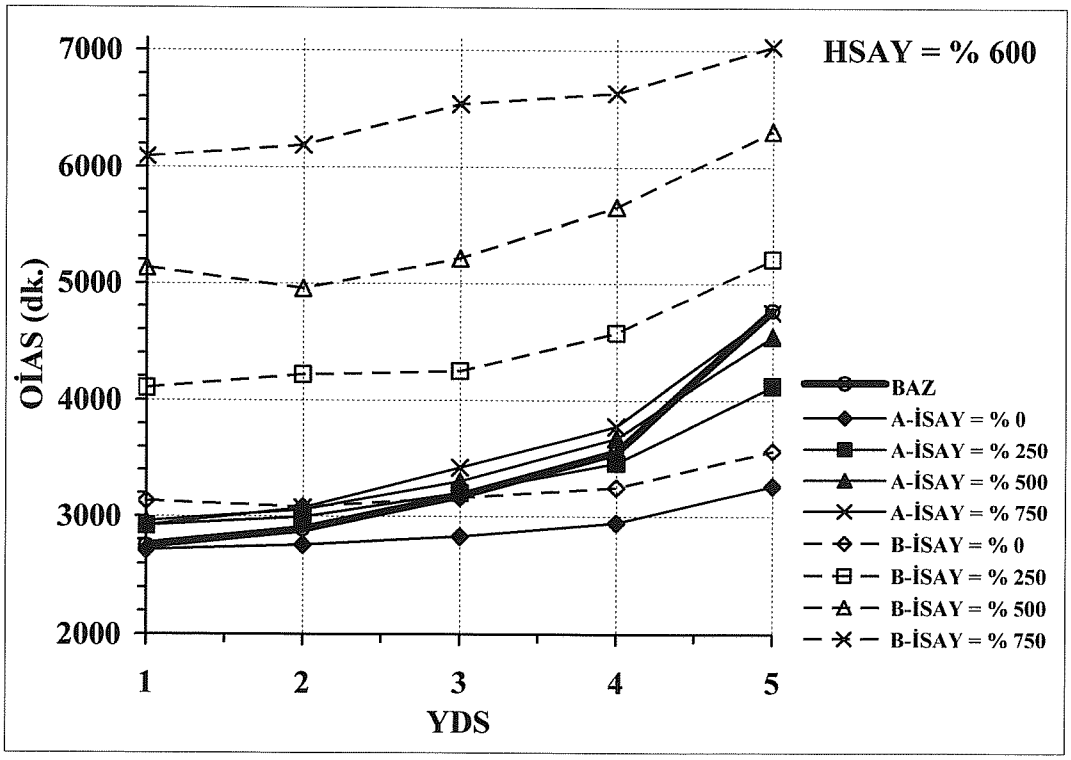


(b)

Şekil 6.10 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi



(c)



(d)

Şekil 6.10 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS (dakika) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi (devam)

Şekil 6.10 'daki grafiklerde gözlenen genel bir eğilim de kural A ve kural B için İSAY ve/veya HSAY değerlerinin artması ile birlikte ortalama OİAS değerlerinin, beklenildiği üzere, uzamasıdır. Ayrıca kuralların ortalama OİAS değerleri bakımından İSAY değerlerine karşı duyarlılığı HSAY değerlerine karşı olan duyarlılığından daha fazladır. Bu eğilim hücresel üretim koşullarında hazırlık süresinin parti işlem süresine oranının oldukça ufak olması olgusu ile açıklanabilir. Dikkate değer bir diğer eğilim ise İSAY ve HSAY değerlerinin her ikisinin de % 0 olması durumunda kural A uygulanması sonucu sağlanan ortalama OİAS değerleri kural B uygulanması ile sağlanan ortalama OİAS değerlerinden çok az büyüktür ya da bu değerler hemen hemen birbirlerine eşittir. Bu eğilimin nedeni ise İSAY ve HSAY değerlerinin her ikisinin birden % 0 olması ile birlikte kural A uygulamasının dışsal iş akışı esnekliğini kullanırken uyguladığı yük dengesini seçenek hücre aleyhine bozmama amaçlı son üç karar kademesinin koşullarının hemen her durumda sağlanabilmesi dolayısı ile etkinliğinin zayıflamasıdır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.6). Dolayısı ile bu durumda kural A ile kural B uygulamalarının sistem performansını iyileştirme etkileri hemen hemen aynı düzeyde olmaktadır. Fakat ise İSAY ve HSAY değerlerinin büyümesi ile birlikte kural A uygulamasının ortalama OİAS değerleri kural B uygulamasının ortalama OİAS değerlerinden daha düşük olmak üzere bu iki kuralın ortalama OİAS değerleri arasıdaki fark hızla artar ve daha da belirginleşir.

Benzetim deney sonuçlarının deney tasarımına göre eşleştirilmiş t testi istatistik analizinden edilen sonuçlar Ek F' deki tablolarda verilmiştir. İstatistik analiz sonuçlarının yorumu ise aşağıda sunulmaktadır. Kural A ile baz durumun karşılaştırılması amacı ile 80 adet nicel faktör seviyesi kombinasyonunun her biri için yapılan eşleştirilmiş t testinin 34 adedi için Kural A uygulanması sonucunda gerçekleşen ortalama OİAS değerlerinin baz duruma ait ortalama OİAS değerlerinden daha kısa olduğu % 97.5 güven düzeyi ile saptanmıştır. Kural A uygulamasına ait bu düşük ortalama OİAS değerleri baz duruma göre bir iyileşme sağlandığını ifade eder. Genelde YDS değeri arttıkça bu iyileşmenin gerçekleştiği İSAY ile HSAY değerlerinin oluşturduğu kombinasyonların sayısı artmaktadır ve iyileşmenin etkisi daha da belirgin hale gelmektedir. Grafiklerde de gözlenen bu eğilim ise yük dengesizliği arttıkça kural A uygulamasının yapısındaki ilave yük dengeleme mekanizmasının, yük dengesini oldukça etkin bir şekilde sağlama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 5.4). Daha basit bir dışsal iş akışı

esnekliği kullanma yapısına sahip olan kural B ise yük dengesinin sağlanması bakımından kural A kadar etkili olamamaktadır (Şekil 5.6). Ayrıca istatistik analiz sonuçları grafiklerdeki eğilimler ile büyük ölçüde uyuşmaktadır.

Kural B ile baz durumun karşılaştırılmasında ise 80 adet nicel faktör seviyesi kombinasyonuna ait eşleştirilmiş t testinin ancak 16 adedinde kural B uygulamasına ait ortalama OİAS değerlerinin baz duruma ait ortalama OİAS değerlerinden daha düşük olduğu % 97.5 güven düzeyinde tespit edilmiştir. İstatistik analiz ve Şekil 6.10'daki grafiklerden de anlaşıldığı üzere kural B uygulamasının baz durumu ortalama OİAS değerlerine göre daha düşük ortalama OİAS değerleri sağladığı İSAY, HSAY ve YDS nicel faktör seviyelerinin oluşturduğu kombinasyonların sayısı kural A uygulamasının baz duruma göre ortalama OİAS değerlerinde düşüş (iyileşme) sağladığı İSAY, HSAY ve YDS nicel faktör seviyeleri kombinasyon sayısından daha azdır. Bir diğer dikkate değer eğilim ise kural B için bu düşük ortalama OİAS değerlerinin sadece işlem süresi artışının % 0 değeri için tüm HSAY değerlerinde geçerli olmasıdır. Daha önce de açıklandığı gibi bu olgunun nedeni kural B uygulamasının yük dengesini sağlama yeteneğinin zayıf olmasıdır. Belirtilmesi gereken bir diğer husus da grafikler ile istatistik analiz sonuçları arasında gözlenen genel uyumdur.

Şekil 6.10 'daki grafiklerden de anlaşıldığı gibi İSAY, HSAY ve YDS nicel faktör seviyelerinin oluşturduğu tüm kombinasyonlar için kural A uygulamasının ortalama OİAS değerlerinin kural B uygulamasının ortalama OİAS değerlerinden daha düşük olmasına karşın sonuçların sağlıklı bir şekilde irdelenebilmesi için bu iki kural arasında da eşleştirilmiş t testi yöntemi ile karşılaştırmalar yapılmıştır. 80 adet nicel faktör seviyesi kombinasyonuna ait eşleştirilmiş t testinin 77 adedi için kural A uygulanması durumundaki ortalama OİAS değerlerinin kural B uygulanması durumundaki ortalama OİAS değerlerinden % 97.5 güven düzeyinde daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca istatistik bakımdan dikkate değer bir diğer genel sonuç ise, Şekil 6.10 'daki grafiklerden de anlaşıldığı gibi kural A uygulanması durumunda, en yüksek yük dengesizliği seviyesi olan 5 ile en yüksek işlem süresi artışı olan % 750 ve en yüksek hazırlık süresi artışı olan % 600 değerleri için ortalama OİAS değerlerinin baz duruma ait ortalama OİAS değerlerine eşit olduğu hipotezinin istatistik olarak % 5

anlamlılık düzeyinde ret edilememesidir. Dolayısı ile nicel faktörlerin seviyeleri için çalışmada belirlenmiş olan değerler kuralların uygulanabileceği oldukça geniş ve anlamlı bir üretim parametreleri alanını kapsamaktadır.

İstatistik analizden anlaşıldığı gibi hücreler arası yük dengesizliği durumunda dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulanması ile ortalama OİAS değerlerinin baz durumun ortalama OİAS değerlerine göre azaltılabilmesinin işlem süresi artış yüzdesi, hazırlık süresi artış yüzdesi ve yük dengesizlik seviyelerinin oluşturduğu 34/80 oranındaki oldukça geniş bir kombinasyon alanında olanaklı olmasıdır. Fakat kural B uygulamasının ortalama OİAS performans ölçütü bakımından sağladığı iyileşmesinin 16/80 oranlı kombinasyon alanı ise kural A uygulamasına ait 34/80 oranlı iyileşme etkisi kombinasyon alanının yarısından daha ufaktır. Dolayısı ile kural A uygulamasının ortalama OİAS değerlerini düşürme bakımından etkinliği kural B uygulamasına göre çok daha iyi olmaktadır. Yani kural A uygulanması durumunda kural B uygulamasına göre göreceli olarak daha yüksek değerlerdeki işlem süresi artışı yüzdesi, hazırlık süresi artışı yüzdesi ve yük dengesizlik seviyesi kombinasyonları için ortalama OİAS değerlerinin düşürülebilmesi olanaklıdır ve kural A yukarıda belirlenen etkili üretim karakteristikleri alanı dahilinde baz duruma göre daha düşük ortalama OİAS değerleri sağlayabilmektedir.

Kural A uygulamasının kural B uygulamasına göre daha etkili olmasının nedeni aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kural A tasarımı gereği seçenek hücrenin giriş kuyruğu ve ilk makinasında hiçbir işin olmaması koşulu ile uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip partinin seçenek hücrede üretilebilmesi için yeni seçenek hücre yükünün yeni uzman hücre yükünden daha ufak olması şartını dikkate almak sureti ile yük dağılımının daha iyi dengelenmesini sağlayan bir kuraldır (Şekil 5.4). Diğer yandan kural B ise sadece kural A uygulamasının ön karar aşamalarındaki yapı olan seçenek hücrenin giriş kuyruğu ve ilk makinasında hiçbir işin olmadığı her durum için uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından en düşük parti işlem süresine sahip olan partiyi seçerek üretilmek üzere seçenek hücreye göndermesine karşın kural A uygulamasının son karar kademelerindeki yük dengesinin daha iyi bir şekilde korunmasına yönelik mekanizmayı kullanmaması nedeni ile kural A kadar etkili olamamaktadır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.6).

6.6.2. Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A veya B stratejilerinin uygulanması durumunda OPİSD (parça adedi) sonuçlarının tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalamalarının, hazırlık süresi artış yüzdesi ve işlem süresi artış yüzdesi faktörlerinin farklı seviyeleri için, yük dengesizlik seviyesine göre değişimi Ek G' deki ilgili tablolarda ve grafik olarak da Şekil 6.11 'de sunulmaktadır. Ayrıca baz durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan OPİSD ortalamaları yine Ek G' deki ilgili tablolarda verilmektedir ve baz duruma ait bu ortalama OPİSD (parça adedi) değerleri Şekil 6.11' deki grafiklerde koyu kalın çizgi ile temsil edilmektedir. Ortalama iş akış süresi ile proses içi stok düzeyi arasında aşağıdaki gibi "Little Kanunu" (Little's Law) olarak bilinen bir teorik ilişki mevcuttur [4,234,246] :

$$L=\lambda \times W \tag{6.30}$$

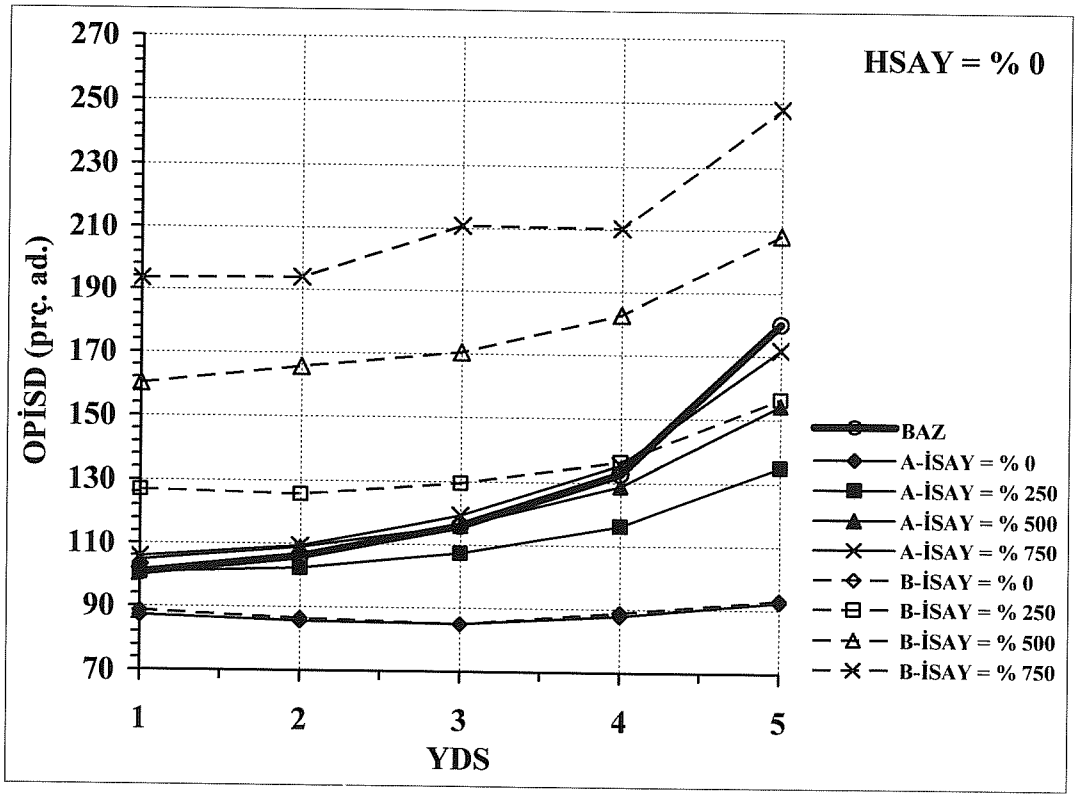
L : Ortalama proses içi stok düzeyi.

λ : Birim zamanda gelen eleman (parça) adedinin beklenen değeri.

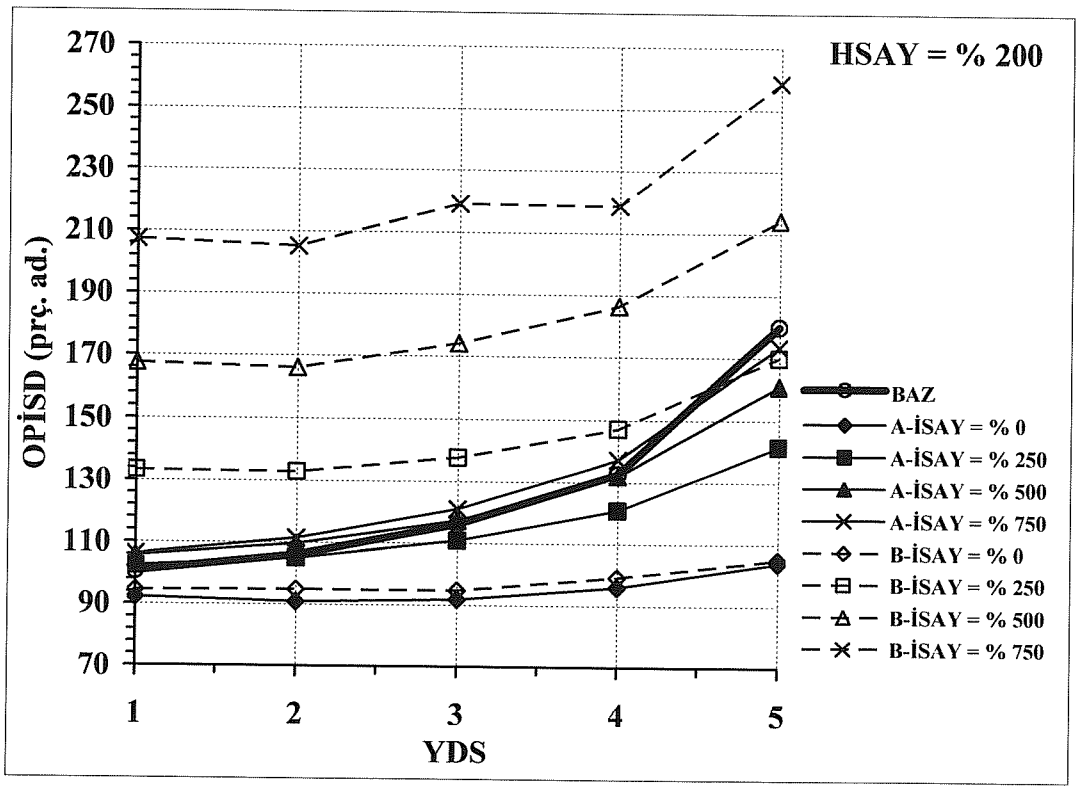
W : Ortalama iş akış süresi.

Bu bağıntı kararlı bir kuyruk sistemi için sistemdeki OPİSD ve OİAS arasında λ sabit olmak koşulu ile sabit bir oran mevcut olduğunu ifade etmektedir. İlgili grafiklerin incelenmesinden anlaşıldığı üzere, bu çalışmada elde edilen ortalama OPİSD değerleri ile ortalama OİAS değerleri arasında yukarıdaki ilişki ile ifade edildiği gibi bir paralellik vardır. Dolayısı ile bir önceki kısımda ortalama OİAS için yapılan değerlendirmeler, genel olarak, ortalama OPİSD için de geçerlidir.

Şekil 6.11 'deki grafiklerden anlaşıldığı gibi kural A veya B uygulamaları ile baz duruma ait ortalama OPİSD sonuç değerleri İSAY ve/veya HSAY değerlerinin artması ile birlikte artmaktadır. Ayrıca bir önceki kısımda belirtilen sebepler dolayısı ile İSAY, HSAY ve YDS nicel faktörlerine ait seviye değerlerinin oluşturduğu tüm kombinasyonlar tarafından belirlenen üretim şartları için kural A uygulamasının ortalama OPİSD değerleri kural B uygulamasının ortalama OPİSD değerlerinden daha ufaktır ve aynı zamanda kural A uygulanması durumunda gerçekleşen ortalama OPİSD değerlerinin yük dengesizliği karşındaki duyarlılığı kural B uygulanmasının sağladığı ortalama OPİSD değerlerinin yük dengesizliği karşındaki duyarlılığına göre daha fazladır.

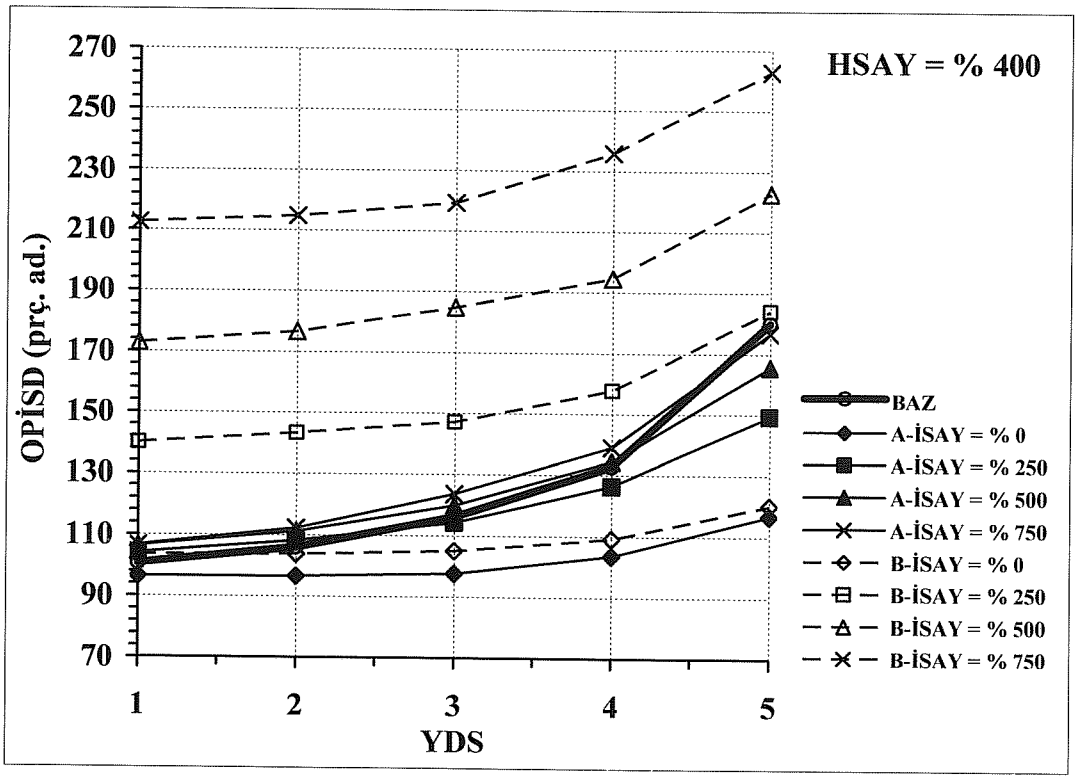


(a)

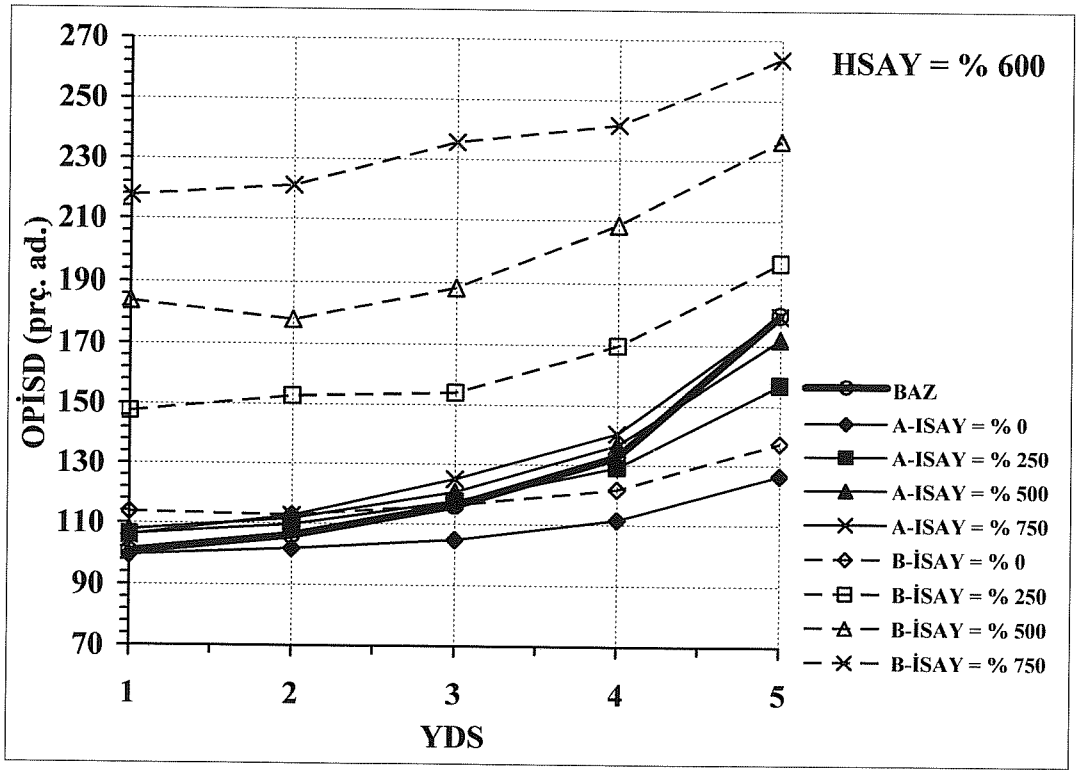


(b)

Şekil 6.11 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi



(c)



(d)

Şekil 6.11 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD (parça adedi) değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi (devam)

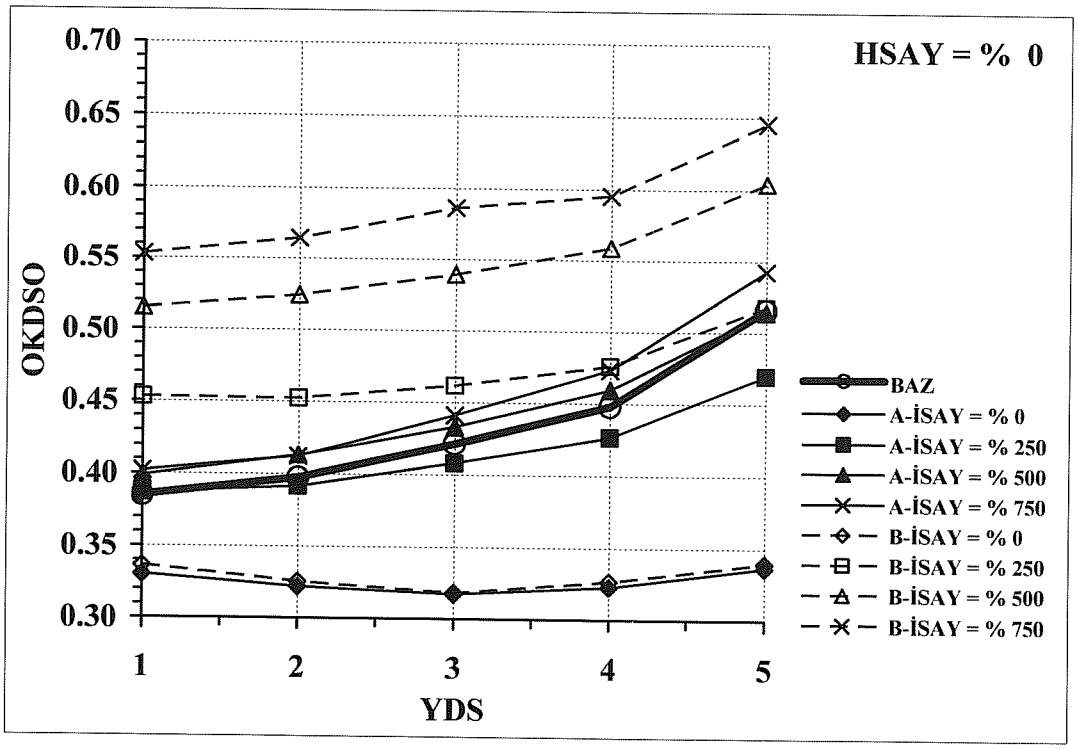
Ortalama OPİSD değerlerine ait eşleştirilmiş t testlerinin sonuçları toplu olarak Ek F 'deki tablolarda verilmiştir. 80 adet eşleştirilmiş t testinin 32 adedi için Kural A uygulamasına ait ortalama OPİSD değerlerinin baz durumun ortalama OPİSD değerlerinden daha düşük olduğu % 97.5 güven düzeyi ile belirlenmiştir. Kural B ile baz durumun karşılaştırılmasında ise 80 adet eşleştirilmiş t testinin ancak 16 adedinde kural B uygulamasına ait ortalama OPİSD değerlerinin baz durumu ortalama OPİSD değerlerinden daha düşük olduğu % 97.5 güven düzeyi ile belirlenmiştir. Ayrıca 80 adet eşleştirilmiş t testi sonuçlarının 75 adedi için kural A uygulamasının ortalama OPİSD değerlerinin kural B uygulamasının ortalama OPİSD değerlerinden daha düşük olduğu da % 97.5 güven düzeyi ile belirlenmiştir. Şekil 6.11 'deki grafikler ve istatistik analizden anlaşıldığı üzere bir önceki kısımda açıklanan neden dolayısı ile kural A ve/veya kural B uygulamasının hücresel sistemin ortalama OPİSD değerlerinde baz duruma göre azalma (iyileşme) sağladığı HSAY ve İSAY değerlerinin oluşturduğu kombinasyonların adedi yük dengesizliği arttıkça daha fazla olmaktadır.

Eşleştirilmiş t testi sonuçlarından anlaşıldığı gibi hücreler arasında yük dengesizliği olması durumunda kural A uygulanması sureti ile ortalama OPİSD değerlerinin baz durumun ortalama OPİSD değerlerine göre azaltılabilmesi nicel faktör seviyelerinin oluşturduğu 32/80 oranındaki oldukça geniş bir kombinasyon alanı içinde olanaklı olmasına karşın kural B uygulamasının ortalama OPİSD değerlerinde baz durumun ortalama OPİSD değerlerine göre azalma sağladığı 16/80 oranlı kombinasyon alanı kural A uygulanması durumundaki alanının ancak yarısı kadardır. Dolayısı ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının ortalama OPİSD değerlerini düşürme bakımından etkinliği dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının etkinliğinden daha iyi olmaktadır. Aynı zamanda kural A yukarıda belirlenen etkili olduğu üretim karakteristikleri alanı dahilinde baz duruma göre daha düşük ortalama OPİSD değerleri sağlayabilmektedir. Yukarıda belirtildiği üzere ortalama OPİSD ve ortalama OİAS değerleri arasında bir paralellik olması dolayısı ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının ortalama OPİSD performans ölçütü değerini iyileştirme bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasına göre daha etkili olmasının nedeni ise önceki kısımda ortalama OİAS için yapılan değerlendirmeler sayesinde açıklanabilir.

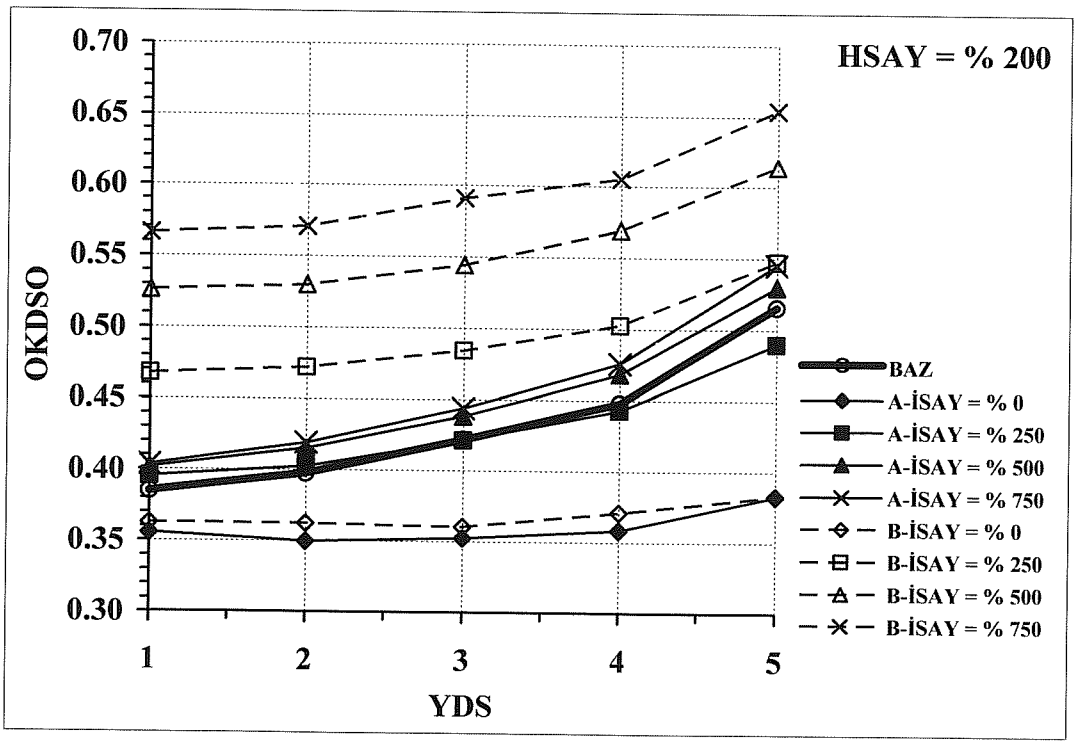
6.6.3. Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçlarının Analiz ve Yorumu

Bu çalışmada hücresel üretim alanında yeni bir performans ölçütü olabileceği düşünülen ortalama katma değersiz süre oranı (OKDSO) tanımlanmış ve incelenmiştir. Bir iş partisi için katma değersiz süre, partinin hücresel sistem içinde işlenmeden geçirdiği zaman dilimidir ve partinin taşınması ve kuyruklarda beklemesi sırasında harcadığı süreler toplamının bir ölçüsü olmaktadır. Ortalama katma değersiz süre oranı ise tamamlanan partilerin katma değersiz süresinin iş akış sürelerine oranlarının ortalaması olarak hesaplanan değerdir ve parça başına israf olunan zaman ya da kaynak oranı olarak yorumlanabilir.

Kural A veya B stratejilerinin uygulanması durumunda elde edilen OKDSO sonuçlarının benzetim deney tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalamalarının YDS değerlerine göre değişimi, İSAY ve HSAY faktörlerinin farklı seviyeleri için, Ek G' deki ilgili tablolarda ve grafik olarak da Şekil 6.12' de sunulmaktadır. Ayrıca baz durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan OKDSO ortalamaları yine Ek G' deki ilgili tablolarda verilmektedir ve baz duruma ait bu ortalama OKDSO değerleri Şekil 6.12' deki grafiklerde koyu kalın çizgi ile temsil edilmektedir. Şekil 6.10, 6.11 ve 6.12 'nin incelenmesinden anlaşıldığı üzere OKDSO değerlerinin hesabına ait 5.16 ifadesinde iş akış sürelerinin terim olarak bulunmasına karşın ortalama OİAS ile ortalama OKDSO sonuçları arasında genel olarak ortalama OİAS ile ortalama OPİSD sonuçları arasındaki gibi tam bir paralellik yoktur ve kuralların ortalama OKDSO değerlerini küçültme (iyileştirme) etkisi ortalama OİAS ile ortalama OKDSO değerlerini küçültme etkisinden daha azdır. Bu durumun nedeni ise kuralların uygulanması durumunda uzman hücreden gelen partilerin seçenek hücrede işlenmesi sonucu özellikle orta ve yüksek İSAY ve/veya HSAY değerlerinde seçenek hücrenin daha fazla yüklenmeye başlaması ve dolayısı ile akış sürelerinin parti işlem sürelerinden daha hızlı artması olgusudur. Yukarıda açıklandığı üzere ortalama OİAS ve/veya ortalama OPİSD sonuç değerleri ile ortalama OKDSO sonuç değerleri arasında tam bir paralellik olmamasına karşın Şekil 6.10, 6.11 ve 6.12 'nin incelenmesi sureti ile ortalama OKDSO eğrilerinin genel eğiliminin ortalama OİAS ve ortalama OPİSD eğrilerinin genel eğilimine benzediği kolaylıkla gözlemlenmektedir. Dolayısı ile bir önceki kısımlarda ortalama OİAS ve ortalama OPİSD sonuçları için yapılan değerlendirmeler, genel olarak, ortalama OKDSO sonuçları için de geçerlidir.

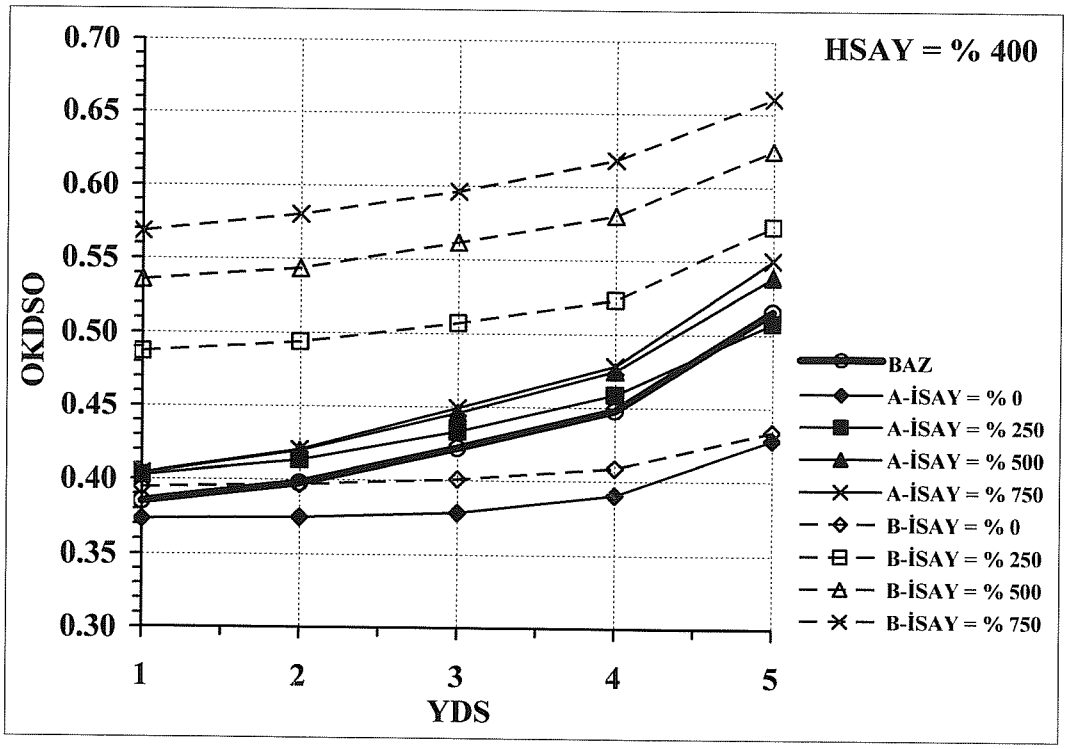


(a)

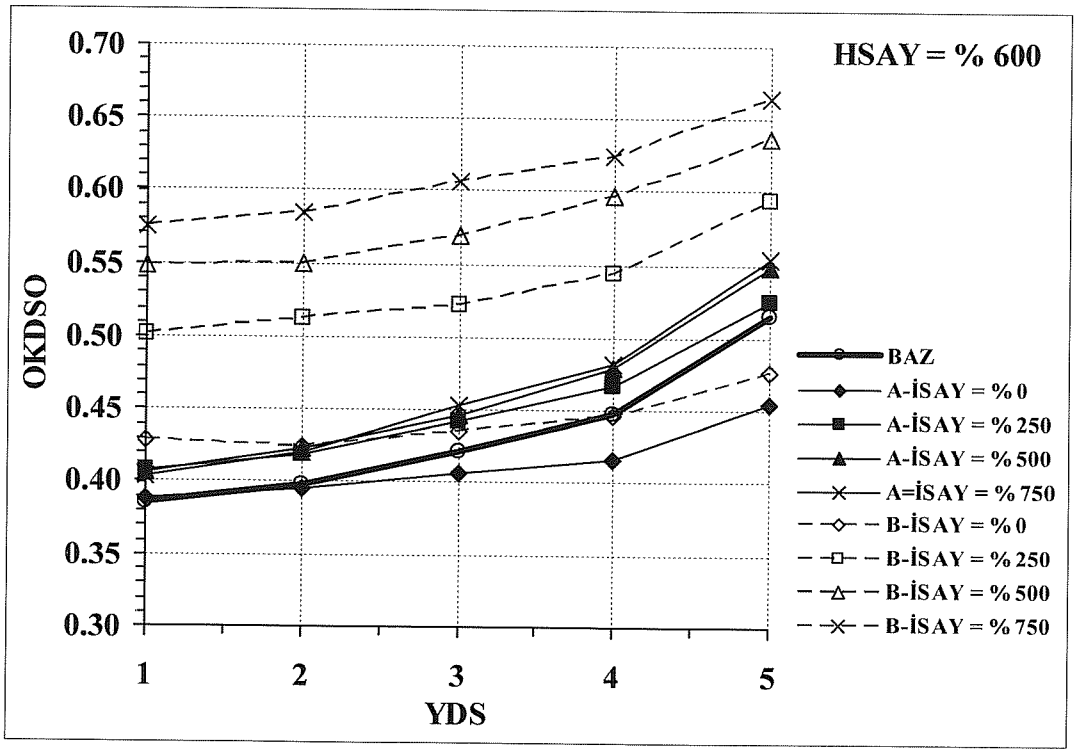


(b)

Şekil 6.12 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi



(c)



(d)

Şekil 6.12 : Kural A ve Kural B ile Baz Durum için tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerlerinin değişik İSAY ve HSAY değerlerinde YDS ile değişimi (devam)

Şekil 6.12 'deki grafiklerden anlaşıldığı üzere İSAY, HSAY ve YDS nicel faktörleri seviyelerinin tüm kombinasyonları ile belirlenen üretim koşullarında kural A uygulamasına ait ortalama OKDSO değerleri kural B uygulamasının ortalama OKDSO değerlerine göre daha düşük olmaktadır. Kural A ve baz durum için ortalama OKDSO değerleri yük dengesizliğinin artmasına bağlı olarak artmaktadır ve kural B uygulanması durumunda ise ortalama OKDSO değerlerinin yük dengesizliği ile birlikte artışı daha yavaştır. Eğrilerin bu özelliğinden anlaşıldığı üzere ortalama OKDSO değerleri bakımından kural A uygulamasının yük dengesizliği karşısındaki duyarlılığı kural B uygulamasına göre daha fazladır. Baz durumu ortalama OKDSO değerlerinden daha büyük olan kural A uygulamasına ait bazı ortalama OKDSO değerlerinin baz durumun ortalama OKDSO değerlerine oldukça yakın olmasına karşın kural B uygulaması ortalama OKDSO değerleri genel olarak baz durumun ortalama OKDSO değerlerinden oldukça büyüktür. Şekil 6.12' deki grafiklerde gözlenen tüm bu özellikler ortalama OKDSO değerleri bakımından kural A uygulamasının B uygulamasına göre daha etkin olduğunu göstermektedir ve daha önce de açıklandığı gibi bu durum kural A uygulamasının hücreler arasında daha iyi bir yük dağılımı dengesi gözeten mekanizmasının doğal bir sonucudur.

Toplu olarak Ek F' deki tablolarda derlenmiş olan ortalama OKDSO değerlerine ait eşleştirilmiş t testi sonuçlarının istatistik değerlendirmesi aşağıda verilmektedir. Kural B ile baz durum karşılaştırıldığında 80 adet eşleştirilmiş t testinin ancak 8 adedinde kural B uygulamasına ait ortalama OKDSO değerlerinin baz durumu ortalama OKDSO değerlerinden daha düşük olduğu % 97.5 güven düzeyinde belirlenmiştir. Baz durumuna ait ortalama OKDSO değerlerinden % 97.5 güven düzeyi ile daha düşük olan kural A uygulaması ortalama OKDSO değerlerinin adedi ise 23 olarak belirlenmiştir. Ayrıca kural A uygulamasına ait ortalama OKDSO değerlerinin 78 tanesi % 97.5 güven düzeyinde kural B uygulamasının ortalama OKDSO değerlerinden daha ufaktır. İstatistik analiz sonuçlarından anlaşıldığı üzere yük dengesizliği durumunda kural A uygulanması sureti ile ortalama OKDSO değerlerinin baz durumun ortalama OKDSO değerlerine göre azaltılabilmesi nicel faktör seviyelerinin oluşturduğu 23/80 oranındaki nispeten geniş bir kombinasyon alanı içinde olanaklı olmasına karşılık kural B uygulamasının ortalama OKDSO değerlerinde baz durumu ortalama OKDSO değerlerine göre azalma sağladığı 8/80 oranlı kombinasyon alanı kural A uygulanması durumundaki alanının üçte birinden

daha ufaktır. Dolayısı ile dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının ortalama OKDSO değerlerini düşürme bakımından etkinliği her durumda dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının etkinliğinden daha iyi olmaktadır.

Sonuç olarak ortalama OİAS ve OPİSD performans ölçütlerinin yorumu ile ilgili olarak daha önce açıklanan nedenler dolayısı ile yukarıda belirlenen etkinlik alanı dahilinde dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması parti başına kaynak tasarrufunu ifade eden ortalama OKDSO performans ölçütü değerini iyileştirme bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulanmasına göre daha etkili olmaktadır.

6.7. İkincil Performans Ölçütleri Benzetim Sonuçlarının Analizi ve Yorumu

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinlik derecelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ikincil performans ölçütleri benzetim sonuçlarının sadece grafik bakımdan analiz ve yorumu bu kısmı takip eden kısımlarda sunulacaktır. Geliştirilen benzetim modellerinin Tablo 6.2 'deki deney faktör seviyelerinin her bir kombinasyonu için koşulması sureti ile ikincil performans ölçütü gözlemlerinin elde edilmesi birincil performans ölçütleri için kısım 6.6 'da açıklanana benzer tarzda gerçekleştirilmiştir. Yani her benzetim koşumu 20 kez tekrarlanmış ve her tekrardaki gözlemler ise ilk 50.000 dakikalık benzetim zamanı ile belirlenen budama noktasından başlamak üzere 600 adetlik partinin tamamlanması için geçen süre içinde toplanmıştır. Her benzetim koşumunun her tekrarı sonunda elde edilen OSKO, uzman hücre OHKO, seçenek hücre OHKO, OPTGS ve TGPA ikincil performans ölçütü sonuçlarının tekrar adedi olan 20 değeri üzerinden ortalama değerleri nicel faktör seviyeleri YDS, İSAY ve HSAY değerlerinin oluşturduğu 80 (=5·4·4) adet kombinasyona göre nitel faktör seviyeleri olan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ile B için ayrı ayrı Ek H 'deki tablolarda sunulmuştur. Ayrıca Ek H tablolarında Kural A ve Kural B uygulamalarının her biri için her bir ikincil performans ölçütüne ait 80 'er adet ortalama değerin 80 adet üzerinden hesaplanan genel ortalama değerleri ve aynı zamanda performans ölçütü ortalamalarının maksimum ve minimum değerleri ile bu uç değerlerin elde edildiği YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin değerleri de verilmiştir. Baz durum nitel faktörünün etkileşebileceği tek nicel faktörün YDS olması sebebi ile Ek H' deki tablolarda baz

durum için her bir ikincil performans ölçütüne ait olmak üzere sadece YDS faktörünün 5 seviyesi için ikincil performans ölçütü değerlerinin 20 tekrar sayısına göre ortalamaları ve bu ortalamaların YDS seviye adedi olan 5 üzerinden hesaplanan genel ortalamaları ile maksimum ve minimum değerleri elde edildikleri YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin değerlerine göre verilmiştir.

Dolayısı ile tüm benzetim modellerinin koşumu sonucu elde edilen toplam olarak 16500 (= (80+·80+5)·20·5)) adet ikincil performans ölçütü değerinin her koşumun tekrar adedi (örnek hacmi) olan 20 değerine bölünmesi ile elde edilen toplam 825 (=((80+·80+5)·5) adet ortalama ikincil performans ölçütü değeri ile birlikte yukarıda belirtilen genel ortalama değerler ve maksimum ile minimum değerler Ek H' deki tablolarda sunulmuştur. İkincil performans ölçütleri sonuçlarının aşağıdaki kısımlarda sunulacak olan grafik analiz ve yorumları için benzetim çıktı sonuçlarından derlenen Ek H tablolarındaki ilgili değerlerden faydalanılacaktır.

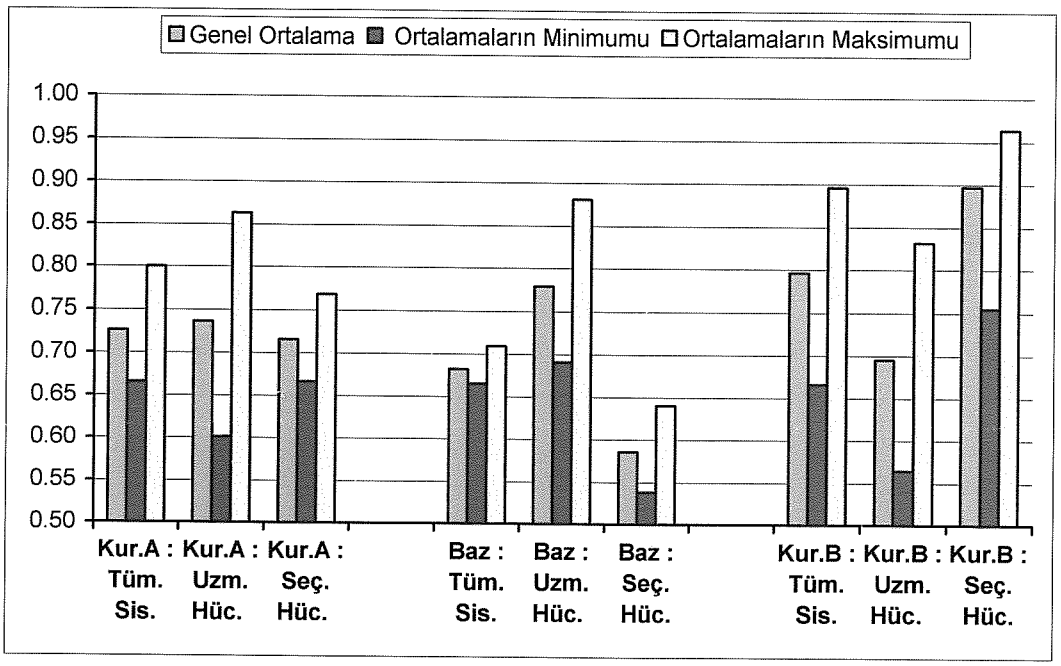
6.7.1. Ortalama Sistem ve Hücre Kullanım Oranları Sonuçlarının Analiz ve Yorumu

Ortalama sistem kullanım oranı ve uzman hücre ile seçenek hücre ortalama hücre kullanım oranları ikincil performans ölçütleri benzetim süresince sistem ya da hücrelerdeki makinaların boş veya dolu olmasını belirten 0 veya 1 durum değişenin zaman ağırlıklı ortalaması olarak hesaplandığı için sistemi terk eden toplam 600 adet partinin tümü üzerinden ortalama değer olarak hesaplanan birincil ve diğer ikincil performans ölçülerinden farklı özelliktedir. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ile B ve baz durum için bir önceki kısımda açıklandığı gibi hesaplanarak Ek H 'deki tablolarda her bir nicel faktör seviyesine göre listelenmiş olan ortalama OSKO ile uzman ve seçenek hücre ortalama OHKO değerlerinin genel ortalamaları ile minimum ve maksimum değerlerine ait Şekil 6.13 ile Tablo 6.3 'ün incelenmesi sureti ile aşağıdaki hususlar belirlenmiştir.

- Kural A veya kural B uygulanması sonucu elde edilen ortalama OSKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OSKO değerleri baz durumu için bunlara karşı gelen değerlerden genel olarak daha büyük veya eşittir. Bu olgunun sebebi ise kuralların uygulanması sonucu uzman hücreye ait partilerin seçenek hücredeki işlem ve hazırlık sürelerinin artmasına bağlı olarak makina kullanım oranlarının da yükselmesidir.

- Kural A uygulamasının ortalama OSKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OSKO değerleri aynı performans ölçütleri için kural B uygulanması sonucu elde edilen değerlerden genel olarak daha küçük veya eşittir. Bu durumun sebebi ise daha önce de belirtildiği gibi kural A uygulamasının tasarımı dolayısı ile hücreler arasındaki yük dengesini kural B uygulamasına göre daha iyi sağlamasıdır.

- Kural A veya B uygulanması ile elde edilen uzman hücre ortalama OHKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OHKO değerleri baz durumda uzman hücre için sağlanan aynı performans ölçütlerine ait değerlerden daha düşüktür. Fakat her iki kuralın seçenek hücre ortalama OHKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OHKO değerleri baz durumda seçenek hücre için sağlanan aynı performans ölçütlerine ait değerlerden daha yüksektir. Bu olguların nedeni ise kuralların uygulanmasına bağlı olarak bazı partilerin uzman hücreden alınarak seçenek hücrede işlenmesi sonucu aşırı yüklü uzman hücre yükünün azalmasına karşın seçenek hücre yükünün artmasıdır.



Şekil 6.13 : Ortalama OSKO ile uzman ve seçenek hücre ortalama OHKO değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

Tablo 6.3 : Ortalama OSKO ile uzman ve seçenek hücre ortalama OHKO değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

	Sistem veya Hücre	Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları	Ortalama Kullanım Oranları Ortalamaları	YDS	İSAY (%)	HSAY (%)
ORTALAMALARIN MİNİMUMU	Tüm Sistem	Kural A	0.67	5	0	0
		Kural B	0.67	5	0	0
		Baz Durum	0.67	5	-	-
	Uzman Hücre	Kural A	0.60	5	0	0
		Kural B	0.56	5	0	0
		Baz Durum	0.69	5	-	-
	Seçenek Hücre	Kural A	0.67	15	750	600
		Kural B	0.75	15	0	0
		Baz Durum	0.54	25	-	-
ORTALAMALARIN MAKSİMUMU	Tüm Sistem	Kural A	0.80	25	250	600
		Kural B	0.90	25	750	600
		Baz Durum	0.71	25	-	-
	Uzman Hücre	Kural A	0.86	25	750	600
		Kural B	0.83	25	750	600
		Baz Durum	0.88	25	-	-
	Seçenek Hücre	Kural A	0.77	25	0	600
		Kural B	0.96	25	750	200
		Baz Durum	0.64	5	-	-
GENEL ORTALAMA	Tüm Sistem	Kural A	0.73	-	-	-
		Kural B	0.80	-	-	-
		Baz Durum	0.68	-	-	-
	Uzman Hücre	Kural A	0.74	-	-	-
		Kural B	0.69	-	-	-
		Baz Durum	0.78	-	-	-
	Seçenek Hücre	Kural A	0.72	-	-	-
		Kural B	0.90	-	-	-
		Baz Durum	0.59	-	-	-

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 (baz durum için 5) değeri üzerinden hesaplanmıştır.

- Kural A uygulamasının uzman hücre için sağladığı ortalama OSKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OSKO değerleri kural B uygulamasının uzman hücre için sağladığı aynı ölçütlere ait değerlerden daha büyüktür. Fakat kural A uygulamasının seçenek hücre için sağladığı ortalama OSKO genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OSKO değerleri kural B uygulamasının seçenek hücre için sağladığı aynı ölçütlere ait değerlerden çok daha küçüktür. Bu durumun nedeni ise kural A uygulamasının hücreler arasındaki yük dengesini kural B uygulamasına göre daha iyi sağlamasıdır.
- Ortalama OSKO değerlerinin minimumu ve maksimumu ile uzman ve seçenek hücrelerin ortalama OHKO değerlerinin minimum ve maksimum değerleri tarafından belirlenen değişim aralıklarının incelenmesi sureti ile kural A uygulaması sonucu bu üç performans ölçütlünde oluşan değişkenliğin baz durumdaki değişkenliğe göre daha fazla olmasına karşın kural B uygulamasında oluşan değişkenliğe göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum ise kural A uygulamasının hücreler arasındaki yük dengesini kural B uygulamasına göre daha iyi sağlaması sebebi ile beklenen bir olgudur.

Yukarıdaki analiz ve yorumlardan anlaşıldığı üzere kullanım oranları ikincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar, genel üretim dinamiği çerçevesinde, birincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Sonuç olarak OSKO ile uzman ve seçenek hücre OHKO değerleri bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasına göre genel olarak daha iyi sonuçlar sağlamaktadır. Bu durumun nedeni ise daha önce de açıklandığı gibi kural A uygulamasının yapısındaki uzman ve seçenek hücreler arasındaki dengeyi daha iyi sağlayan karar kademeleridir.

6.7.2 Ortalama Parti Teslim Gecikme Süresi ile Teslimi Geciken Parti Adedi Sonuçlarının Analiz ve Yorumu

İkincil performans ölçütleri OPTGS (dakika) ile TGPA (parti adedi) benzetim sonuçlarının analiz ve yorumu amacı ile Ek H' deki tablolarda baz durum ve dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ile B uygulamalarının her biri için YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin oluşturduğu kombinasyonlara göre sunulan

ortalama OPTGS ile ortalama TGPA değerlerinin incelenmesi sonucunda aşağıdaki hususlar belirlenmiştir.

- OPTGS ile TGPA değerleri benzetim süresince sistemi terk eden toplam 600 adet partinin tümü üzerinden ortalama değer olarak hesaplandığı için bu iki ikincil performans ölçütüne ait sonuçlar aynı şekilde hesaplanan birincil performans ölçüleri sonuçlarına benzer eğilimlere sahiptir.
- Kural A uygulaması durumunda YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin kombinasyonlarının oluşturduğu 80 adet farklı üretim ortamının 62 adedi için baz duruma ve tümü için de kural B uygulamasına göre daha düşük (iyi) ortalama OPTGS değerleri sağlanmıştır.
- Kural B uygulaması durumunda YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin kombinasyonlarının oluşturduğu 80 adet farklı üretim ortamının 25 adedi için baz duruma göre daha düşük (iyi) ortalama OPTGS değerleri sağlanmıştır.
- Kural A uygulaması durumunda YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin kombinasyonlarının oluşturduğu 80 adet farklı üretim ortamının 11 adedi için baz duruma ve tümü için de kural B uygulamasına göre daha düşük (iyi) ortalama TGPA değerleri sağlanmıştır.
- Kural B uygulaması durumunda YDS, İSAY ve HSAY nicel faktör seviyelerinin kombinasyonlarının oluşturduğu 80 adet farklı üretim ortamının 10 adedi için baz duruma göre daha düşük (iyi) ortalama TGPA değerleri sağlanmıştır.

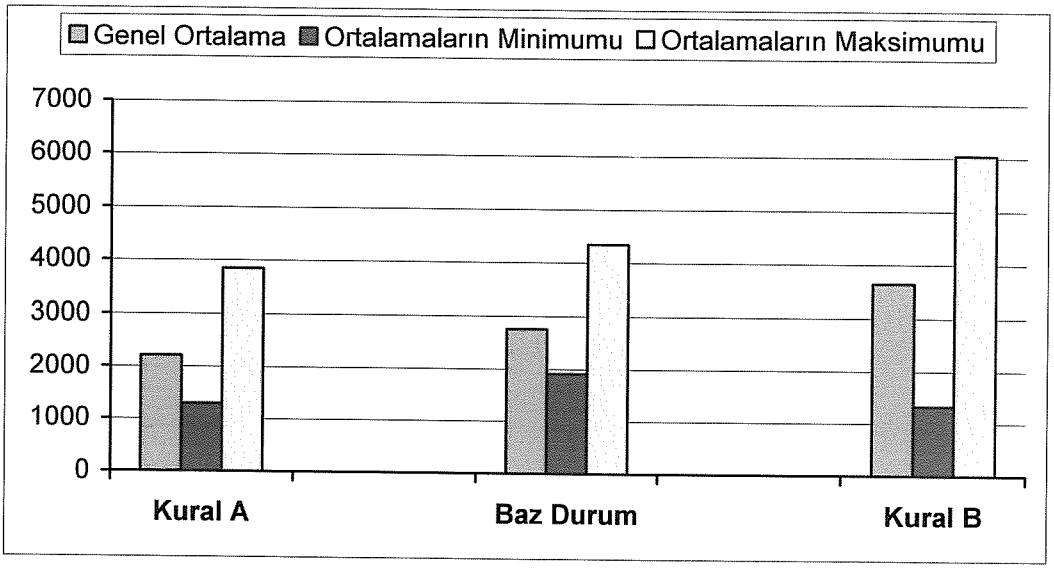
Yukarıdaki açıklamalardan anlaşıldığı üzere özellikle OPTGS İkincil performans ölçütü sonuçları birincil performans ölçütü sonuçlarına benzer eğilimlere sahiptir. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının baz duruma göre ortalama OPTGS değerlerinde sağladığı azalmanın (iyileşmenin) etki alanı her YDS değeri için İSAY ve HSAY değerlerinin genelde düşük ve orta düzeyde olduğu 62/80 oranındaki oldukça geniş bir kombinasyon alanında olanaklı olabilmektedir. Kural B uygulamasının baz duruma göre ortalama OPTGS değerlerinde azalma (iyileşme) sağladığı 25/80 oranındaki bölge ise kural A uygulamasının ortalama OPTGS değerlerinde azalma (iyileşme) sağladığı 62/80 oranlı bölgenin yarısından da ufaktır.

Önemli bir diğer husus ise birincil performans ölçütlerinde olduğu gibi yük dengesizlik seviyesinin artması ile birlikte her iki kuralın da baz duruma göre ortalama OPTGS değerinde azalma sağladığı İSAY ve HSAY adedinin artması ve değerlerinin büyümesidir. Bu eğilim özellikle kural A uygulaması için daha da belirgindir.

Ayrıca kural A ve B uygulamalarının baz duruma göre ortalama TGPA değerlerinde sağladığı iyileşmenin etki bölgesi ise tüm YDS değerleri için İSAY değerlerinin 0 ve HSAY değerlerinin de 0 ile 400 arasında olduğu, sırası ile 11/80 ve 10/80 oranlı oldukça ufak bir kombinasyon alanındadır. Kural A ve kural B uygulamalarının ortalama TGPA değerlerde iyileşme sağlama bakımından yeterince etkili olamamasının nedeni ise 5.21 ifadesindeki parti teslim zamanının parti işlem süresine göre hesaplanmasına ait K çarpanı için, hücresel üretim sistemlerinin kısa teslim süreleri sağlaması beklentisi ile bu alandaki çalışmalarda kullanılan oldukça düşük bir değer olan 1.5 değerinin seçilmiş olmasıdır [227]. Fakat özellikle vurgulanması gereken dikkate değer bir husus ise teslim sürelerinin oldukça kısa seçilmiş olması sebebi ile kuralların ortalama TGPA değerini yeterince düşürememesine rağmen özellikle kural A uygulaması sureti ile OPTGS değerinde önemli derecede azalma (iyileşme) sağlanabilmesidir.

Ayrıca yukarıdaki analiz ve yorumlara ilave olarak baz durum, kural A ve B uygulamalarının her biri için Ek H' deki tablolarda listelenmiş olan ortalama OPTGS ile ortalama TGPA değerlerinin genel ortalamaları ile minimum ve maksimum değerlerine ait Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 ile Tablo 6.4 ve Tablo 6.5 'in incelenmesi sonucunda aşağıdaki hususlar belirlenmiştir.

- Kural A uygulamasının ortalama OPTGS genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama OPTGS değerleri aynı performans ölçütleri için hem baz durum hem de kural B uygulamasına ait değerlerden daha küçüktür.
- Kural B uygulamasının ortalama OPTGS genel ortalaması ile maksimum ortalama OPTGS değerleri aynı performans ölçütleri için hem baz durum hem de kural A uygulamasına ait değerlerden daha büyüktür. Fakat kural B uygulamasının sadece minimum ortalama OPTGS değeri aynı performans ölçütü için sadece baz duruma ait değerden daha küçüktür.

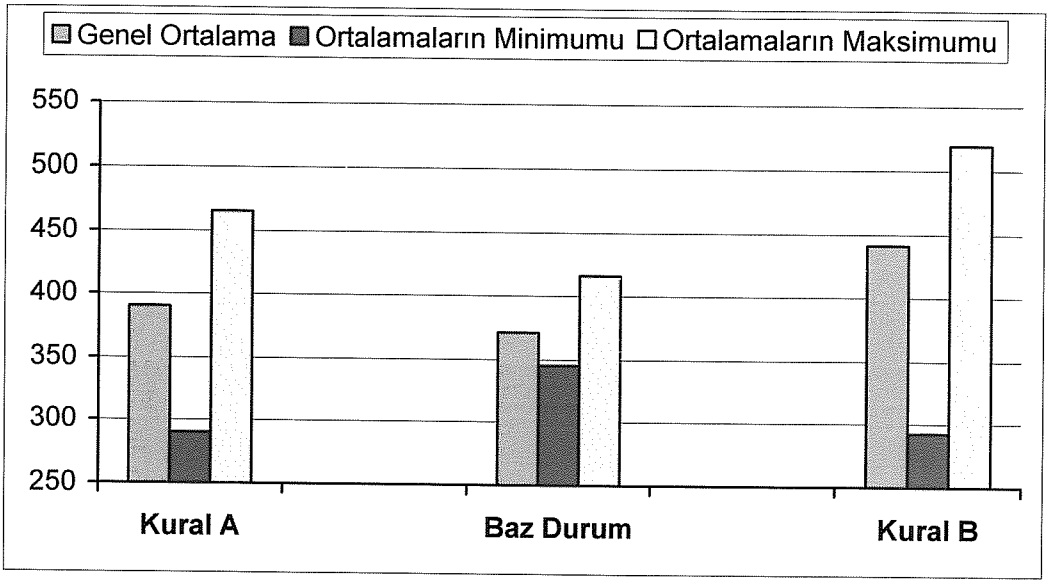


Şekil 6.14 : Ortalama OPTGS değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

Tablo 6.4 : Ortalama OPTGS değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

	Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	YDS	İSAY (%)	HSAY (%)
ORTALAMALARIN MİNİMUMU	Kural A	1287	20	0	0
	Kural B	1328	15	0	0
	Baz Durum	1907	5	-	-
ORTALAMALARIN MAKSİMUMU	Kural A	3845	25	750	600
	Kural B	6038	25	750	600
	Baz Durum	4346	25	-	-
GENEL ORTALAMA	Kural A	2207	-	-	-
	Kural B	3643	-	-	-
	Baz Durum	2758	-	-	-

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 (baz durum için 5) değeri üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 6.15 : Ortalama TGPA değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

Tablo 6.5 : Ortalama TGPA değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile genel ortalamaları

	Dışsal İş Akışı Esnekliğini Kullanma Kuralları	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)	YDS	İSAY (%)	HSAY (%)
ORTALAMALARIN MİNİMUMU	Kural A	290	15	0	0
	Kural B	292	15	0	0
	Baz Durum	345	5	-	-
ORTALAMALARIN MAKSİMUMU	Kural A	465	25	500	600
	Kural B	519	25	750	600
	Baz Durum	416	25	-	-
GENEL ORTALAMA	Kural A	390	-	-	-
	Kural B	441	-	-	-
	Baz Durum	371	-	-	-

Not : Teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 (baz durum için 5) değeri üzerinden hesaplanmıştır.

- Kural A uygulamasının ortalama TGPA genel ortalaması ile maksimum ve minimum ortalama TGPA değerleri aynı performans ölçütleri için kural B uygulamasına ait değerlerden daha küçüktür.
- Kural A ve Kural B uygulamalarının sadece ortalama TGPA minimum değerleri baz durum ortalama TGPA minimum değerinden daha küçüktür.
- Ortalama OPTGS ile TGPA değerlerinin minimum ve maksimum değerleri tarafından belirlenen değişim aralıklarının incelenmesi sureti ile kural A uygulaması sonucu bu iki performans ölçütünde oluşan değişkenliğin baz durumdaki değişkenliğe göre daha fazla olmasına karşın kural B uygulaması sonucu oluşan değişkenliğe göre daha az olduğu anlaşılmaktadır.

Yukarıdaki analiz ve yorumlardan anlaşıldığı üzere OPTGS ile TGPA ikincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar, genel üretim dinamiği çerçevesinde, birincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar ile benzer eğilimlere sahiptir ve uyumludur. Sonuç olarak dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması uzman ve seçenek hücreler arasındaki dengeyi daha iyi sağlayan bir yapıya sahip olması nedeni ile OPTGS ve TGPA ikincil performans ölçütü değerleri bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasına göre daha iyi sonuçlar sağlamaktadır.

6.8. Sonuç ve Genel Değerlendirme

Yük dengesizliği nedeni ile hücresel üretim sistemlerinin performans ölçütleri değerlerinde oluşan kötüleşmeyi gidermek amacı ile geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ve dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamalarının benzetim deneylerinden elde edilen yukarıdaki sonuçların genel değerlendirmesi aşağıda sunulmaktadır.

1. Grafikler ve istatistik analiz sonuçlarından anlaşıldığı gibi kural A ile kural B uygulamalarının baz durum ile karşılaştırılması halinde; kural A uygulamasının baz duruma göre her üç birincil performans ölçütü değerinde azalma (iyileşme) sağladığı YDS, İSAY ve HSAY kombinasyonlarının oluşturduğu üretim koşullarının adedi kural B uygulamasına göre daha fazladır (birincil performans ölçütü çeşidine göre yaklaşık olarak iki ile üç

katından fazla). Bu durumun sebebi ise, kural B uygulamasından farklı olarak, kural A uygulamasının iki hücre arasında oluşacak yük dağılımı dengesini sağlama prosedürünün yapısındaki seçenek hücrenin aşırı yüklenmesini önleyen karar kademelerine sahip olması ile açıklanabilir.

2. Genel olarak dışsal iş akışı esnekliği kuralı A uygulamasının baz duruma göre her üç birincil performans ölçütünün değerlerinde azalma iyileşme sağladığı bölge hazırlık süresi ve işlem süresi artış yüzdesinin nispeten düşük veya orta büyüklükteki değerler alanında bulunmaktadır ve yük dengesizlik seviyesinin artması ile birlikte bu alan gittikçe daha yüksek hazırlık ve işlem süresi artışı yüzdesi değerlerini kapsamaktadır. Yani kural A uygulamasının baz duruma göre her üç birincil performans ölçütünün değerlerinde azalma sağladığı İSAY ve HSAY değerlerinin oluşturduğu kombinasyon adedi YDS değerlerinin artması ile birlikte artmaktadır. Sonuç olarak yük dengesizliği arttıkça özellikle kural A uygulamasının birincil performans ölçütleri için baz duruma göre daha iyi olduğu üretim koşullarının sayısı daha fazla olmaktadır. Yukarıdaki açıklanan eğilim dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının baz durum ile karşılaştırılması durumunda ise genel olarak İSAY değerlerinin sıfır olduğu çok sınırlı bir değerler alanı içinde geçerlidir. Özellikle kural A için çok belirgin olan bu eğilimin nedeni ise uzman ve seçenek hücreler arasındaki yük dengesizliği arttıkça bu yük dengesizliğini gidermek amacı ile seçenek hücreye işlenmek üzere gönderilen uzman hücre partilerinin daha yüksek seçenek hücre hazırlık ve işlem sürelerine sahip olması durumunda bile seçenek hücrenin uzman hücre yükünün bir kısmını alarak işleyebilmesi sureti ile yük dengesizliğini giderebilme olanağının olabilmesidir. Bu olgu yük dengesizlik seviyesinin yüksek olması durumunda kuralların daha etkili olması beklentisinin ve aynı zamanda özellikle kural A uygulamasının performans ölçütlerini iyileştirme yeteneği bakımından kural B uygulamasından daha güçlü olması beklentisinin gerçekleşmesini ifade etmektedir.

3. Kural A ile kural B uygulamalarının karşılaştırılması durumunda istatistik bakımdan hemen hemen tüm ve grafik olarak da tüm üretim koşullarında kural A uygulaması ile sağlanan birincil performans ölçütleri değerlerinin kural B uygulaması ile sağlanan birincil performans ölçütleri değerlerinden

daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kural A uygulamasının kural B uygulamasına göre her üç birincil performans ölçütünde de daha fazla iyileşme sağlamasının nedeni, kural B uygulamasından farklı olarak, kural A uygulamasının iki hücre arasında oluşacak yük dağılımı dengesini sağlama mekanizmasının yapısındaki seçenek hücrenin aşırı yüklenmesini önleyen karar kademelerine sahip olması ile açıklanabilir.

4. İSAY ve HSAY değerlerinin % 0 olması durumunda kural A uygulanması sonucu sağlanan birincil performans ölçütlerinin değerleri kural B uygulanması ile sağlanan birincil performans ölçütlerinin değerlerinden çok az büyük ama hemen hemen eşit olmaktadır. Bu eğilimin nedeni ise işlem ve hazırlık süresi artışının her ikisinin de % 0 olması ile birlikte kural A uygulamasının dışsal iş akışı esnekliğini kullanmak için uyguladığı yük dengesini seçenek hücre aleyhine bozmama amaçlı son üç karar kademesinin koşullarının hemen her durumda sağlanabilmesi dolayısı ile etkinliğinin zayıflamasıdır. Dolayısı ile bu durumda kural A uygulamasının sistemin birincil performans ölçütlerinin değerlerini iyileştirme etkisi kural B uygulamasının performansı iyileştirme etkisi ile hemen hemen aynı düzeyde olmaktadır. Fakat hazırlık ve işlem süreleri artış yüzdelerinin büyümesi ile birlikte kural A uygulamasının OİAS değerleri kural B uygulamasının OİAS değerlerinden daha düşük olmak üzere bu iki kuralın OİAS değerleri arasıdaki fark hızla artar ve daha da belirginleşir.

5. Baz durum uygulanmasında her üç birincil performans ölçütü değerlerinin de YDS değerinin artması ile birlikte, beklenildiği gibi, arttığı (kötüleştiği) belirlenmiştir.

6. Tüm İSAY ve HSAY değerleri için kural A ve kural B uygulamalarının sağladığı birincil performans ölçütü değerlerinin genel eğilimi YDS değerinin artması ile birlikte, beklenildiği gibi, artış (kötüleşme) yönündedir.

7. YDS ve HSAY değerlerinin sabit tutulması durumunda İSAY değerinin artması ile birlikte kural A ve kural B uygulamalarının sağladığı birincil performans ölçütü değerleri, beklenildiği gibi, artar (kötüleşir).

8. YDS ve İSAY değerlerinin sabit tutulması durumunda HSAY değerinin artması ile birlikte kural A ve kural B uygulamalarının sağladığı birincil performans ölçütü değerleri, beklenildiği gibi, artar (kötüleşir).

9. Ayrıca aynı YDS değerinde, İSAY değişimine karşı her iki kuralın birincil performans ölçütleri değerlerinin duyarlılığı HSAY değişimine karşı olan duyarlılıklarından daha fazladır. Bu eğilim ise hücresel üretim koşullarında hazırlık süresinin parti işlem süresine oranının oldukça ufak olması nedeni ile gözlenmesi beklenen bir olgudur.

10. Genel olarak baz durum ile İSAY ve HSAY değerlerinin sabit tutulması durumundaki kural A uygulaması sonucu sağlanan her üç birincil performans ölçütünün değerlerinin YDS değişimi karşısındaki değişimi ve duyarlılığı kural B uygulamasına göre daha fazladır. Bu durumun nedeni ise kural A uygulamasının seçenek hücrenin aşırı yüklenmesini önlemek sureti ile daha iyi yük dengesi sağlayan karar kademelerine sahip olması ile açıklanabilir. Baz durumda ise dengesizliğin artması bu eğilime neden olmaktadır.

11. OİAS ve OPİSD grafiklerinin incelenmesinden anlaşıldığı üzere bu çalışmada elde edilen OPİSD ile OİAS değerleri arasında Little Kanununun ($L=\lambda \cdot W$) doğruluğunu destekleyen bir paralellik vardır.

12. OKDSO değerinin hesabına ait 5.16 ifadesinde iş akış sürelerinin terim olarak bulunmasına karşın OİAS ile OKDSO sonuçları arasında genel olarak OİAS ile OPİSD sonuçları arasındaki gibi tam bir paralellik yoktur ve kuralların OKDSO değerlerini küçültme (iyileştirme) etkisi daha azdır. Bu olgunun nedeni ise kuralların uygulanması durumunda uzman hücreden gelen partilerin seçenek hücrede işlenmesi sonucu özellikle orta ve yüksek İSAY ve/veya HSAY değerlerinde seçenek hücrenin daha fazla yüklenmeye başlaması ve dolayısı ile akış sürelerinin parti işlem sürelerinden daha hızlı artmasıdır.

13. Benzetim süresince makinaların durum değişenin zaman ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanan OSKO, uzman hücre OHKO ve seçenek hücre OHKO ikincil performans ölçütü sonuçları, genel üretim dinamiği çerçevesinde, birincil performans ölçütü sonuçları ile uyumludur.

14. Benzetim süresince sistemi terk eden tüm partiler üzerinden ortalama değer olarak hesaplanan OPTGS ile TGPA ikincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar yine aynı şekilde hesaplanan birincil performans ölçüleri sonuçları ile benzer eğilimlere sahiptir ve genel üretim dinamiği çerçevesinde uyumludur.

Sonuç olarak dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması tasarımı gereği uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip partinin seçenek hücrede üretilmesi durumundaki yeni seçenek hücre yükünün yeni uzman hücre yükünden daha düşük olmasını dikkate alan iyi bir yük dağılımı dengelenme mekanizmasına sahip bir kural olması sebebi ile bu mekanizmaya sahip olmayan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasından daha iyi ve etkin bir kural olmaktadır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.6).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma talep dağılımı veya ürün karışımı değişimi etkisindeki dışsal iş akışı esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinde seçenek iş akış hatlarına dayalı çizelgelemenin uygulanması durumundaki sistem performansı ile aynı koşullar altında seçenek iş akış hatları dikkate alınmadan çizelgelenen hücresel üretim sistemlerinin performansını ayrık olaylara dayalı benzetim tekniğini kullanarak karşılaştırmak sureti ile incelemektedir. Bu çalışmadaki "dışsal iş akışı esnekliği" ifadesi İngilizce'deki "external routing flexibility" ifadesi anlamında kullanılmıştır ve bu çalışmada özellikle, üçüncü bölümde açıklanmış olan, hücreler arası hareket esnekliği tipindeki dışsal iş akışı esnekliği uygulaması incelenmiştir.

Geniş anlamı ile esneklik değişen koşullara etkin bir şekilde cevap verebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Günümüzün rekabetçi ve dinamik ortamında faaliyet gösteren firmalar için üretim esnekliğine sahip olmak hayati derecede önemlidir ve bir hücresel sistemin başarılı olabilmesi için talep dağılımındaki dalgalanmalar karşısında yeterince esnek davranması ve uyum sağlaması gereklidir. Üretim sistemlerinin karmaşık yapısı nedeni ile üretim esnekliğinin tanımı, ölçülebilmesi ve yorumu oldukça zordur. Bu çalışma da hücresel üretimde dışsal iş akışı esnekliğinin incelemesi sureti ile zor ve karmaşık bir konu olan üretim esnekliği alanındaki araştırmalara önemli bir katkı sağlanmıştır.

Bu çalışmada hücreler arasındaki yük dengesizliği koşulunda faaliyet gösteren bir hücresel sistemin performans ölçütlerinde sağladığı iyileştirme bakımından iyi bir etkinlik derecesine sahip olduğu düşünülen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ve göreceli olarak daha kötü bir etkinlik derecesine sahip olduğu düşünülen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B olmak üzere iki adet kural tasarlanmıştır. Sistem performans ölçütlerini iyileştirme bakımından daha etkin olduğu düşünülen kural A, tasarımı gereği, uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip partinin seçenek hücrede üretilmesi durumundaki yeni seçenek hücre yükünün yeni uzman hücre yükünden daha düşük olmasını

dikkate alarak yük dağılımının dengelenmesine daha fazla önem veren bir kuraldır. Diğer yandan etkinliğinin daha az olduğu düşünülen kural B ise kural A uygulamasının sadece ön karar aşamalarındaki yapı olan seçenek hücrenin giriş kuyruğu ve ilk makinasında işlerin olmadığı her durum için bir seçim yapmasına karşın kural A uygulamasının son karar kademelerindeki yük dengesinin daha iyi bir şekilde korunmasına yönelik mekanizmayı kullanmamaktadır.

Diğer birçok hücresel üretim benzetim çalışmalarından farklı olarak, bu çalışmada hücresel üretim sisteminin sağladığı en önemli faydalar arasında olan paralel parti (veya parti bindirmeli) işleme uygulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada hücresel üretimde parti bindirmeli işleme ile makina yükleme yöntemi alanında yeni bir performans ölçütü olabileceği düşünülen ortalama katma değersiz süre oranı (OKDSO) tanımlanmış ve incelenmiştir. Ortalama katma değersiz süre oranı, partinin hücresel sistem içinde işlenmeden geçirdiği taşıma ve kuyruklarda bekleme süresinin bir ölçüsü olmaktadır ve israf olunan zaman ya da kaynak oranı olarak yorumlanabilir. Çalışmada geliştirilen hücresel sistem benzetim modellerinde makina yükleme tekniğinin uygulanmış olması ile birlikte bir hücredeki bir makina ve kuyruğunun boşalması durumunda aynı hücredeki bir önceki makinada bulunan bir partinin bu boş makinada hazırlığına hemen başlanılması sureti ile hücre yüklenmesi yöntemindeki hücre hazırlanması durumuna benzer bir taktiğin uygulanarak hazırlık için harcanan sürelerin en düşük düzeyde tutulabilmesinin sağlanmış olması ise bu çalışmanın hücresel üretim alanındaki birçok benzetim çalışmasından farklı bir diğer yönü olmaktadır.

Dışsal iş akışı esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A ve dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B nitel faktörlerinin hücresel üretim sistemlerinin performansını baz duruma göre iyileştirebilme yeteneğini değerlendirebilmek amacı ile bu çalışmada geliştirilen hücresel üretim sistemi benzetim modellerinin; yük dengesizlik seviyesi, işlem süresi artış yüzdesi ve hazırlık süresi artış yüzdesi nicel faktörlerinin tanımlanan seviyelerine göre gerçekleştirilen koşumlarının ana sonuçları olan ortalama iş akış süresi, ortalama proses içi stok düzeyi ve ortalama katma değersiz süre oranı birincil performans ölçütleri üzerinde tek taraflı eşleştirilmiş t testi ile istatistik analiz ve grafik yorum yapılmıştır. Benzetim modellerinin koşumlarının

diğer sonuçları olan ortalama sistem kullanım oranı, ortalama hücre kullanım oranları, ortalama parti teslim gecikme süresi ve teslimi geciken parti adedi ikincil performans ölçütleri için ise sadece grafik bakımdan değerlendirme yapılmıştır. Sonuç olarak çalışmadaki nicel faktörlerin seviyelerinin her bir kombinasyonu için kural A ile baz durum, kural B ile baz durum ve kural A ile Kural B uygulamaları sağladıkları birincil ve ikincil performans ölçütü değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulanması sureti ile her üç birincil performans ölçütü için baz duruma göre gerçekleştirilebilecek olan iyileşme işlem süresi artışı yüzdesi ile hazırlık artışı yüzdesi ve yük dengesizlik düzeyi nicel faktörleri seviyelerinin oluşturduğu oldukça geniş bir kombinasyon alanında olanaklı olmaktadır. Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının baz duruma ile karşılaştırılması halinde ise birincil performans ölçütleri bakımından elde edilen iyileşmesinin kombinasyon alanı kural A uygulamasının baz durum ile karşılaştırılması durumundaki iyileşme kombinasyon alanına göre oldukça ufaktır. Kural A ile Kural B uygulamalarının karşılaştırılması durumunda ise tüm kombinasyonları ile ifade edilen tüm üretim koşullarında Kural A uygulaması ile sağlanan performans ölçütü değerlerinin Kural B uygulaması ile sağlanan performans ölçütü değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile ve her yük dengesizliği seviyesinde kural A 'nın uygulanması durumunda kural B 'ye göre göreceli olarak daha yüksek işlem süresi artışı ve hazırlık süresi artışı yüzdelerinde performans iyileşmesi sağlanabilmektedir. Sonuç olarak dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması hücresel üretim sistemi performansını baz duruma göre iyileştirme bakımından dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasına göre çok daha iyi bir kural olmaktadır.

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulamasının kural B uygulamasına göre daha etkili olmasının nedeni ise aşağıdaki gibi açıklanabilir. Tasarımı gereği Kural A uzman hücre giriş kuyruğundaki partiler arasından seçilen en düşük parti işlem süresine sahip partinin seçenek hücrede üretilmesi durumundaki yeni seçenek hücre yükünün yeni uzman hücre yükünden daha düşük olmasını da dikkate alarak yük dağılımının dengelenmesine daha fazla önem veren bir kuraldır. Diğer yandan kural B ise kural A uygulamasının sadece ön karar aşamalarındaki yapı olan seçenek hücrenin giriş kuyruğu ile ilk makinasındaki işlerin olmadığı her durum için bir

seçim yapmasına karşın kural A uygulamasının son karar kademelerindeki yük dengesinin daha iyi bir şekilde korunmasına yönelik mekanizmayı kullanmaması nedeni ile kural A kadar etkili olamamaktadır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.6).

Dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması durumunda birincil performans ölçütleri bakımından baz duruma göre iyileşme sağlanan bölge hazırlık süresi ve işlem süresi artış yüzdesinin nispeten düşük veya orta büyüklükteki değerlerinin alanında bulunmakta olup yük dengesizlik seviyesinin artması ile birlikte performanslardaki iyileşmenin etki alanı gittikçe daha yüksek hazırlık ve işlem süresi artışı yüzdesi değerlerini kapsamaktadır. Yukarıdaki eğilim dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasının baz durum ile karşılaştırılması durumunda ise genel olarak işlem süresi artış yüzdesi değerlerinin sıfır veya oldukça küçük olduğu çok sınırlı bir alan içinde geçerlidir. Sonuçlarda gözlenen bu eğilimin nedeni ise uzman ve seçenek hücreler arasındaki yük dengesizliği arttıkça bu yük dengesizliğini gidermek amacı ile seçenek hücreye işlenmek üzere gönderilen uzman hücre partilerinin, daha yüksek hazırlık ve işlem süresi artış yüzdesi değerlerinde oluşan daha yüksek seçenek hücre hazırlık ve işlem sürelerine sahip olması durumunda bile seçenek hücrenin uzman hücre yükünün bir kısmını alarak işleyebilmesi sureti ile yük dengesizliğini giderebilme olanağının olabilmesidir.

Ayrıca dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının etkinlik derecelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ikincil performans ölçütleri benzetim sonuçlarının sadece grafik bakımdan irdelenmesi sureti ile (a) zaman ağırlıklı ortalama olarak hesaplanan OSKO, uzman hücre OHKO ve seçenek hücre OHKO ikincil performans ölçütü sonuçlarının, genel üretim dinamiği çerçevesinde, birincil performans ölçütü sonuçları ile uyumlu olduğu ve (b) sistemi terk eden tüm partiler üzerinden ortalama değer olarak hesaplanan OPTGS ve TGPA ikincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçların, aynı şekilde hesaplanan, birincil performans ölçüleri sonuçları ile benzer eğilimlere sahip ve uyumlu olduğu belirlenmiştir. Yani genel üretim dinamiği çerçevesinde ikincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar birincil performans ölçütleri için elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Sonuç olarak ikincil performans ölçütleri bakımından da dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A uygulaması dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı B uygulamasına göre genel olarak daha iyi sonuçlar sağlamaktadır. Bu durumun nedeni ise daha önce de

açıklandığı gibi kural A uygulamasının yapısındaki uzman ve seçenek hücreler arasındaki dengeyi daha iyi sağlayan karar kademeleridir.

Bu alanda daha önce yapılmış olan çalışmalarda talep dağılımı veya ürün karışımı değişimi etkisindeki dışsal iş akışı esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinin çizelgelenmesi konusunun özellikle bu çalışmadaki yaklaşım ve ayrıntılar bakımından incelenmemiş olması dolayısı ile bu çalışma karmaşık ve zor bir konu olan üretim esnekliği alanındaki araştırmalara önemli bir katkı sağlamaktadır. Hücresel üretimde esneklik alanında ileride yapılacak çalışmalar kapsamında değişik dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralları geliştirilebilir ve bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir. Önerilebilecek bazı değişik dışsal iş akışı esnekliğini kullanma uygulamaları ise aşağıda verilmiştir:

- Aşırı yüklü uzman hücrenin yükünün belirli yüzdelerinin daha az yüklü seçenek hücre yükünü aşması durumunu dikkate alan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının geliştirilmesi ve uygulanması.
- Aşırı yüklü uzman hücrenin yükünün belirli sınır (eşik) değerlerini aşması durumunu dikkate alan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının geliştirilmesi ve uygulanması.
- Uzman ve seçenek hücre yüklerinin gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi ile hesaplanan gelecekte oluşabilecek yük dengesizliğini önleme hedefine yönelik dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının geliştirilmesi ve uygulanması.
- Aynı partinin bir kısım işlemlerinin uzman hücrede ve diğer bir kısım işlemlerinin ise seçenek hücrede gerçekleştirilmesi sureti ile hücreler arası akış esnekliğinin uygulanması.

Ayrıca ileride yapılacak olan çalışmalarda uzman hücre ana (giriş) kuyruğundan dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarına göre seçilerek seçenek hücreye gönderilen partinin seçiminde aşağıdaki gibi değişik bazı seçim kuralları uygulanabilir:

- Uzman hücre ana kuyruğundaki en yüksek parti işlem süresine sahip partinin seçilmesi.
- Uzman hücre ana kuyruğundaki partiler arasından hazırlık süresinin parti işlem süresine oranı en düşük olan partinin seçilmesi.

- Uzman hücre ana kuyruğundaki partiler arasından hazırlık süresinin parti işlem süresine oranı en yüksek olan partinin seçilmesi.
- Parti teslim süreleri veya gecikme maliyetlerine göre belirlenen bazı kıstaslara göre uzman hücre ana kuyruğundan uygun bir partinin seçilmesi.
- Proses içi stok maliyetine göre tanımlanan bazı kıstasları dikkate alarak uzman hücre ana kuyruğundaki uygun bir partinin seçilmesi.

Bu çalışmada geliştirilen benzetim programları farklı kuyruk sıralama kuralarının kullanılmasına olanak verecek şekilde tasarlanmış olmakla birlikte çalışmanın kapsamının sınırlı tutulabilmesi bakımından hücre girişlerindeki kuyruklarda ile hücre içindeki makina kuyruklarında bekleyen parti ve parçaların işlenme sırası için ilk gelen önce (İGÖ) kuyruk sıralama kuralı uygulanmıştır. Dolayısı ile bu çalışmanın kapsamını genişletmek üzere hücre ana kuyrukları ile makina kuyrukları için farklı kuyruk sıralama kurallarının uygulanmasının sonuçlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi konusunda çalışmalar yapılması önerilebilir.

Çalışmadaki hücresel üretim sistemlerinde partilerin sistem içinde ilerleme ve hücrelerin yüklenme mekanizması hücrenin ilk makinasında işlenmekte olan ve hücrenin ilk makina kuyruğunda bekleyen hiçbir partinin bulunmaması durumunda hücre ana giriş kuyruğuna gönderilen çekme sinyalleri sureti ile sağlandığı için geliştirilen hücresel sistem modellerinin çalışma mekanizmaları çekme tipi sistemler olan tam zamanında üretim veya kanban sistemlerinin çalışma mekanizmalarına benzemektedir (Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7). Hücrelerin yukarıda açıklanan işleyiş tarzı aynı zamanda yüke göre iş gönderme yönteminin yapısı ile de benzerlik arz etmektedir. Dolayısı ile yapılacak yeni çalışmalar da talep dengesizliğinin neden olduğu yük dengesizliği koşulunda faaliyet gösteren bir hücresel sisteme gelen iş yükünün haftalık, aylık gibi belirli dönemler içinde itme sistemi yapısındaki malzeme ihtiyaç planlaması yöntemine göre üretimin planlanması sureti ile hücrelere dengeli olarak dağıtılmasını sağlayan esneklik stratejilerinin benzetim tekniği kullanılarak incelenmesi faydalı olacaktır.

Özellikle hücresel üretim sistemlerinin kurulması aşamasında hücrelerin dışsal iş akışı esnekliğine sahip olacak tarzda tasarlanmasının, zaman içinde oluşabilecek ürün talep dağılımı (veya çeşitliği) değişimleri sonucu oluşan sistem performansındaki kötüleşmenin ve oluşabilecek verimsizliklerin giderilebilmesi

bakımından, stratejik derecede önemli olduğu bu çalışmadaki sonuçlar tarafından açıkça belirlenmiştir. Hücresel üretimde dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kurallarının uygulanması sürecinde uygun mühendislik çalışmaları yapılmak sureti ile işlem süresi artış yüzdesi ve hazırlık süresi artış yüzdesi değerlerinin düşürülmesi ve eğer olanaklı ise bu değerlerin sıfıra yakın (veya negatif) düzeylere çekilebilmesi durumunda sistem performans değerlerinde daha da fazla iyileşme sağlanacağı özellikle dikkate alınmalıdır. Ayrıca hücresel üretim sistemlerinin ekonomik ve teknolojik zorunluluklar nedeni ile yenilenmesi aşamasında faaliyetleri kademeli olarak durdurulan hücrelerde üretilen parça ailelerine ait işlerin üretiminin olanaklar dahilinde aksamadan devam edebilmesi bakımından dışsal iş akışı esnekliğinin kullanılarak seçenek hücrelerde üretilmesi seçeneğinin değerlendirilmesi için sistem performansındaki değişimi yönü ile derecesinin belirlenmesinde bu çalışmadaki sonuçların dikkate alınması ve eğer olanaklı ise mevcut hücresel sistemin benzetim modelinin oluşturularak gerçek zamanlı (İng: realtime veya on line) benzetim koşumları ile sisteme özel dışsal iş akışı esnekliğini kullanma seçeneklerinin değerlendirilmesi oldukça faydalı olacaktır. Yük dengesizliği koşullarında faaliyet gösteren hücresel üretim sistemlerinde üretiminin planlanması aşamasında gerçek sisteme ait benzetim programının geliştirilmesi ve koşulması sureti ile performans ölçütleri arasındaki dengeyi ve performans ölçütlerinin iyileşmesini sağlayacak tarzda yüklerin hücrelere dağıtımının çizelgelenmesinin önemi bu çalışmada elde edilen sonuçlardan açıkça anlaşılmaktadır.

Günümüz ağır rekabet koşulları altında faaliyet gösteren ve hücresel üretimi uygulamakta olan firmaların hızla değişen müşteri tercihleri nedeni ile talep dalgalanmaları etkisinde kalması kaçınılmazdır. Sonuç olarak hücresel üretimi uygulamayı planlayan veya uygulamakta olan firmaların hücresel üretim sistemlerinin dışsal iş akışı esnekliğine sahip olmasına özellikle önem vermesi ve zaman içinde oluşabilecek yük dengesizliklerinin neden olabileceği performans kötüleşmesini ise bu çalışmada geliştirilen dışsal iş akışı esnekliğini kullanma kuralı A' ya benzer taktikleri uygulamak sureti ile gidermeleri önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Schonberger, R. J.,** 1982, Japanese Manufacturing Techniques: Nine Hidden Lessons in Simplicity, *The Free Press, New York.*

[2] **Wemmerlov, U., Hyer, N. L.,** 1989, Cellular Manufacturing in the US Industry: A Survey of Users, *International Journal of Production Research*, Vol.27, No.9, 1511-1530.

[3] **Hyer, N. L., Wemmerlov, U.,** 1982, MRP/GT A Framework for Production Planning and Control of Cellular Manufacturing, *Decision Sciences*, 13, 681-670.

[4] **Askin, R. G., Standrige, C. R.,** 1993, Modelling and Analysis of Manufacturing Systems, John Wiley & Sons, Inc. Singapore.

[5] **Singh, N., Rajamani, D.,** 1996, Cellular Manufacturing Systems; Design, Planning and Control, Chapman & Hall.

[6] **Snead, C. S.,** 1989, Group Technology: Foundation for Competitive Manufacturing, Van Nostrand Reinhold, New York.

[7] **Gallagher, C. C., Knight, W. A.,** 1986, Group Technology Production Methods in Manufacture, John Wiley and Sons, New York.

[8] **Hyer, N. L.,** 1984, The Potential of Group Technology for US Manufacturing, *Journal of Operations Management*, Vol.4, No.3, 183-201.

[9] **Wagner, H. M,** 1980, Research Portfolio for Inventory Management and Production Planning Systems, *Operations Research*, Vol.28, No.3, Part 1, 445-475.

[10] **Mosier, C., Taube, L.,** 1985, The Facets of Group Technology and Their Impacts on Implementations: A State-of-the-Art Survey, *OMEGA : International Journal of Management Science*, Vol.13, No.5, 381-391.

[11] **Wemmerlov, U., Hyer, N. L.,** 1987, Research Issues in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Resesarch*, Vol. 25, No. 3, 413-431.

[12] **Sassani, F.,** 1990, A Simulation Study on Performance Improvement of Group Technology Cells, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.2, 293-300.

[13] **Dahel, N. E., Smith, S. B.,** 1993, Designing Flexibility into Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 31 No. 4, 933-945.

[14] **Irani, S. A., Cavalier, T. M., Cohen P. H.,** 1993, Virtual Manufacturing Cells: Exploiting Layout Design and Intercell Flows for the Machine Sharing Problem, *International Journal of Production Research*, 31(4), 791-810.

[15] **Wemmerlov, U., Hyer, N. L.,** 1986, Procedures for the Part Family / Machine Group Identification Problem in Cellular Manufacturing, *Journal of Operations Management*, Vol..6, No. 2, 125-147.

[16] **Kang, S. L., Wemmerlov, U.,** 1993, A Work load-Oriented Heuristic Methodolgy for Manufacturing Cell Formation Allowing Reallocation of Operations, *European Journal of Operational research*, Vol. 69, 292-311.

[17] **Black, J. T.,** 1991, The Design of The Factory with a Future, McGraw-Hill, Inc.

[18] **Groover, M. P.,** 1987, Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing, Prentice-Hall, Inc..

[19] **Samson, D.,** 1991, Manufacturing and Operations Strategy, Prentice Hall.

[20] **Amstead, B. H., Ostwald, P. F., Begeman, M. L.,** 1987, Manufacturing Processes, John Wiley & Sons.

[21] **Tompkins, J. A., White, J. A.,** 1984, Facilities Planning, John Wiley & Sons Inc.,New York.

[22] **Jones, B.,** 1997, Forcing the Factory of the Future: Cybernation and Societal Institutions, Cambridge University Press.

[23] **Narasimhan, S. L., McLeavey, D. W., Billington, P. J.,** 1995, Production Planning and Inventory Control, Prentice-Hall International, Inc.

[24] **Cheng, T. C. E., Podolsky, S., Jarvis, P.,** 1996, Just-in-Time Manufacturing: An Introduction, Chapman & Hall.

[25] **Dilworth, J. B.,** 1992, Operations Management: Design, Planning and Control for Manufacturing and Services, McGraw-Hill, Inc.

[26] **Rehg, J. A.,** 1994, Computer-Integrated Manufacturing, Prentice-Hall, Inc.

[27] **Cohen, M. A., Apte, U. M.,** 1997, Manufacturing Automation, McGraw-Hill.

[28] **Ham, I., Hitomi, K., Yoshida, T.,** 1985, Group Technology: Applications to Production Management, Kluwer-Nijhoff Publishing, Hingham MA.

[29] **Hitomi, K.,** 1996, Manufacturing Systems Engineering: a Unified Approach to Manufacturing Technology, Production Management and Industrial Economics, Taylor and Francis Ltd., 2nd ed., London.

[30] **Schonberger, R. J.,** 1987, Frugal Manufacturing, *Harward Business Review*, Vol.65, No.5, 95-100.

[31] **Tempelmeier, H., Kuhn, H.,** 1993, Flexible Manufacturing Systems: Decision Support for Design and Operation, Wiley, New York.

[32] **Kekre, S.,** 1987, Performance of a Manufacturing Cell with Increased Product Mix, *IIE Transactions*, 19(3), 329-339.

[33] **Shunk, Dan L.,** 1985, Group Technology Provides Organized Approach to Realizing Benefits of CIMS, *Industrial Engineering*, 17(4), 74-80.

[34] **Steudel, H. J., Desruelle, P.,** 1992, Manufacturing in the Nineties: How to Become Mean, Lean, World-Class Competitor, Van Nostrand Reinhold, New York.

[35] **Hyer. N. L., Wemmerlov, U.,** 1989, Group Technolgy in the US Manufacturing Industry: A Survey of Current Practices, *International Journal of Production Research*, Vol.27. No.8, 1287-1304.

[36] **Abou-Zeid, M. R.,** 1975, Group Technology, *Industrial Engineering*, 7(5), 32-39.

[37] **Burbidge, J. L.,** 1992, Change to Group Technology: Process Organization is Obsolete, *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.5, 1209-1220.

[38] **Burbidge, J. L.,** 1982, The Simplification of Material Flow Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.3, 339-347.

[39] **Greene, T. J., Sadowski, R. P.,** 1984, A Review Of Cellular Manufacturing Assumptions, Advantages and Design Techniques, *Journal of Operations Management*, Vol.4, No.2, 85-97.

[40] **Vakharia, A.J., Wemmerlov, U.,** 1990, Designing a Cellular Manufacturing System: A Materials Flow Approach Based on Operation Sequences, *IIE Transactions*, Vol.22, No.1, 84-97.

[41] **Gaither, N.,** 1992, Production and Operations Management, The Dryden Press.

[42] **Gaither, N., Frazier, G. V., Wei, J. C.,** 1990, From Job Shops to Manufacturing Cells, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 31, No. 4., 33-36.

[43] **Kusiak, A., Heragu, S. S.,** 1987, The Facility Layout Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol.29, 229-251.

[44] **Burbidge, J. L.,** 1973, AIDA and Group Technology, *International Journal of Production Research*, Vol.11, No.,4, 315-324.

[45] **Burbidge, J. L.,** 1988, Operation Scheduling with GT and PBC, *International Journal of Production Research*, Vol.26, No.3, 429-442.

[46] **Opitz, H., Wiendahl, H. P.,** 1971, Group Technology and Manufacturing Systems for Small and Medium Quantity Production, *International Journal of Production Research,* 9(1), 181-203.

[47] **Fazakerly, G. M.,** 1976, A Research Report on the Human Aspects of Group Technology and Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, Vol.11, No.1, 123-134.

[48] **Leonard, R., Rathmill, K.,** 1977, The Group Technology Myths, *Management Today*, 66-69.

[49] **Gupta, R. M., Tompkins, J. A.,** 1982, An Examination of the Dynamic Behaviour of Part Families in Group Technology, *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.1, 73-86.

[50] **Wei, J. C., Gaither, N.,** 1990, An Optimal Model for Cell Formation Decisions, *Decision Sciences*, Vol. 21, No. 2, 416-433.

[51] **Kusiak, A., Chow, W. S.,** 1987, Efficient Solving of the Group Technology Problem, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, No.2, 117-124.

[52] **King, J. R., Nakornchai, V.,** 1982, Machine-Component Group Formation in Group Technology-Review and Extension. *International Journal of Production Research.* Vol.20, No. 2, 117-133.

[53] **King, J. R.,** 1980, Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis: An Approach using a Rank Order Clustering Algoritm, *International Journal of Production Research,* Vol.18, No.2, 213-232.

[54] **Chan, H. M., Milner, D. A.,** 1982, Direct Clustering Algorithm for Group Formation in Cellular Manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.1, No.1, 65-74.

[55] **McCormick, W. T. Jr, Schweitzer, P. J., White, T. W.,** 1972, Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique, *Operations Research*, Vol. 20, 993-1009.

[56] **Carrie, A. S.,** 1973, Numerical Taxonomy Applied to Group Technology and Plant Layout, *International Journal of Production Research*, Vol.11, No. 4, 399-416.

[57] **Seifoddini, H., Wolfe, P. M.,** 1986, Application of the Similarity Coefficient Method in Group Technology, *IIE Transactions*, Vol.18, No.3, 271-277.

[58] **Seifoddini, H.,** 1988, Comparison Between Single Linkage and Average Linkage Clustering in Forming Machine Cells, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 15, No. 1-4, 210-216.

[59] **Rjagopalan, R., Batra, J.,** 1975, Design of Cellular Production Systems, A Graph Theoritic Approach, *International Journal of Production Research*, Vol.13, No.6, 567-579.

[60] **Chandrasekharan, M. P., Rajagopalan, R.,** 1986, MODROC: An Extension of Rank Order Clustering for Group Technology, *International Journal of Production Research*, Vol. 24, No. 5, 1221-1233.

[61] **Chandrasekharan, M. P., Rajagopalan, K.,** 1989, GROUPABILITY: An Analysis of the Properties of Binary Data for Group Technology, *International Journal of Production Research*, Vol. 27, 1035-1052.

[62] **Chandrasekharan, M. P., Rajagopalan, K.,** 1987, ZODIAC - An Algorithm for Concurrent Formation of Part Familes and Machine Cells, *International Journal of Production Research*, Vol.25, 835-850.

[63] **Chandrasekharan, M. P., Rajagopalan, R.,** 1986, An Ideal Seed Non-hierarchical Clustering Algorithm for CellularManufacturing, *International Journal of Production Research.* Vol.24, 451-464.

[64] **Vannelli, A., Kumar, K. R.,** 1986, A Method for Finding Minimal Bottle-Neck Cells for Grouping Part-Machine Families, *International Journal of Production Research*, 24(2), 387-400.

[65] **Purcheck, G.F.,** 1985, Machine-Component Group Formation: A Heuristic Method for Flexible Production Cells and Flexible Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, 23(5), 911-943.

[66] **Kumar K.R., Kusiak, A.,** 1986, Vannelli, Grouping of Parts and Components in Flexible Manufacturing Systems, *European Journal of Operational Research*, Vol.24, 387- 397.

[67] **Kusiak, A.,** 1987, The Generalized Group Technology Concept, *International Journal of Production Research*, Vol. 25, Nov. 4, 561-569.

[68] **Rajamani, D., Singh, N., Aneja, Y. P.**, 1992, A Model for Cell Formation in Manufacturing Systems with Sequence Dependence, *International Journal of Production Research,* Vol. 30, No. 6, 1227-1235.

[69] **Adil, G. K., Rajamani, D., Strong, D.,** 1993, A Mathematical Model for Cell Formation Considering Investment and Operational Costs, *European Journal of Operational Research*, Vol. 69, No. 3, 330-341.

[70] **Askin, R. G., Subramanian, S. P.,** 1987, A Cost-Based Heuristic for Group Technology Configuration, *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 2, 101-113.

[71] **DeWitte, J.,** 1980, The Use of Similarity Coefficents in Production Flow Analysis, *International Journal of Production Research*, Vol.18, No. 4, 503-514.

[72] **Seifoddini, H.,** 1990, A Probabilistik Model for Machine Cell Formation, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 9, No.1, 69-75.

[73] **Mosier , C., Taube, L.,** 1985, Weighted Similarity Measure Heuristics for the Group Technology Machine Clustering Problem, *OMEGA : International Journal of Management Science*, Vol. 13, No.6, 577-583.

[74] **Waghodekar, P. H., Sahu, S.,** 1984, Machine-Component Cell Formation in Group Technology: MACE, *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 6, 937-948.

[75] **Balasubramanian, K. N., Pannerselvam, R.,** 1993, Covering Technique Based Algorithm for Machine Grouping to Form Manufacturing Cells, *International Journal of Production Research*, 31(6), 1479-1504.

[76] **Chakravarty, A. K., Shtub, A.,** 1984, An Integrated Layout for Group Technology with in-process Inventory Costs, *International Journal of Production Research*, 22(3), 431-442.

[77] **Damodaran, V., Lashkari, R. S., Singh, N.,** 1992, A Production Planning Model for Cellular Manufacturing Systems with Refixturing Considerations, *International Journal of Production Research*, 30(7), 1603-1615.

[78] **Sankaran, S., Kasilingam, R. G.,** 1993, On Cell Size and Machine Requirements Planning in Group Technology Systems, *European Journal of Operational Research*, 69(3), 373-383.

[79] **Han, C., Ham, I.,** 1986, Multiobjective Cluster Analysis for Part Family Formations, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.5, No.4, 223-230.

[80] **Rajamani, D., Singh, N., Aneja, Y. P.,** 1992, Selection of Parts and Machines for Cellularization: A Mathematical Programming Approach, *European Journal of Operational Research*, Vol. 62, No. 1, 47-54.

[81] **Ballakur, A., Steudel, H. J.,** 1987, A Within-Cell Utilization Based Heuristic for Designing Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.25, No.5, 639-665.

[82] **Choobineh, F.,** 1988, A Framework for the Design of Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.25, No7, 1161-1172.

[83] **Co, H. C., Araar, A.,** 1988, Configuring Cellular Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.26, No.9, 1511-1522.

[84] **Akin, R. G., Chiu, K. S.,** 1990, A Graph Partitioning Procedure for Machine Assignment and Cell Formation in Group Technology, *International Journal of Production Research*, 28(8), 1555-1572.

[85] **Dumolien, W. J., Santen,W. D.,** 1983, Cellular Manufacturing Becomes Philosophy of Management at Components Facility, *Industrial Engineering*, November.

[86] **Knight, D. O., Wall, M. L.,** 1989, Using Group Technology for Improving Communication and Coordination Among Teams of Workers in Manufacturing Cells, *Industrial Engineering*, Vol.21, No.1, 28-34.

[87] **Welke, H. A., Overbreeke, J.,** 1988, Cellular Manufacturing: A Good Technique for Implementing Just-in-Time and Total Quality Control, *Industrial Engineering*, Vol.20, No.11, 36-41.

[88] **Flynn, B. B., Jacobs, F. R.,** 1986, A Simulation Comparison of Group Technology with Traditional Job Shop Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 24(5), 1171-1192.

[89] **Flynn, B. B., Jacobs, F. R.,** 1987, An Experimental Comparison of Cellular (Group Technology) Layout with Process Layout, *Decision Sciences*, 18, 562-581.

[90] **Flynn, B. B.,** 1987, The Effects of Setup Time on Output Capacity in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 25(12), 1761-1772.

[91] **Durmuşoğlu, B. M.,** 1993, Analysis of The Conversion from A Job Shop System to A Cellular Manufacturing System, *International Journal of Production Economics*, Vol. 30-31, 427-436.

[92] **Shafer, S., Meredith, J.,** 1990, A Comparison of Selected Manufacturıng Cell Formation Techniques, *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No 4, 661-673.

[93] **Morris, J. S., Tersine, R.. J.,** 1990, A Simulation Analysis of Factors Influencing the Attractiveness of Group Technology Cellular Layouts, *Management Science*, 36(12), 1567-1578.

[94] **Pegden, C. D., Shannon, R. E., Sadowski R. P.,** 1990, Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill, Inc.

[95] **Slack, N.,** 1987, The Flexibility of Manufacturing Systems, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.7, No.4, 35-45.

[96] **Slack, N.,** 1987, Manufacturing Systems Flexibility: Ten Emprical Observations, *Oxford Centre for Management Studies, Management research papers - 87/9.*

[97] **Gerwin, D.,** 1987, An Agenda for Research on the Flexibility of Manufacturing Processes, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.7, No.1, 38-49.

[98] **Jaikumar, R.,** 1986, Postindustrial Manufacturing, *Harward Business Review*, Vol.64, No. 69-76.

[99] **Zelenovic, D. M.,** 1982, Flexibility: A Condition for Effective Production Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.3, 319-337.

[100] **Gerwin, D.,** 1982, Do's and Don't's of Computerised Manufacture, *Harvard Business Review*, March-April.

[101] **Slack, N.,** 1983, Flexibility as a Manufacturing Objective, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.3, No.3, 4-13.

[102] **Sethi, A. K., Sethi, S. P.,** 1990, Flexibility in Manufacturing: A Survey, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol.2, 289-329.

[103] **Wheelwright, S. C.,** 1981, Japan-Where Operations Really are Strategic, *Harward Business Review*, Vol.59, 67-74.

[104] **Golhard, J. D., Jelinek, M.,** 1983, Plan for Economies of Scope, *Harward Business Review*, Vol.61, 141-148.

[105] **Gustavsson, S. O.,** 1984, Flexibility and Productivity in Complex Production Processes, *International Journal of Production Research*, Vol.22, No.5, 801- 808.

[106] **Brill, P. H., Mandelbaum, M.,** 1989, On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.27, No.5, 747-756.

[107] **Brill, P. H., Mandelbaum, M.,** 1990, Measurement of Adaptivity and Flexibility in Production Systems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 49, 325-332.

[108] **Mandelbaum, M., Brill, P. H.,** 1989, Examples of Measurement of Flexibility and Adaptivity in Manufacturing Systems, *Journal of Operational Research Society*, Vol.40, No.6, 603 - 609.

[109] **Son, Y. K., Park, C. S.,** 1987, Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, No.3, 193-207.

[110] **Son, Y. K., Park, C. S.,** 1990, Quantifying Opportunity Costs Associated with Adding Manufacturing Flexibility, *International Journal of Production Research.* Vol.28, No.6, 1183-1194.

[111] **Das, S. R., Khumawala, B. M.,** 1989, Flexible Manufacturing Systems: A Production Management Perspective, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 30, No. 2, 63-67.

[112] **Gupta, Y. P., Goyal, S.,** 1989, Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements, *European Journal of Operational Research*, Vol.43, 119-135.

[113] **Webster, D. B., Tyberghein, M. B.,** 1980, Measuring Flexibility of Job-Shop Layouts, *International Journal of Production Research*, Vol.18, No.1, 21-29.

[114] **Gupta, Y. P., Somers, T. M.,** 1992, The Measurement of Manufacturing Flexibility, *European Journal of Operational Research*, Vol. 60, 166-182.

[115] **Dixon, J. R.,** 1992, Measuring Manufacturing Flexibility: An Emprical Investigation, *European Journal of Operational Research*, Vol. 60, 131-143.

[116] **Gupta, D,** 1993, On Measurement and Valuation of Manufacturing Fexibility, *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 12, 2947-2958.

[117] **Chandra, P., Tombak, M. M.,** 1992, Models for the Evaluation of Routing and Machine Flexibility, *European Journal of Operational research*, Vol. 60, 156-165.

[118] **Taymaz, E.,** 1989, Types of Flexibility in a Single Machine Production System, *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 11, 1891-1899.

[119] **Benjaafar, S.,** 1994, Models for Performance Evaluation of Flexibility in Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 6, 1383-1402.

[120] **Son, Y. K.,** 1994, Linear-Programming-Based Productivity and Business Strategy Analyses in the Factory Automation Era, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 2, 443-455.

[121] **Laengle, K., Griffin, P. M., Griffin, S. O.,** 1994, A Quantification of the Economic Value of Flexible Capacity, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 6, 1421-1430.

[122] **Tilsley, R., Lewis, F. A.,** 1977, Flexible Cell Production Systems - A Realistic Approach, *Annals of the CIRP*, Vol. 25, No.1, 269-271.

[123] **Rajamani, D., Singh, N., Aneja, Y. P.,** 1990, Integrated Design of Cellular Manufacturing Systems in the Presence of Alternate Process Plans, *International Journal of Production Research*, 28(8), 1541-1554.

[124] **Harhalakis, G. R., Nagi, R., Proth, J. M.,** 1990, An Efficient Heuristic in Manufacturing Cell Formation for Group Technology Applications, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.1.

[125] **Wei, J. C.,** 1992, A Note on " Change to Group Technology ", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 5, 1221-1222.

[126] **Ang, C. P., Willey, P. C. T.,** 1984, A Comparative Study of the Performance of Pure and Hybrid Group Technology Manufacturing Systems Using Computer Simulation Techniques, *International Journal of Production Research*, Vol.22, No.2, 193-233.

[127] **Garza, O., Smunt T. L.,** 1992, Countering the Negative Impact of Intercell Flow in Cellular Manufacturing, *Journal of Operations Management*, 10(1), 92-118.

[128] **Garza, O., Smunt T. L.,** 1995, Reducing Flow Between Manufacturing Cells: A Sensitivity Analysis, *International Journal of Production Research*, 32(9), 2131-2147.

[129] **Gupta, T., Seifoddini, H.,** 1990, Production Data Based Similarity Coefficient for Machine-Component Grouping Desicions in the Design of a Cellular Manufacturing System, *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 7, 1247-1269.

[130] **Sinha, R. K., Hollier, R. H.,** 1984, A Review of Production Control Problems in Cellular Manufacture, *International Journal of Production Research*, 22(5), 773-789.

[131] **Bitran, G. R., Hax, A. C.,** 1977, On the Design of Hierarchical Production Planning systems, *Decision Sciences*, Vol.8, 28-55.

[132] **Masud, A. S. M., Hwang, C. L.,** 1980, An Aggregate Production Planning Model and Application of Three Multiple Objective Function Decision Methods, *International Journal of Production and Research*, 8(6).

[133] **Orlicky, J.,** 1975, Material Requirements Planning, McGraw Hill, New York.

[134] **Orlicky, J.,** 1994, Orlicky's Materials Requirements Planning, McGraw-Hill.

[135] **Berry, W. L., Vollmann, T. E., Whybark D. C.,** 1991, Master Production Scheduling: Principles and Practice, *American Production and Inventory Control Society.*

[136] **Sato, N., Iqnizio, J. P., Ham, I.,** 1978, Group Tecnology and Materials Requirements Planning: An Integrated Methodology for Production Control *Annals of the CIRP*, Vol. 27, No. 1, 471-473.

[137] **Graves, S. C.,** 1981, A Review of Production Scheduling, *Operations Research*, Vol. 29, No.4, 646-675.

[138] **Baker, K. R.,** 1974, Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, New York.

[139] **Gupta, J. N. D.,** 1971, M-Stage Scheduling Problem - A Critical Appraisal, *International Journal of Production Research*, Vol.9, No.2, 267-281.

[140] **Lageweg, B. J., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. B.,** 1977, Job-Shop Scheduling by Implicit Enumeration, *Management Science*, Vol.24, No.4, 441- 450.

[141] **Day, J. E., Hottenstein, M. P.,** 1970, Review of Sequencing Research, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.17, No.1, 11-40.

[142] **Panwalker, S. S., Iskander, W. A.,** 1977, A Survey of Scheduling Rules, *Operations Research*, Vol.25, No.1, 45-61.

[143] **Johnson, S. M.,** 1959, Discussion: Sequencing n Jobs on Two Machines with Arbitrary Time Lags, *Management Science*, Vol.5, No.3, 299-303.

[144] **Blackstone, J. H., Phillips, D. T., Hogg; G. L,** 1982, A State-of-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations, *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.1, 27-43.

[145] **Baker, K. B.,** 1984, Sequencing Rules and Due Date Assignments in a Job Shop, *Manegament Science*, Vol.30, No.9, 1093-1104.

[146] **Morris, J. S., Tersine, R. J.,** 1989, A Comparison of Cell Loading Practices in Group Technology, *Journal of Operations Management*, 2(4), 299-313.

[147] **Hitomi, K., Ham, I.,** 1977, Machine Loading for Group Technology Applications, *Annals of the CIRP*, Vol. 25, No. 1, 279-281.

[148] **Hitomi, K., Ham, I.,** 1978, Machine Loading and Product-Mix Analysis for Group Technology, *Transactions of the ASME:Journal of Engineering for Industry*, Vol. 100, 370-374.

[149] **Foo, F. C., Wager, J. G.,** 1983, Set-up Times in Cyclic and Acyclic Group Technology Scheduling Systems, *International Journal of Production Research*, Vol.21, No. 1, 63-73.

[150] **Kuo, H., Inman, R. R.,** 1990, A Practical Heuristic for the Group Technology Economic Lot Scheduling Problem, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.4, 709-722.

[151] **Ashour, S., Moore, T. E., Chiu, K. Y.,** 1974, An Implicit Enumeration Algorithm for the Nonpreemptive Shop Scheduling Problem, *AIIE Transactions*, Vol.6, No.1, 62-72.

[152] **Gupta, J. N. D.,** 1969, A General Algorithm for the n×m Flow Shop Scheduling Problem, *International Journal of Production Research*, Vol. 7, No.3, 241-247.

[153] **Bansal, S. P.,** 1977, Minimizing the Sum of Completion Times on n Jobs Over m Machines in a Flow Shop - A Branch and Bound Approach, *AIIE Transactions*, Vol. 9, No. 3, 306-311.

[154] **Ingall, E., Schrage, L.,** 1963, Applications of Branch-and-Bound Techniques to Some Flow Shop Scheduling Problems, *Operations Research*, Vol.13, 400-412.

[155] **Smith, R. A., Dodek, R. A.,** 1967, A General Algorithm for Solution at n Jobs m Machines Sequencing Problems of the Flow - Shop, *Operations Research*, Vol. 15, No. 1, 71-82.

[156] **Hitomi, K., Ham, I.,** 1977, Group Scheduling Technique for Multiproduct, Multistage Manufacturing Systems, *Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry*, 759-765, August.

[157] **Ham, I., Hitomi, K., Nakamura, N., Yoshida, T.,** 1979, Optimal Group Scheduling and Machining Speed Decision under Due-Date costraints, *Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry*, Vol. 101, 123-134.

[158] **Hitomi, K., Ham, I.,** 1982, Product Mix and Machine Loading Analysis of Multistage Production Systems for Group Technology, *Transactions of the ASME:Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104, 363-368.

[159] **Park, Y. B., Pegden, C. D., Enscore, E. E.,** 1984, A Survey and Evaluation of Static Flowshop Heuristics, *International Journal of Production Research*, Vol.22, No.1, 127-141.

[160] **Nawaz, M., Enscore, E. E., Ham, I.,** 1983, A Heuristic Algorithm for the m-Machine, n-Job Flow-shop Sequencing Problem, *OMEGA :International Journal of Management Science*, vol.11, No.1, 91-95.

[161] **Gelders, L. F., Sambanbdam, N.,** 1978, Four Simple Heuristics for Scheduling a Flow-Shop, *International Journal of Production Research*, Vol.16, No. 3, 221-231.

[162] **Dannembring, D. G.,** 1977, An Evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics, *Management Science*, Vol.23, No.11, 1174-1182.

[163] **Chan, D., Bedworth, D. D.,** 1990, Design of a Scheduling System for Flexible Manufacturing Cells, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.11, 2037-2049.

[164] **Park, T., Steudel, H.,** 1991, A Model for Determining Job Throughput Times for Manufacturing Flow Line Workcells with Finite Buffers, *International Journal of Production Research*, Vol.29, No.10, 2025-2041.

[165] **Vaithianathan, R., McRoberts, K. L.,** 1982, On Scheduling in a GT Environment, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 2, 149-155.

[166] **Mahmoodi, F., Dooley, K. J., Starr, P. J.,** 1990, An Investigation of Dynamic Group Scheduling Heuristics in a Job Shop Manufacturing Cell, *International Journal of Production Research*, 28(9), 1695-1711.

[167] **Mahmoodi, F., Dooley, K. J., Starr, P. J.,** 1990, An Evaluation of Order Releasing and Due Date Assignment Heuristics in a Cellular Manufacturing system, *Journal of Operations Management*, Vol. 9, No. 4.

[168] **Mahmoodi, F., Dooley, K. J.,** 1991, A Comparison of Exhaustive and Non-exhaustive Group Scheduling Heuristics in a Manufacturing Cell, *International Journal of Production Research*, 29(9), 1923-1939.

[169] **Mosier, C. T., Elvers, D. A., Kelly, D.,** 1984, Analysis of Group Technology Scheduling Heuristics, *International Journal of Production Research*, 22(5), 857-875.

[170] **Flynn, B. B.,** 1987, Repetitive Lots: The Use of a Sequence Dependent Scheduling Procedure in Group Technology and Traditional Shops, *Journal of Operation Management*, 7(2), 203-216.

[171] **Jacobs, F. R., Bragg, D. J.,** 1988, Repetitive Lots: Flow-Time Reductions Through Sequencing and Dynamic Batch Sizing, *Decision Sciences*, 19, 281-294.

[172] **Yenersoy, G.,** 1990, Malzeme Yönetim Sistemleri, Ma-Pa Yayınları, İstanbul.

[173] **Soysal, A.,** 1989, İmalat Kaynakları Planlaması, *Yöneylem Araştırması Bildiriler'89*, Bilkent Üniversitesi, Ankara.

[174] **Ulusoy, G.,** 1991, Bilgisayar Destekli Üretim Planlama ve Kontrol, CIM Bilgisayar Tümleşik Üretim Seminer Notları, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, 21-25 Ocak, İstanbul.

[175] **Tanyaş, M.,** 1992, Bilgisayar Destekli Üretim Planlama ve Kontrol Semineri, *Milli Produktivite Merkezi Seminer Notları*, İstanbul.

[176] **Dinçmen, M.,** 1984, Atölye Tipi Üretimde Benzetim, *Yöneylem Araştırması 9. Ulusal Kongresi*

[177] **Kaylan, A. R.,** 1991, Yöneticilerin Etkin Bir Karar Destek Aracı: Benzetim Modelleme, *Bilgisayar Magazin*, s. 44-48, Temmuz.

[178] **Hutchinson, G. K., Pflughoeft, K. A.,** 1994, Flexible Process Plans: Their Value in Flexible Automation Systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 3, 707-719.

[179] **Seifoddini, H.,** 1989, A Note on the Similarity Coefficient Method and the Problem of Improper Machine Assignment in Group Technology Applications, *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 7, 1161-1165.

[180] **Kern, G. M., Wei, J. C.,** 1991, The Cost of Eliminating Exceptional Elements in Group Technology Cell Formation, *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 8, 1535-1547.

[181] **Shtub, A.,** 1989, Modelling Group Technology Cell Formation as a Generalized Assignment Problem, *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 5, 775-782.

[182] **Singh, N., Aneja, Y. P., Rana, S. P.,** 1992, A Bicriterion Framework for Operations Assignment and Routing Flexibility Analysis in Cellular Manufacturing Systems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 60, 200-210.

[183] **Gupta, T.,** 1993, Design of Manufacturing Cells for Flexible Environment Considering Alternative Routing, *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 6, 1259-1273.

[184] **Jensen, J. B., Malhotra, M. K., Philipoom, P. R.,** 1996, Machine dedication and process flexibility in a group technology environment, *Journal of Operation Management*, 14 (1), 19-39.

[185] **Jensen, J. B., Malhotra, M. K.,** 1997, Flexibility versus efficiency: Tradeoffs in a group technology shop with labor and machine constraints, *Proc. Decision Sciences Institute*, San Diego.

[186] **Jensen, J. B.,** 2000, The Impact of Resource Flexibility and Staffing Decisions on Cellular and Departmental Shop Performance, *European Journal of Operational Research*, 127, 279-296.

[187] **Kannan, V. R.,** 1998, Analysing the Tradeoff Between Efficiency and Flexibility in Cellular Manufacturing Systems, *Production Planning & Control*, 9 (6), 572-579.

[188] **Shafer, S. M., Charnes, J. M.,** 1997, Offsetting Lower Routing Flexibility in Cellular Manufacturing Due to Machine Dedication, *International Journal of Production Research*, Vol. 35 No. 2, 551-567.

[189] **Albino, V., Garavelli, A. C.,** 1998, Some Effects of Flexibility and Dependability on Cellular Manufacturing System performance, *Computers and Industrial Engineering*, Vol 35, No. 3-4, 491-494.

[190] **Choi, S. H., Kim, J. S.,** 1998, A Study on the Measurement of Comprehensive Flexibility in Manufacturing Systems, *Computers and Industrial Engineering*, Vol 34, No. 1, 103-118.

[191] **Albino, V., Garavelli, A. C.,** 1999, Limited Flexibility in Cellular Manufacturing Systems: A Simulation Study, *International Journal of Production Economics*, 60-61, 447-455.

[192] **Song, S. J., Hitomi, K.,** 1996, Integrating the Production Planning and Cellular Layout for Flexible Cellular Manufacturing, *Production Planning and Control*, 7 (6), 583-593.

[193] **Wu, N., Salvendy, G.,** 1999, An Efficient Heuristic for the Design of Cellular Manufacturing Systems with Multiple Identical Machines, *International Journal of Production Research*, Vol. 37 No. 15, 3519-3540.

[194] **Mahesh, O., Srinivasan, G.,** 2002, Incremental Cell Formation Considering Alternative Machines, *International Journal of Production Research,* Vol.40, No. 14, 3291-3310.

[195] **Lozano, S., Guerrero, F., Eguia, L., Onieve, L.,** 1999, Cell Design and Loading in the Presence of Alternative Routing, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 14, 3289-3304.

[196] **Chen, M. C.,** 2003, Configuration of Cellular Manufacturing Systems Using Assciation Rule Induction, *International Journal of Production Research*, Vol. 41 No. 2, 381-393.

[197] **Assad, A. A., Kramer, S. B., Kaku, B. K.,** 2003, Comparing Functional and Cellular Layouts: A Simulation Study Based on Standardization, *International Journal of Production Research*, Vol. 41 No. 8, 1639-1663.

[198] **Irani S. A., Huang, H.,** 2000, Custom Design of Facility Layouts for Multiproduct Facilities Using Layout Modules, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 3., 259-267.

[199] **Jensen, J. B., Malhotra, M.K., Philipoom, P.R.,** 1998, Family-based scheduling of shops with functional layouts, *International Journal of Production Research*, 36 (10), 2687-2700.

[200] **Aiello, G., Enea, M.,** 2001, Fuzzy Approach to the Robust Facility Layout in Uncertain Production Environments, *International Journal of Production Research*, Vol.39, No.18, 4089-4101.

[201] **Montreuil, B., Venkatadri, U., Rardin, R. L.,** 1999, Fractal Layout Organization for Job Shop Environment, *International Journal of Production Research*, Vol.37, No.3, 501-521.

[202] **Sofianopoulou, S.,** 1999, Manufacturing Cells Design with Alternative Process Plans and/or Replicate Machines, *International Journal of Production Research*, Vol. 37 No. 3, 707-720.

[203] **Özçelik, F., İşlier, A. A.,** 2003, Novel Approach to Multi-Channel Manufacturing System Design, *International Journal of Production Research*, Vol. 41 No. 12, 2711-2726.

[204] **Nomden, G., Slomp, J.,** 2003, The operation of virtual cellular layouts in various physical layout situations, *Proc. GT/CM World Symposium 2003*, Columbus, OH, 255-260.

[205] **Sarker, B. R., Li, Z.,** 2001, Job Routing and Operations Scheduling: A Network-Based Virtual Cell Formation Approach, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.20, 673-681.

[206] **Shambu, G., Suresh, N. C.,** 2000, Performance of Hybrid Cellular Manufacturing Systems: A Computer Simulation Investigation, *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, 436-458.

[207] **Slomp, J., Chowdary, B. V., Suresh N. C.,** 2003, Design and Operation of Virtual Manufacturing Cells, *Proc. Factory Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)* , Tampa, FL.

[208] **Mak., K. L., Wang, X. X.,** 2002, Production Scheduling and Cell Formation for Virtual Cellular Manufacturing Systems, I*nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20, 144-152.

[209] **Subash Babu, A., Nandurkar, K. N., Thomas, A.,** 2000, Development of virtual cellular manufacturing systems for SMEs, *Logistics Information Management*, 13 (4), 228-242.

[210] **Vakharia , A. J., Moily, J. P., Huang, Y.,** 1999, Evaluating virtual cells and multistage flowshops: An analytical approach, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, 291-314.

[211] **Kannan, V. R.,** 1997, A simulation analysis of the impact of family configuration on virtual cellular manufacturing, *Production Planning & Control*, 8 (1), 14-24.

[212] **Kannan, V. R., Ghosh, S.,** 1996a, A virtual cellular manufacturing approach to batch production, *Decision Sciences*, 27 (3), 519-539.

[213] **Kannan, V. R., Ghosh, S.,** 1996b, Cellular manufacturing using virtual cells, *International Journal of Operations and Production Management*, 16 (5), 99-112.

[214] **Suresh, N. C., Gaalman, G. J. C.,** 2000, Performance Evaluation of Cellular Layout: Extension to DRC System Contexts, *International Journal of Production Research,* Vol. 38 No. 17, 4393-4402.

[215] **Marcoux, Y., Drolet, J. R., Abdulnour, G.,** 2000, Dynamic cell manufacturing systems: Better adapted to turbulent environments than specialized workshops and classic cells, *Proc. GT/CM World Symposium*, San Juan, PuertoRico, 7-12.

[216] **Shafer, S. M., Charnes, J. M.,** 1993, Cellular versus functional layouts under a variety of shop operating conditions, *Decision Sciences*, 24 (3), 665-681.

[217] **Suresh, N. C.,** 1998, Evaluation of functional and cellular layouts through simulation and analytical models, (Chapter E4), in Suresh, N.C., and Kay, J.M., (Eds.), 1998, Group Technology and Cellular Manufacturing: A State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

[218] **Selim, H. M., Askin R. G., Vakharia A. J.,** 1998, Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for Future Research, *Computers and Industrial Engineering*, Vol 34, No. 1, 3-20.

[219] **Shambu, G., Suresh, N. C., Pegels, C. C.,** 1996, Performance evaluation of cellular manufacturing systems: A taxonomy and review of research, *International Journal of Operations and Production Management*, 16 (8), 81-103.

[220] **Shafer, S. M., Charnes, J. M.,** 1995, A simulation analysis of factors influencing loading practices in cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 33 (1), 279-290.

[221] **Durmuşoğlu, M. B., Durmuşoğlu, S., Akhun, M., Pektaş, S., Şentürk, O.,** 1984, Makina ve Kalıp Üretim Sisteminde Sistem Geliştirme Projeleri, CAMİŞ Makina ve Kalıp Sanayii A.Ş. için *Hazırlanmış Proje Raporu (Rapor No.1)*.

[222] **Durmuşoğlu, M. B., Nomak, A.,** 2000, Bir Cam Kalıbı Üretim Sisteminde GT Hücrelerinin Tasarımı ve Uygulanması, *Endüsti Mühendisliği Dergisi*, Cilt 11, Sayı: 2, sayfa 13–23.

[223] **Nomak, A., Durmuşoğlu, M. B.,** 2003, Bir Hücresel Üretim Ortamında Üretim Planlama ve Kontrol Sistemlerinin Benzetim Analizi, *İTÜ Dergesi/d Mühendislik*, Cilt. 2, Sayı. 5, 43-42.

[224] **Akhun, M.,** 1997, Çifte Kaynak Kısıtlı Grup Teknolojisi Üretim Sistemlerinin Bozucu Faktörlere Dayanıklı Tasarımı, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[225] **Durmuşoğlu, M. B., Nomak A.,** 2005, GT cells design and implementation in a glass mould production system, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, No. 3, 525-536.

[226] **Conway, R. W., Maxwell, W. L., Miller, L. W.,** 1967, Theory of Scheduling, Addison-Wesley.

[227] **Cheng, T. C. E.,** 1988, Simulation Study of Job Shop Scheduling with Due Dates, *International Journal of Systems Science*, Vol.19, No.3.

[228] **Banks, J., Burnette, B. B., Kozloski, H., Rose, J.,** 1995, Introduction to Siman V and Cinema V, John Wiley & Sons, Inc., New York.

[229] **Pegden, C. D.,** 1985, Introduction to SIMAN with Version 3.0 Enhancements, Systems Modeling Corporation, Pennsylvania.

[230] **Balci, O.,** 1995, Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification and Testing, *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, Arlington, VA, 147-154.

[231] **Ramesh, R.,** 1990, Dynamic Job Shop Scheduling: A Survey of Simulation Research, *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol. 18, No. 1, 43-57.

[232] **Lee, L. C.,** 1985, A Study System Characteristics in a Manufacturing Cell, *International Journal of Production Research*, 23(6), 1101-1114.

[233] **Law, A. M., Kelton, W. D.,** 2000, Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, Inc.

[234] **Banks, J., Carson, J. S., Nelson., B. L., Nicol, D. M.,** 2005, Discrete-Event System Simulation, Prentice-Hall, Inc.

[235] **Harrell, C., Ghosh, B. K., Bowden, R.,** 2000, Simulation Using ProModel, McGraw-Hill Companies U.S.A.

[236] **Kleijnen, J. P. C.,** 1987, Statistical Tools for Simulation Practitioners, Marcel Dekker, Inc., New York.

[237] **Kleijnen, J. P. C.,** 1975, Statistical Techniques in Simulation, Part II, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.

[238] **Taha, H. A.,** 1988, Simulation Modeling and Simnet, Prentice-Hall, Inc.

[239] **Bratley, P., Fox, B. L., Schrage, L. E.,** 1987, A Guide to Simulation, Springer-Verlag, Inc.

[240] **Conway, R. W.,** 1963, Some Tactical Problems in Digital Simulation, *Management Science*, Vol. 10, 47-61.

[241] **Schriber, T.,** 1974, Simulation Using GPSS, John Wiley and Sons, Inc.

[242] **Fishman, G. S.,** 1978, Grouping Observations in Digital Simulation, *Management Science*, Vol. 24, 510-521.

[243] **Schmeiser, B.,** 1982, Batch Size Effects in the Analysis of Simulation Output, *Operations Research*, Vol. 30, 556-568.

[244] **Carver, R. H.,** 2004, Doing Analysis with Minitab 14, Brooks/Coole, Thomson Learning, Inc.

[245] **Ryan B., Joiner, B., Cryer, J.,** 2005, Minitab Handbook, Brooks/Coole, Thomson Learning, Inc.

[246] **Askin, R. G., Goldberg. J. B.,** 2002, Design and Analysis of Lean Production Systems, John Wiley & Sons, Inc. New York.

EK A

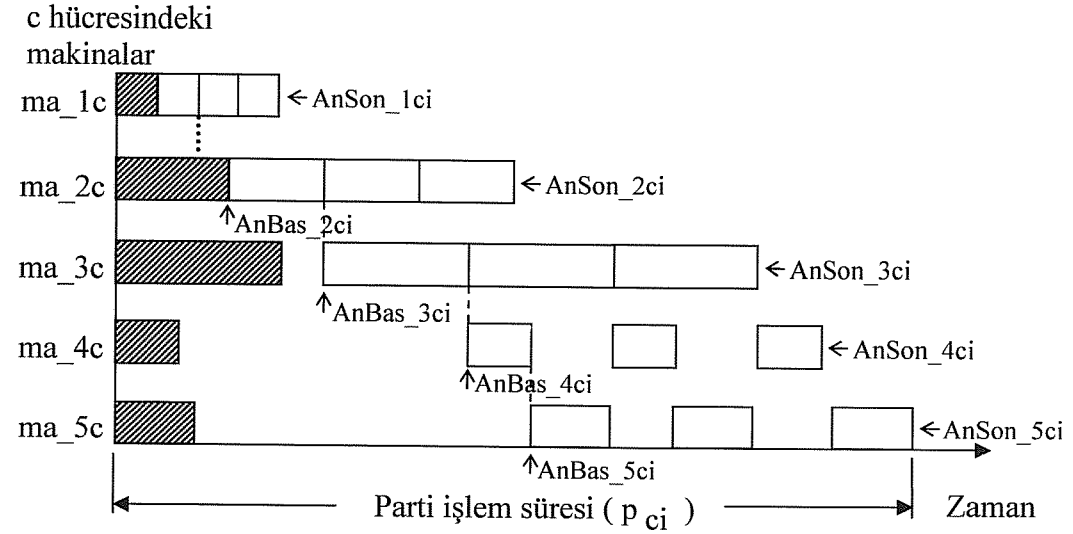
Çalışmada geliştirilen SIMAN programındaki PARTİ İŞLEM SÜRESİ değerlerini hesaplayan algoritmanın yapısı

Bir partinin parti bindirmeli olarak işlenmesi sırasında ilk makinadan sonra gelen herhangi bir makinadaki hazırlık süresinin oldukça uzun olması durumunda o makina ile o makinadan sonra gelen tüm makinalarda ilgili partinin tamamlanma zamanları gecikebilir ve ilgili parti işlem süresi de daha büyük olabilir. Bir c hücresinin sadece bir i partinin işlenmesine tahsis edilmesi koşulu ve yukarıdaki durumun oluşması halindeki parti işlem süresini hesaplayan algoritmanın çalışmada geliştirilen SIMAN programı içindeki yapısı aşağıda verilmektedir. Bölüm 5' deki yöntemle hesaplanan parti işlem süresi aşağıda açıklanan hesapla bulunan parti işlem süresinden farklı olmakla birlikte bu durumun olma olasılığının çok düşük olması nedeni ile benzetim sonuçları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu ön benzetim koşumları yapılarak belirlenmiştir. Çalışmada geliştirilen SIMAN benzetim modellerinde, parti bindirmeli işleme durumunda, parti işlem sürelerinin aşağıdaki algoritma kullanılarak kodlanmasının ana sebebi ise bu algoritmanın daha kesin ve doğru değerler üretmesidir (Şekil A.1).

AnSon_1ci = hz_ma_1ci + is_ma_1ci * PtHa_i
AnBas_2ci = MAX (hz_ma_2ci, hz_ma_1ci + is_ma_1ci)
AnSon_2ci = MAX (AnSon_1ci + is_ma_2ci, AnBas_2ci + is_ma_2ci * PtHa_i)
AnBas_3ci = MAX (hz_ma_3ci, AnBas_2ci + is_ma_2ci)
AnSon_3ci = MAX (AnSon_2ci + is_ma_3ci, AnBas_3ci + is_ma_3ci * PtHa_i)
AnBas_4ci = MAX (hz_ma_4ci, AnBas_3ci + is_ma_3ci)
AnSon_4ci = MAX (AnSon_3ci + is_ma_4ci, AnBas_4ci + is_ma_4ci * PtHa_i)
AnBas_5ci = MAX (hz_ma_5ci, AnBas_4ci + is_ma_4ci)
p_{ci} = MAX (AnSon_4ci + is_ma_5ci, AnBas_5ci + is_ma_5ci * PtHa_i)

j	: Makina indisi, c = Hücre indisi, i = Parti indisi.
p_{ci}	: i partisinin c hücresindeki (hesaplanan) parti işlem süresi.
hz_ma_jci	: Bir i partisinin c hücresinin j makinasındaki hazırlık süresi.
is_ma1_jci	: Bir i partisine ait bir parçanın c hücresinin j makinasındaki işlem süresi.
AnSon_jci	: Bir i partisine ait ilk parçanın c hücresinin j makinasında işlenmeye başlanabileceği en erken zaman.
AnBas_jci	: Bir i partisine ait son parçanın c hücresinin j makinasında işlenmesinin tamamlanabileceği en erken zaman.
PtHa_i	: Bir i partisinin parça hacmi (adedi).

Yukarıdaki algoritmanın yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için, parti bindirmeli işleme sırasında, bir i partisinin bir c hücresinin ikinci makinasında oldukça uzun bir hazırlık süresi olması durumunda oluşan p_{ci} parti işlem süresinin çalışmada kodlanan SIMAN programında hesaplanması ile ilgili Gantt Şeması Şekil A.1' de görülmektedir.



hz_ma_jci : i partisinin c hücresinin j makinasındaki parti hazırlık süresi.

is_ma_jci : i partisine ait bir parçanın c hücresinin j makinasındaki parça işlem süresi.

ma_jc : c hücresindeki j makinası.

c : Hücre numarası

j : Makina numarası (j=1, 2, ...,5).

Şekil A.1 : Çalışmada geliştirilen SIMAN programlarının p_{ci} parti işlem süresini hesaplama algoritması ile ilgili Gantt Şeması

EK B

1. SIMAN Yazılımı Kullanılarak Kodalanan MODEL ÇERCEVESİ Örnek Parçası :

```
BEGIN;
;
; PARCA AILE NO - 1
;
Kon     ASSIGN : YukFarBas = YukHuc1 - YukHuc2 ;
;
        IF : TemHarKos( Yon ) <> 0.0 && YukFarBas > 0.0 ;
             BLOCK  : B_KUY_Huc1 ;
             BLOCK  : B_KUY_Huc2 ;
             BLOCK  : B_GIR_KUY_Huc1 ;
             BLOCK  : B_GIR_KUY_Huc2 ;
             BLOCK  : B_CIK_KUY_Huc1 ;
             BLOCK  : B_CIK_KUY_Huc2 ;
          COUNT : TasDenToplam ;
             IF     : Yon == 1 ;
          COUNT : TasDenGonGir ;
                                DUPLICATE : 1, Ara : NEXT ( EtiKu1 ) ;
             ELSEIF : Yon == 2 ;
          COUNT : TasDenCagGir ;
             ELSEIF : Yon == 3 ;
          COUNT : TasDenCagCik ;
             ELSE ;
          ASSIGN : HatYon = 1 ;
             ENDIF ;
Ara     ASSIGN : SayJ = 1 ;
        WHILE  : SayJ <= NQ (KUY_Huc1 ) ;
           ASSIGN : YukFarHes = YukFarBas
                                - AQUE( KUY_Huc1, SayJ, NSYM(PisGe1) )
                                - AQUE( KUY_Huc1, SayJ, NSYM(PisGe2) ) ;
           IF : YukFarHes > 0 ;
           ASSIGN : SeAt = AQUE( KUY_Huc1, SayJ, NSYM( PisGe2 ) ) ;
             IF : J == 0 ;
                     ASSIGN : J = SayJ :
                              AtrTut = SeAt ;
             ELSEIF : SeAt < AtrTut ;
                     ASSIGN : J = SayJ :
                              AtrTut = SeAt ;
             ENDIF ;
           ENDIF ;
          ASSIGN : SayJ = SayJ + 1 ;
        ENDWHILE ;
        IF : J > 0 ;
        ASSIGN : YukFarTas = YukFarBas - AQUE( KUY_Huc1, J, NSYM(PisGe1) )
                                       - AQUE( KUY_Huc1, J, NSYM(PisGe2) ) ;
          IF     : Yon == 1 ;
                   REMOVE : J, KUY_Huc1, TsGoGir ;
          ELSEIF : Yon == 2 ;
                   REMOVE : J, KUY_Huc1, TsCaGir ;
          ELSEIF : Yon == 3 ;
                   REMOVE : J, KUY_Huc1, TsCaCik ;
          ELSE ;
                   ASSIGN : HatYon = 1 ;
          ENDIF ;
        ELSE ;
          UNBLOCK  : B_KUY_Huc1 ;
          UNBLOCK  : B_KUY_Huc2 ;
          UNBLOCK  : B_GIR_KUY_Huc1 ;
          UNBLOCK  : B_GIR_KUY_Huc2 ;
          UNBLOCK  : B_CIK_KUY_Huc1 ;
          UNBLOCK  : B_CIK_KUY_Huc2 ;
        ENDIF ;
```

```
          IF : Yon == 1 ;
                    DISPOSE ;
          ENDIF ;
          ENDIF ;
          BRANCH, 1 :
              IF, Yon == 1, EtiKu1 :
              IF, Yon == 2, GirHu2 :
              IF, Yon == 3, CikHu2 :
              ELSE, YonHat ;
YonHat    ASSIGN : HatYon = 1 ;
          CREATE ,, Cre1 : GeArSuDa1 : MARK(GeTa);
          QUEUE, GIR_KUY_Huc1 ;
          PROCEED : B_GIR_KUY_Huc1 ;
          COUNT   : GirenParti1 ;
          ASSIGN  : Aile = 1 :
                    GiPtiNoSay = GiPtiNoSay + 1 :
                    PtNo = GiPtiNoSay :
                    PtHa = PtHaDa1 :
                    PartiStogu1 = PartiStogu1 + 1 :
                    ParcaStogu1 = ParcaStogu1 + PtHa :
                    hz_ma11 = HzSuDa11 :
                    hz_ma21 = HzSuDa21 :
                    hz_ma31 = HzSuDa31 :
                    hz_ma41 = HzSuDa41 :
                    hz_ma91 = HzSuDa91 :
                    is_ma11 = IsSuDa11 :
                    is_ma21 = IsSuDa21 :
                    is_ma31 = IsSuDa31 :
                    is_ma41 = IsSuDa41 :
                    is_ma91 = IsSuDa91 :
                    PisBa1 = is_ma11 + is_ma21 + is_ma31 + is_ma41 + is_ma91 +
                             (PtHa-1) *
                           MX(is_ma11,  is_ma21,  is_ma31,  is_ma41,  is_ma91):
                    AnSon = hz_ma11 + is_ma11 * PtHa :
                    AnBas = MX( hz_ma21, hz_ma11 + is_ma11 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma21, AnBas + is_ma21 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma31, AnBas + is_ma21 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma31, AnBas + is_ma31 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma41, AnBas + is_ma31 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma41, AnBas + is_ma41 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma91, AnBas + is_ma41 ) :
                    PisGe1 = MX( AnSon + is_ma91, AnBas + is_ma91 * PtHa ) :
                    PisGeBaFa  = MN( PisGeBaFa, PisGe1 - PisBa1 ) :
                    TeTa = TNOW +  TeslSurCar * PisGe1 :
                    hz_ma12 = hz_ma11 * HazSuCa :
                    hz_ma22 = hz_ma21 * HazSuCa :
                    hz_ma32 = hz_ma31 * HazSuCa :
                    hz_ma42 = hz_ma41 * HazSuCa :
                    hz_ma92 = hz_ma91 * HazSuCa :
                    is_ma12 = is_ma11 * IslSuCa :
                    is_ma22 = is_ma21 * IslSuCa :
                    is_ma32 = is_ma31 * IslSuCa :
                    is_ma42 = is_ma41 * IslSuCa :
                    is_ma92 = is_ma91 * IslSuCa :
                    PisBa2  =  PisBa1 * IslSuCa :
                    AnSon = hz_ma12 + is_ma12 * PtHa :
                    AnBas = MX( hz_ma22, hz_ma12 + is_ma12 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma22, AnBas + is_ma22 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma32, AnBas + is_ma22 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma32, AnBas + is_ma32 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma42, AnBas + is_ma32 ) :
                    AnSon = MX( AnSon + is_ma42, AnBas + is_ma42 * PtHa ) :
                    AnBas = MX( hz_ma92, AnBas + is_ma42 ) :
                    PisGe2 = MX( AnSon + is_ma92, AnBas + is_ma92 * PtHa ) :
                    PisGeBaFa  = MN( PisGeBaFa, PisGe2 - PisBa2 ) :
                    YukHuc1    = YukHuc1 + PisGe1;
          ASSIGN : Yon = 1 ;
          COUNT : GirenParca1, PtHa : NEXT( Kon ) ;
EtiKu1    QUEUE, KUY_Huc1 ;
          PROCEED : B_KUY_Huc1 ;
          BLOCK : B_KUY_Huc1, NB (B_KUY_Huc1) == 0  ;
          ASSIGN : PrcSay1 = -1 ;
          DUPLICATE : PtHa ;
          ASSIGN : PrcSay1 = PrcSay1 + 1 ;
          IF : PrcSay1 == 0 ;
                 ASSIGN : PrcGos = -11 ;
          ELSEIF : PrcSay1 == PtHa ;
```

```
                ASSIGN : PrcGos = -9 ;
        ENDIF ;
; HUCRE 1 - MAKINALAR
;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz11 = KyUz11 + 1 ;
        ENDIF ;
        QUEUE, Kgm11 ;
        SEIZE, 1 : M11 ;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz11 = KyUz11 - 1 ;
        DUPLICATE : 1, km21 ;
        DELAY    : hz_ma11, Stut11 ;
        RELEASE : M11;
        DISPOSE ;
        ENDIF ;
        DELAY    : is_ma11, Mut11;
        RELEASE : M11;
             IF : PrcGos == -9 ;
        UNBLOCK : B_KUY_Huc1, NB (B_KUY_Huc1) <> 0    ;
             ENDIF ;
km21    IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz21 = KyUz21 + 1 ;
        ENDIF ;
        QUEUE, Kgm21 ;
        SEIZE, 1 : M21 ;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz21 = KyUz21 - 1 ;
        DUPLICATE : 1, km31 ;
        DELAY    : hz_ma21, Stut21 ;
        RELEASE : M21;
        DISPOSE ;
        ENDIF ;
        DELAY    : is_ma21, Mut21;
        RELEASE : M21;
km31    IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz31 = KyUz31 + 1 ;
        ENDIF ;
        QUEUE, Kgm31 ;
        SEIZE, 1 : M31 ;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz31 = KyUz31 - 1 ;
        DUPLICATE : 1, km41 ;
        DELAY    : hz_ma31, Stut31 ;
        RELEASE : M31;
        DISPOSE ;
        ENDIF ;
        DELAY    : is_ma31, Mut31;
        RELEASE : M31;
km41    IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz41 = KyUz41 + 1 ;
        ENDIF ;
        QUEUE, Kgm41 ;
        SEIZE, 1 : M41 ;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz41 = KyUz41 - 1 ;
        DUPLICATE : 1, km91 ;
        DELAY    : hz_ma41, Stut41 ;
        RELEASE : M41;
        DISPOSE ;
        ENDIF ;
        DELAY    : is_ma41, Mut41;
        RELEASE : M41;
km91    IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz91 = KyUz91 + 1 ;
        ENDIF ;
        QUEUE, Kgm91 ;
        SEIZE, 1 : M91 ;
        IF : PrcGos == -11 ;
        ASSIGN : KyUz91 = KyUz91 - 1 ;
        DELAY    : hz_ma91, Stut91 ;
        RELEASE : M91;
        ASSIGN   : HaSa91 = PtNo ;
        DISPOSE ;
```

2. SIMAN Yazılımı Kullanılarak Kodalanan DENEY ÇERCEVESİ Örnek Parçası :

```
BEGIN,,;
;
ARRIVALS : BIR : BLOCK ( BasDeg ) , FIRST :
           ISI : BLOCK ( IsiVar ) , WARMUP :
           SON : BLOCK ( SonVar ) , LAST ;
SEEDS : 14 ;
EXPRESSIONS :     TemHarKos( 3 ) ,
                        NB(B_KUY_Huc2) + J == 0 && NB( B_KUY_Huc1 ) > 0 ,
                        NQ(KUY_Huc2) + J == 0 && NQ( KUY_Huc1) > 0 ,
                        NB(B_KUY_Huc2) + J == 0 && NQ( KUY_Huc1 ) > 0 :
                  GeArSuDa1       ,       EXPO( OrtGeArSu1, 11 ) :
                  GeArSuDa2       ,       EXPO( OrtGeArSu2, 12 ) :
      PtHaDa1 , DISC ( 0.068, 10,  0.140, 11,  0.213, 20,  0.435, 22,
                       0.738, 24,  0.799, 30,  0.854, 32,  0.902, 44,
                       0.929, 46,  0.971, 48,  0.983, 62,  1.000, 68, 13 ) :
      PtHaDa2 , DISC ( 0.068, 10,  0.140, 11,  0.213, 20,  0.435, 22,
                       0.738, 24,  0.799, 30,  0.854, 32,  0.902, 44,
                       0.929, 46,  0.971, 48,  0.983, 62,  1.000, 68, 14 ) :
        HzSuDa11 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  1 ) :
        HzSuDa21 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  2 ) :
        HzSuDa31 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  3 ) :
        HzSuDa41 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  4 ) :
        HzSuDa91 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  5 ) :
        HzSuDa12 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  6 ) :
        HzSuDa22 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  7 ) :
        HzSuDa32 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  8 ) :
        HzSuDa42 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa,  9 ) :
        HzSuDa92 , HzSuPa1 + HzSuPa2 * BETA( HzSuBePa, HzSuBePa, 10 ) :
        IsSuDa11  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  1 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa21  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  2 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa31  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  3 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa41  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  4 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa91  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  5 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa12  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  6 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa22  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  7 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa32  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  8 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa42  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu ,  9 ), ArKuSa ) :
        IsSuDa92  ,  MX( NORMAL( OrIsSu, StSpOrIsSu , 10 ), ArKuSa ) :
    eTasPtiYuzTum, (( NC( TasTopPti ) * ( eGirPtiHucTop <> 0 )) /
                    ( eGirPtiHucTop   + ( eGirPtiHucTop == 0 )))*100 :
                       .....................................
                       .....................................
                       .....................................
ATTRIBUTES: hz_ma11: hz_ma21: hz_ma31: hz_ma41: hz_ma91:
            is_ma11: is_ma21: is_ma31: is_ma41: is_ma91:
            hz_ma12: hz_ma22: hz_ma32: hz_ma42: hz_ma92:
            is_ma12: is_ma22: is_ma32: is_ma42: is_ma92:
            PrcGos : GeTa  : TeTa  :
            PisBa1 : PisBa2 : PisGe1 : PisGe2 : Yon ;
NICKNAMES : Aile, M : PtNo, NS : PtHa, IS ;
VARIABLES:  DeneyNo : DenGrp : DenNo :
            KosSon  :
            MaxREP  :
            IsiSur  :
            KrSrCa  :
            AnaGeArSu1 :
            AnaGeArSu2 :
            YukDagYuz1 :
            HazSuArYuz :
            IslSuArYuz :
            TeslSurCar :
            OrIsSu :
            CvIsSu :
            HzSuBePa : HzSuPa1 : HzSuPa2 : HSuArYuzFa :
            KarSur : YukDagYuz2 : StSpOrIsSu : FzCkPtKoAd :  _________ :
            OrtGeArSu1 : OrtGeArSu2 : HazSuCa : HazSuCaKu : IslSuCa :
            KyUz11 : KyUz21 : KyUz31 : KyUz41 : KyUz91 :
            KyUz12 : KyUz22 : KyUz32 : KyUz42 : KyUz92 :
            BuSa, 1e+2000 : KuSa, -1e+2000 : EkSi, -1e-6 : ArKuSa, 0.000001 :
            HtaLmt, 0.1 : ToMakAd, 1 : HuMakAd, 1 : AraKuyAd, 1 :
            AiTu12 , 2 : AiTu22 , 2 : AiTu32 , 2 : AiTu42 , 2 : AiTu92 , 2 :
```

```
            CoTut( 17, 3 ), -999999 : HeTut( 33, 3 ), -999999 :
            ExSa(33), -999999 : TaTut( 21, 3 ), -999999 :
            DsTut( 51, 3 ), -999999 : IstAde(4) :
            CevSurT : FaTeTa1 : FaTeTa2  : AkSu : AnBas : AnSon :
            GiPtiNoSay : PrcSay1 : PrcSay2  : KosNum : SonSay :
            AkPisBaFa : AkPisGeFa : PisGeBaFa : YukHuc1 : YukHuc2 :
            AkPiGeF11 : AkPiGeF12 : AkPiGeF22 :
            SayJ : IstJ : IstGos : IstNum : KayJ : KayJson : TasZamSak :
            PartiStogu1 : PartiStogu2 : ParcaStogu1 : ParcaStogu2 :
            HaSa91 : HaSa92 : HataSi91 : HataSi92 :
            De1   : De2   : De3   : De4   : De5   : De6   : De0 : IsNo :
            ToDe1 : ToDe2 : ToDe3 : ToDe4 : ToDe5 : ToDe6 :
            OrDe1 : OrDe2 : OrDe3 : OrDe4 : OrDe5 : OrDe6 :
            MnDe1 : MnDe2 : MnDe3 : MnDe4 : MnDe5 : MnDe6 :
            MxDe1 : MxDe2 : MxDe3 : MxDe4 : MxDe5 : MxDe6 :
            HatTasKos : HatTasMik : HatTasZam : YukHatMin :  HatYon :
            YukFarBas : YukFarHes : YukFarTas : YukFarGer :
            FarBa : FarGe : DePisGe2 : MnFaDePisGe2 : MxFaDePisGe2 :
            PtiStoTut : PcaStoTut : No : NoYaz : NoBas1 : NoBas2 :
            FaPisGeBa0 : FaPisGeBa1 : FaPisGeBa2 : KosSay : IsSuKa : YukDtp :
            AtrTut : SeAt : Sak : Tut : Cre1 : Cre2 ;
RESOURCES:  M11 : M21 : M31 : M41 : M91 :
            M12 : M22 : M32 : M42 : M92 ;
QUEUES: GIR_KUY_Huc1 : GIR_KUY_Huc2 :
        CIK_KUY_Huc1 : CIK_KUY_Huc2 : SON_KUY :
        KUY_Huc1 : KUY_Huc2 :
        Kgm11  : Kgm21  : Kgm31  : Kgm41  : Kgm91 :
        Kgm12  : Kgm22  : Kgm32  : Kgm42  : Kgm92 ;
BLOCKAGES : B_KUY_Huc1 : B_KUY_Huc2 : B_SON_KUY :
            B_GIR_KUY_Huc1 : B_GIR_KUY_Huc2 :
            B_CIK_KUY_Huc1 : B_CIK_KUY_Huc2 ;
COUNTERS:   GirenParti1  : GirenParti2  : GirenParca1  : CikanParca1 :
            GirenParca2  : CikanParca2  :
            TasDenGonGir : TasDenCagGir : TasDenCagCik : TasDenToplam :
            TasGonGir    : TasCagGir    : TasCagCik    : TasTopPti :
            CikTasPti    : TasTopPrc    : CikTasPrc    : Bitir, 1 ;
TALLIES: IsAkiSurTum : IsAkiSurAi1 : IsAkiSurAi2 :
         KaDsizOr_Baz : KaDsizOr_Ger : HazSuOr_Baz%Baz :
         CevSurTum : GecikmeTum : TasYukFar : SecSira ;
DSTATS: (NR(M11) + NR(M21) + NR(M31) + NR(M41) + NR(M91) +
         NR(M12) + NR(M22) + NR(M32) + NR(M42) + NR(M92)) / ToMakAd,
                                                  Sistem Kullanim Orani :
        (NR(M11) + NR(M21) + NR(M31) + NR(M41) + NR(M91)) / HuMakAd,
                                                  Hucre 1 Kullanim Orani :
        (NR(M12) + NR(M22) + NR(M32) + NR(M42) + NR(M92)) / HuMakAd,
                                                  Hucre 2 Kullanim Orani :
        (NSTO(Stut11) + NSTO(Stut21) + NSTO(Stut31) +
         NSTO(Stut41) + NSTO(Stut91) +
         NSTO(Stut12) + NSTO(Stut22) + NSTO(Stut32) +
         NSTO(Stut42) + NSTO(Stut92)) / ToMakAd ,    Sistem Hazirlik Orani :
        (NSTO(Stut11) + NSTO(Stut21) + NSTO(Stut31) +
         NSTO(Stut41) + NSTO(Stut91)) / HuMakAd ,    Hucre 1 Hazirlik Orani :
        (NSTO(Stut12) + NSTO(Stut22) + NSTO(Stut32) +
         NSTO(Stut42) + NSTO(Stut92)) / HuMakAd ,    Hucre 2 Hazirlik Orani :
        (NSTO(Mut11) + NSTO(Mut21) + NSTO(Mut31) +
         NSTO(Mut41) + NSTO(Mut91) +
         NSTO(Mut12) + NSTO(Mut22)+ NSTO(Mut32) +
         NSTO(Mut42) + NSTO(Mut92)) / ToMakAd ,      Sistem Islem Orani :
        (NSTO(Mut11) + NSTO(Mut21) + NSTO(Mut31) +
         NSTO(Mut41) + NSTO(Mut91)) / HuMakAd ,      Hucre 1 Islem Orani :
        (NSTO(Mut12) + NSTO(Mut22) + NSTO(Mut32) +
         NSTO(Mut42) + NSTO(Mut92)) / HuMakAd ,      Hucre 2 Islem Orani :
       PartiStogu1 + PartiStogu2,  Sistem Parti Stogu  :
       PartiStogu1  ,              Hucre 1 Parti Stogu :
       PartiStogu2  ,              Hucre 2 Parti Stogu :
       ParcaStogu1 + ParcaStogu2,    Sistem Parca Stogu  :
       ParcaStogu1,                  Hucre 1 Parca Stogu :

.....
.....
.....
```

EK C

SIMAN Ortamında Geliştirilen Programlara ait ÖZET RAPOR Çıktısı Örnek Parçası :

```
      DENEY GIRDI DEĞERLERİ
     ----------------------
      DeneyNo     : 1010.000000
      ToMakAd     : 10.000000
     -NREP        : -1.000000
     -MREP        : -20.000000
      KosSon      : 600.000000
      IsiSur      : 50000.000000
      KrSrCa      : 5.000000
   KarSur-IsiSur  : 250000.000000
      AnaGeArSu1  : 1500.000000
      AnaGeArSu2  : 1500.000000
      OrtGeArSu1  : 1425.000000
      OrtGeArSu2  : 1574.999878
      YukDagYuz1  : -5.000000
      YukDagYuz2  : 5.000000
      HSuArYuzFa  : 0.500000
      HazSuArYuz  : 200.000000
      IslSuArYuz  : 500.000000
      HazSuCaKu   : 2.000000
      HazSuCa     : 3.000000
      IslSuCa     : 6.000000
      TeslSurCar  : 1.500000
      OrIsSu      : 33.000000
      CvIsSu      : 0.100000
      StSpOrIsSu  : 3.300000
      HzSuBePa    : 0.800000
      HzSuPa1     : 75.000000
      HzSuPa2     : 150.000000
      HtaLmt      : 0.100000
      IstAde(1)   : 10.000000
      IstAde(2)   : 23.000000
      IstAde(3)   : 17.000000
      IstAde(4)   : 32.000000

                    SIMAN V - License #9210575
                      YOUR COMPANY NAME HERE

                  Summary for Replication 1 of 20

Project:  TEZ                                  Run execution date :   8/14/2005
Analyst:  MUSTAFA                              Model revision date:   8/14/2005

Replication ended at time      : 546656.0
Statistics were cleared at time: 50000.0
Statistics accumulated for time: 496656.0

                          TALLY VARIABLES

Identifier              Average    Variation   Minimum     Maximum   Observations
-------------------------------------------------------------------------------
IsAkiSurTum             2237.6      .54850     559.48      6830.2        600
IsAkiSurAi1             2143.1      .55800     559.48      6830.2        307
IsAkiSurAi2             2336.7      .53661     617.75      6710.4        293
KaDsizOr_Baz            .40588      .61375     .03894      .91511        600
KaDsizOr_Ger            .31075      .90819    -5.990E-04   .88566        600
HazSuOr_Baz%Baz         .16884      .45734     .03868      .45911        600
CevSurTum               829.65      .76043     3.3125      5507.5        600
GecikmeTum              1262.7      .84706     .90625      5065.4        297
TasYukFar               425.79      .43074     237.35      677.28          4
SecSira                 1.7500      .85714     1.0000      4.0000          4
```

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Variation	Minimum	Maximum	Final Value
Sistem Kullanim Orani	.62971	.48003	.00000	1.0000	1.0000
Hucre 1 Kullanim Orani	.62690	.68671	.00000	1.0000	1.0000
Hucre 2 Kullanim Orani	.63252	.68000	.00000	1.0000	1.0000
Sistem Hazirlik Orani	.09223	1.6327	.00000	1.0000	.40000
Hucre 1 Hazirlik Orani	.09098	2.3258	.00000	1.0000	.00000
Hucre 2 Hazirlik Orani	.09348	2.2642	.00000	1.0000	.80000
Sistem Islem Orani	.53748	.54392	.00000	1.0000	.60000
Hucre 1 Islem Orani	.53592	.77934	.00000	1.0000	1.0000
Hucre 2 Islem Orani	.53904	.76929	.00000	1.0000	.20000
Sistem Parti Stogu	2.7158	.66962	.00000	9.0000	7.0000
Hucre 1 Parti Stogu	1.2929	.92042	.00000	6.0000	2.0000
Hucre 2 Parti Stogu	1.4229	.91169	.00000	6.0000	5.0000
Sistem Parca Stogu	77.455	.71514	.00000	328.00	169.00
Hucre 1 Parca Stogu	36.678	.99761	.00000	198.00	44.000
Hucre 2 Parca Stogu	40.776	.95263	.00000	176.00	125.00
Sistem Yuku	3775.0	.72275	-1.587E-03	16112.	8102.8
Hucre 1 Yuku	1733.6	.96435	-1.587E-03	8806.2	2040.2
Hucre 2 Yuku	2041.3	.94957	.00000	12097.	6062.6
Yuk Farki Huc.1_2	-3.077E+02	-7.733E+00	-1.049E+04	6926.6	-4.022E+03
Hucre 1 Parti Kuyrugu	.41737	1.9400	.00000	4.0000	.00000
Hucre 2 Parti Kuyrugu	.51143	1.6787	.00000	4.0000	4.0000
Huc Gir Cik Kuy Hatasi	.00000	--	.00000	.00000	.00000
Isleme Hatasi	.00000	--	.00000	.00000	.00000
NR(M11)	.62868	.76853	.00000	1.0000	1.0000
NR(M21)	.62407	.77614	.00000	1.0000	1.0000
NR(M31)	.63370	.76028	.00000	1.0000	1.0000
NR(M41)	.62248	.77876	.00000	1.0000	1.0000
NR(M91)	.62557	.77365	.00000	1.0000	1.0000
NR(M12)	.62978	.76671	.00000	1.0000	1.0000
NR(M22)	.62932	.76748	.00000	1.0000	1.0000
NR(M32)	.63700	.75490	.00000	1.0000	1.0000
NR(M42)	.63735	.75431	.00000	1.0000	1.0000
NR(M92)	.62916	.76773	.00000	1.0000	1.0000
KYUZ11	.00000	--	.00000	.00000	.00000
KYUZ21	.05477	4.1626	.00000	2.0000	1.0000
KYUZ31	.04325	4.7309	.00000	2.0000	.00000
KYUZ41	.03311	5.4037	.00000	1.0000	.00000
KYUZ91	.03288	5.4237	.00000	1.0000	.00000
KYUZ12	.00000	--	.00000	.00000	.00000
KYUZ22	.06327	3.8523	.00000	2.0000	.00000
KYUZ32	.05332	4.2199	.00000	2.0000	.00000
KYUZ42	.04075	4.8545	.00000	2.0000	.00000
KYUZ92	.03867	5.0083	.00000	2.0000	.00000

COUNTERS

Identifier	Count	Limit
GirenParti1	309	Infinite
GirenParti2	298	Infinite
GirenParca1	8089	Infinite
CikanParca1	8045	Infinite
GirenParca2	7895	Infinite
CikanParca2	7770	Infinite
TasDenGonGir	62	Infinite
TasDenCagGir	31	Infinite
TasDenCagCik	31	Infinite
TasDenToplam	124	Infinite
TasGonGir	4	Infinite
TasCagGir	0	Infinite
TasCagCik	0	Infinite
TasTopPti	4	Infinite
CikTasPti	4	Infinite
TasTopPrc	55	Infinite
CikTasPrc	55	Infinite
Bitir	1	1

OUTPUTS

Identifier	Value
TAVG(IsAkiSurTum)	2237.6
TAVG(IsAkiSurAi1)	2143.1
TAVG(IsAkiSurAi2)	2336.7
TAVG(KaDsizOr_Baz)	.40588
TAVG(KaDsizOr_Ger)	.31075
TAVG(HazSuOr_Baz%Baz)	.16884
TAVG(CevSurTum)	829.65
TAVG(GecikmeTum)	1262.7
_____	425.79
DAVG(Sistem Kullanim O	.62971
DAVG(Hucre 1 Kullanim	.62690
DAVG(Hucre 2 Kullanim	.63252
DAVG(Sistem Hazirlik O	.09223
DAVG(Hucre 1 Hazirlik	.09098
DAVG(Hucre 2 Hazirlik	.09348
DAVG(Sistem Islem Oran	.53748
DAVG(Hucre 1 Islem Ora	.53592
DAVG(Hucre 2 Islem Ora	.53904
DAVG(Sistem Parti Stog	2.7158
DAVG(Hucre 1 Parti Sto	1.2929
DAVG(Hucre 2 Parti Sto	1.4229

.....
.....
.....

DENEY CIKTI DEGERLERI

DeneyNo	:	1010.000000
KarSur-IsiSur	:	250000.000000
IsiSur	:	50000.000000
KrSrCa	:	5.000000
KarSur	:	300000.000000
ToMakAd	:	10.000000
-NREP	:	-20.000000
-MREP	:	-20.000000
KosSon	:	600.000000
TNUM(1)	:	600.000000
IsiSur	:	50000.000000
TNOW-DTPD(1)	:	50000.000000
AnaGeArSu1	:	1500.000000
AnaGeArSu2	:	1500.000000
OrtGeArSu1	:	1425.000000
OrtGeArSu2	:	1574.999878
YukDagYuz1	:	-5.000000
YukDagYuz2	:	5.000000
HSuArYuzFa	:	0.500000
HazSuArYuz	:	200.000000
IslSuArYuz	:	500.000000
HazSuCaKu	:	2.000000
HazSuCa	:	3.000000
IslSuCa	:	6.000000
TeslSurCar	:	1.500000
OrIsSu	:	33.000000
CvIsSu	:	0.100000
HzSuBePa	:	0.800000
HzSuPa1	:	75.000000
HzSuPa2	:	150.000000
HtaLmt	:	0.100000
Tally Ist. Adedi	(i-1) :	10.000000
Discrete Ist. Adedi	(i-2) :	23.000000
Counter Ist. Adedi	(i-3) :	17.000000
Output Ist. Adedi	(i-4) :	32.000000

```
Ort. IsAkiSurTum       : 2896.789307 -0.000001 2067.815674 3554.814941
Ort. IsAkiSurTum1      : 2797.988525 -0.000001 2109.143799 3483.855713
Ort. IsAkiSurTum2      : 2996.923340 -0.000001 2023.927979 3931.356201
Ort. KaDsizOr_Baz      : 0.485452 -0.000001 0.384683 0.551643
Ort. KaDsizOr_Ger      : 0.401501 -0.000001 0.281562 0.481280
Ort. HazSuOr_Baz/Baz   : 0.172705 -0.000001 0.166337 0.178816
```

```
Ort. CevSurTum        : 755.732056 -0.000001 716.351318 829.656738
Ort. GecikmeTum       : 1999.878540 -0.000001 1122.195557 2788.780273
Ort. TasYukFar        : 1090.040161 -0.000001 425.797180 1946.635864
Ort. SecSira          : 2.342622 -0.000001 1.000000 3.200000
  ---------------------------------------
Ort. Sis. Kul. Ora.    : 0.691027 -0.000001 0.612999 0.748580
Ort. Kul. Ora. Hu1.    : 0.679527 -0.000001 0.622627 0.737271
Ort. Kul. Ora. Hu2.    : 0.702525 -0.000001 0.603341 0.764001
Ort. Sis. Haz. Ora.    : 0.103726 -0.000001 0.092235 0.111881
Ort. Haz. Ora. Hu1.    : 0.101020 -0.000001 0.090985 0.112044
Ort. Haz. Ora. Hu2.    : 0.106432 -0.000001 0.092352 0.116324
Ort. Sis. Isl. Ora.    : 0.587301 -0.000001 0.520663 0.636698
Ort. Isl. Ora. Hu1.    : 0.578508 -0.000001 0.527311 0.627613
Ort. Isl. Ora. Hu2.    : 0.596093 -0.000001 0.510994 0.653160
Ort. Sis. Parti Sto.   : 3.876320 -0.000001 2.502047 5.033563
Ort. Parti Sto. Hu1.   : 1.875016 -0.000001 1.292910 2.474356
Ort. Parti Sto. Hu2.   : 2.001304 -0.000001 1.207422 2.826757
Ort. Sis. Parca Sto.   : 105.605370 -0.000001 70.089958 137.119766
Ort. Parca Stogu Hu1.  : 51.561249 -0.000001 36.678844 67.506538
Ort. Parca Stogu Hu2.  : 54.044147 -0.000001 33.116486 79.659180
Ort. Sis. Yuku         : 5333.444824 -0.000001 3401.083740 6936.251465
Ort. Yuk Hu1.          : 2450.894043 -0.000001 1733.671143 3233.638672
Ort. Yuk Hu2           : 2882.551025 -0.000001 1652.584229 4024.326416
Ort. Yuk Farki Huc.1_2 : -431.657410 -0.000001 -1317.234619 242.955750
Ort. Parti Kuy.  Hu1.  : 0.816153 -0.000001 0.396006 1.342004
Ort. Parti Kuy.  Hu2.  : 0.850657 -0.000001 0.367532 1.439335
     Max. HuGiCi. Kuy. Hat. : 0.000000
     Max. Isleme Hatasi     : 0.000000
  ---------------------------------------
     Ort. Sis. Parti Sto. Mak. : 2.209510
     Ort. Parti Sto. Mak. Hu1. : 1.058863
     Ort. Parti Sto. Mak. Hu2. : 1.150647
     Ortalama Cikan Parti Hacmi: 25.807083 -0.000001 25.081667 26.416666
  ---------------------------------------
Ort. GirenParti1  : 314.100006 -0.000001 299.000000 344.000000
Ort. GirenParti2  : 287.700012 -0.000001 260.000000 305.000000
Ort. GirenParca1  : 8055.399902 -0.000001 7391.000000 8683.000000
Ort. CikanParca1  : 8044.649902 -0.000001 7323.000000 8709.000000
Ort. GirenParca2  : 7475.899902 -0.000001 6651.000000 8139.000000
Ort. CikanParca2  : 7439.600098 -0.000001 6673.000000 7967.000000
Ort. TasDenGonGir : 56.599998 -0.000001 37.000000 71.000000
Ort. TasDenCagGir : 32.849998 -0.000001 22.000000 44.000000
Ort. TasDenCagCik : 28.350000 -0.000001 14.000000 42.000000
Ort. TasDenToplam : 117.800003 -0.000001 73.000000 148.000000
Ort. TasGonGir    : 4.600000 -0.000001 1.000000 7.000000
Ort. TasCagGir    : 2.150000 -0.000001 0.000000 5.000000
Ort. TasCagCik    : 2.050000 -0.000001 0.000000 7.000000
Ort. GirTasPti    : 8.800000 -0.000001 3.000000 14.000000
Ort. CikTasPti    : 8.800000 -0.000001 3.000000 14.000000
Ort. GirTasPrc    : 120.599998 -0.000001 32.000000 217.000000
Ort. CikTasPrc    : 119.900002 -0.000001 32.000000 217.000000
  ---------------------------------------
Ort Tas Gir Pti Yuz Tum. : 1.463156 -0.000001 0.495868 2.333333
Ort Tas Gir Pti Yuz Ai_1 : 2.784995 -0.000001 0.958466 4.242424
Ort Tas Cik Pti Yuz Tum  : 1.466667 -0.000001 0.500000 2.333333
Ort Tas Cik Pti Yuz Ai_1 : 2.784066 -0.000001 0.970874 4.268293
Ort Gir Pti Ai_1         : 314.100006 -0.000001 299.000000 344.000000
Ort Gir Pti Ai_2         : 287.700012 -0.000001 260.000000 305.000000
Ort Gir Pti Ad           : 601.799988 -0.000001 595.000000 608.000000
Ort Gir Pti Ad_Stok      : 604.900024 -0.000001 600.000000 610.000000
Ort Cik Pti Ad           : 600.000000 -0.000001 600.000000 600.000000
Ort Cik Pti Ai_1         : 313.850006 -0.000001 297.000000 343.000000
Ort Cik Pti Ai_2         : 286.149994 -0.000001 257.000000 303.000000
Ort Gir Prc Ad           : 15617.950195 -0.000001 15181.000000 16147.000000
Ort Cik Prc Ad           : 15484.250000 -0.000001 15049.000000 15850.000000
  ---------------------------------------
Min Min Yuk Hatas□     : -0.002377 -0.004517 -0.000854
  ---------------------------------------
Max Hata AkPiGeF11 (+/-) : -0.630926 -1.574219 -0.332031
Max Hata AkPiGeF12 (+/-) : -5.019751 -99.678223 0.000000
Max Hata AkPiGeF22 (+/-) : -0.615411 -0.895508 -0.322754
  ---------------------------------------
Max Hata AkPisBaFa (+/-) : 0.000000 0.000000 0.000000
---------------------------------------
```

. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .

EK D

4. SIMAN Yazılımında Geliştirilen Programlara ait İZ SÜRME (TRACE) Örnek Parçası :

```
Reading program file: uyde.P
Beginning execution of replication 1 of 2

SIMAN System Trace Beginning at Time: 531214.0

Seq#  Label            Block     System Status Change
----- ---------------- --------- ------------------------------------------------

TIME: 531214.0  ENTITY: 134
                                  Entity 134 removed from storage MUT12
  396                   RELEASE
                                  M12 available increased by 1 to 1
                                  Entity 79 removed from queue KGM12_IS
                                  Resource allocated to entity 79
                                  Seized 1 unit(s) of resource M12
  397                   IF
                                  Conditional expression is FALSE.

                                  Entity transferred to block 400
  400                   ENDIF
  401                   ASSIGN
                                  HATASI12 set to 0.0
                                  Entity transferred to block KCM12_I
  427 kcm12_I           QUEUE
                                  Entity 134 sent to next block
  428                   PROCEED
                                  Blockage B_KCM12_IS is now unblocked.
  429                   IF
                                  Conditional expression is FALSE.
                                  Entity transferred to block 431
  431                   ENDIF
  432                   QUEUE
                                  Entity 134 sent to next block
  433                   PROCEED
                                  Blockage B_KAM22_IS is now unblocked.
  434                   IF
                                  Conditional expression is FALSE.
                                  Entity transferred to block 437
  437                   ENDIF
  438                   QUEUE
                                  Entity 134 sent to next block
  439                   SEIZE
                                  Could not seize resource M22
                                  Entity 134 added to queue KGM22_IS at rank 1
                                  DEPISGE2 = 1261.07
                                  PISGE2 = 1261.07
                                  AKSU = 770.625
                                  FARGE = 0.192139
                                  AKSU-PISGE2 = -490.445
                                  -AILE = -2.0
                                  -PTNO = -954.0
                                  -TNOW = -531214.0
TIME: 531214.0  ENTITY: 79
  395                   DELAY
                                  Entity 79 added to storage MUT12
                                  Delayed by 20.6537 until time 531234.0
                                  DEPISGE2 = 1261.07
.....
.....
.....
```

EK E

BİRİNCİL PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ İÇİN BENZETİM DENEYLERİNİN SONUÇLARI :

Tablo E.1 : Kural A için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı
		0	250	500	750				0	250	500	750	
1	0	2070	2303	2253	2207	1	1	400	2441	2964	3229	3273	11
1	0	2313	2709	2898	2904	2	1	400	2878	3144	3211	3230	12
1	0	2237	2594	2638	2837	3	1	400	2492	2689	2825	2846	13
1	0	2988	3335	3402	3346	4	1	400	2730	2974	2925	2899	14
1	0	2389	2769	3013	2888	5	1	400	2805	3072	3182	2944	15
1	0	2798	3292	3493	3598	6	1	400	2538	2761	2785	2869	16
1	0	2257	2613	2739	2775	7	1	400	2380	2479	2464	2405	17
1	0	1829	2112	2081	2078	8	1	400	2541	3105	3247	3319	18
1	0	2164	2624	2647	2708	9	1	400	2570	2851	2983	3159	19
1	0	2741	3162	3154	3370	10	1	400	2560	2734	2764	2606	20
1	0	2154	2636	3042	3228	11	1	600	2329	2277	2244	2217	1
1	0	2542	2959	3139	3126	12	1	600	2773	2956	2940	3068	2
1	0	2271	2773	2788	2764	13	1	600	2682	2678	2915	2721	3
1	0	2607	2890	2910	2890	14	1	600	3201	3404	3485	3305	4
1	0	2516	2948	3177	2940	15	1	600	2745	2933	2928	2981	5
1	0	2187	2617	2804	2827	16	1	600	3210	3456	3726	3827	6
1	0	2045	2384	2444	2479	17	1	600	2574	2728	2718	2590	7
1	0	2027	2906	3179	3170	18	1	600	2078	2101	2083	2074	8
1	0	2413	2727	2854	3045	19	1	600	2622	2788	2714	2733	9
1	0	2209	2623	2671	2775	20	1	600	3047	3476	3275	3375	10
1	200	2184	2263	2238	2211	1	1	600	2653	3046	3202	3248	11
1	200	2450	2802	2903	2893	2	1	600	2928	3314	3291	2989	12
1	200	2376	2602	2692	2907	3	1	600	2599	2783	2907	2826	13
1	200	3080	3320	3481	3382	4	1	600	2851	2943	2935	2961	14
1	200	2508	2841	2919	2894	5	1	600	2952	3213	3267	3004	15
1	200	2968	3411	3555	3613	6	1	600	2772	2838	2869	2860	16
1	200	2375	2670	2770	2823	7	1	600	2432	2548	2501	2449	17
1	200	1904	2135	2068	2083	8	1	600	2652	3092	3264	3472	18
1	200	2337	2685	2727	2732	9	1	600	2619	3031	3082	2812	19
1	200	2929	3192	3244	3369	10	1	600	2558	2808	2767	2875	20
1	200	2409	2870	3098	3208	11	2	0	1941	2203	2287	2266	1
1	200	2681	3039	3123	3173	12	2	0	2137	2661	2780	2919	2
1	200	2417	2715	2812	2797	13	2	0	2255	2593	2706	2659	3
1	200	2789	2872	2892	2930	14	2	0	2544	3305	3347	3584	4
1	200	2682	2956	3221	2946	15	2	0	2342	2876	2994	3165	5
1	200	2372	2735	2804	2887	16	2	0	2665	3308	3976	3713	6
1	200	2188	2472	2490	2394	17	2	0	2010	2396	2402	2443	7
1	200	2243	2967	3292	3254	18	2	0	2177	2580	2733	2705	8
1	200	2576	2832	2930	2958	19	2	0	2224	2742	2852	2843	9
1	200	2392	2639	2677	2778	20	2	0	2365	3006	3204	3400	10
1	400	2269	2275	2242	2214	1	2	0	2166	2670	2823	2807	11
1	400	2644	2902	2932	2998	2	2	0	2423	2933	3147	2867	12
1	400	2597	2647	2756	2695	3	2	0	2285	2744	2972	2847	13
1	400	3230	3360	3461	3427	4	2	0	2213	2521	2688	2657	14
1	400	2651	2905	2956	2953	5	2	0	2422	2959	3475	3285	15
1	400	3193	3417	3565	3650	6	2	0	2312	2659	2897	2977	16
1	400	2469	2707	2724	2866	7	2	0	2355	3158	3613	3752	17
1	400	2087	2099	2074	2093	8	2	0	2109	2533	2687	2744	18
1	400	2326	2767	2802	2793	9	2	0	1961	2477	2526	2559	19
1	400	2993	3291	3223	3278	10	2	0	2457	3050	3346	3515	20

Tablo E.1 : Kural A için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
2	200	2058	2263	2274	2287	1	2	600	2669	2819	2908	2991	11
2	200	2330	2772	2909	2926	2	2	600	2841	2921	2859	2827	12
2	200	2380	2652	2703	2705	3	2	600	2669	2901	2885	2916	13
2	200	2672	3228	3574	3669	4	2	600	2536	2710	2733	2710	14
2	200	2498	2932	3054	3216	5	2	600	3048	3508	3520	3346	15
2	200	2806	3625	3711	3833	6	2	600	2753	2798	2912	2721	16
2	200	2127	2440	2422	2479	7	2	600	3001	3625	3967	3924	17
2	200	2339	2615	2785	2772	8	2	600	2698	2710	2888	2884	18
2	200	2401	2686	2818	2916	9	2	600	2334	2626	2768	2733	19
2	200	2552	3139	3320	3454	10	2	600	3050	3315	3573	3482	20
2	200	2371	2778	2858	2857	11	3	0	2000	2319	2338	2229	1
2	200	2542	2911	3045	2874	12	3	0	2350	3074	3262	3408	2
2	200	2470	2860	2836	2862	13	3	0	2258	2817	2813	2908	3
2	200	2412	2617	2754	2667	14	3	0	2399	3206	3714	4056	4
2	200	2649	3397	3333	3351	15	3	0	2414	3254	3365	3508	5
2	200	2381	2672	2835	2923	16	3	0	2316	3177	3808	3894	6
2	200	2553	3210	3737	4106	17	3	0	2247	2580	2705	2613	7
2	200	2314	2518	2730	2804	18	3	0	2294	2875	3059	3023	8
2	200	2083	2591	2716	2583	19	3	0	2044	2900	3057	3389	9
2	200	2642	3115	3362	3570	20	3	0	2160	3158	3681	3898	10
2	400	2200	2322	2249	2309	1	3	0	2505	3120	3256	3263	11
2	400	2435	2723	2950	3076	2	3	0	1942	2447	2678	2714	12
2	400	2478	2645	2763	2748	3	3	0	2237	2769	3034	3052	13
2	400	2881	3445	3657	3674	4	3	0	2491	3139	3640	3933	14
2	400	2740	3144	3136	3263	5	3	0	2182	2815	2907	2952	15
2	400	3130	3632	3756	3808	6	3	0	2526	2976	3637	3439	16
2	400	2279	2513	2457	2511	7	3	0	2051	3106	3320	3531	17
2	400	2475	2766	2753	2775	8	3	0	2067	2724	2768	3036	18
2	400	2543	2806	2849	3037	9	3	0	2279	2935	3402	3466	19
2	400	2756	3292	3430	3377	10	3	0	2025	2576	2788	2911	20
2	400	2491	2788	2882	2914	11	3	200	2126	2341	2336	2234	1
2	400	2696	3003	3006	2876	12	3	200	2576	3202	3328	3542	2
2	400	2594	2855	2953	3011	13	3	200	2404	2816	2882	2923	3
2	400	2490	2655	2551	2662	14	3	200	2619	3340	3789	4137	4
2	400	2896	3357	3188	3466	15	3	200	2670	3308	3463	3610	5
2	400	2574	2823	2865	2944	16	3	200	2597	3544	3964	3931	6
2	400	2741	3575	3973	3908	17	3	200	2391	2611	2734	2635	7
2	400	2422	2808	3033	2689	18	3	200	2430	2998	3084	3071	8
2	400	2247	2551	2720	2636	19	3	200	2321	2924	3131	3360	9
2	400	2884	3208	3482	3657	20	3	200	2442	3313	3653	3955	10
2	600	2306	2362	2270	2225	1	3	200	2734	3187	3382	3312	11
2	600	2610	2903	2915	2977	2	3	200	2198	2530	2711	2719	12
2	600	2523	2669	2712	2755	3	3	200	2406	2832	3029	3165	13
2	600	3178	3522	3662	3908	4	3	200	2690	3286	3581	3932	14
2	600	2870	3198	3179	3341	5	3	200	2337	2835	3042	3127	15
2	600	3347	3703	3809	3949	6	3	200	2714	3178	3316	3416	16
2	600	2333	2468	2483	2542	7	3	200	2271	3202	3481	3555	17
2	600	2576	2770	2806	2823	8	3	200	2288	2806	2944	2946	18
2	600	2710	2859	2918	2878	9	3	200	2513	3156	3260	3552	19
2	600	3053	3430	3305	3503	10	3	200	2076	2606	2917	3090	20

Tablo E.1 : Kural A için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
3	400	2192	2337	2235	2240	1	4	0	2241	3043	3427	3740	11
3	400	2758	3377	3363	3375	2	4	0	2362	3072	3221	3492	12
3	400	2533	2883	3031	3091	3	4	0	2228	3023	3460	3752	13
3	400	2908	3539	3828	4047	4	4	0	2223	3019	3366	3750	14
3	400	2895	3278	3581	3773	5	4	0	2314	2859	3198	3262	15
3	400	2893	3597	4048	4061	6	4	0	2290	3669	4220	4749	16
3	400	2553	2717	2714	2817	7	4	0	2543	3495	3853	4127	17
3	400	2641	3015	3199	3428	8	4	0	2108	3074	3549	3769	18
3	400	2464	2987	3214	3475	9	4	0	1978	2730	3099	3213	19
3	400	2584	3425	3789	4064	10	4	0	2303	3132	3366	3487	20
3	400	2807	3239	3441	3451	11	4	200	2105	2336	2448	2365	1
3	400	2286	2646	2895	2708	12	4	200	2684	3289	3672	3605	2
3	400	2670	2983	2958	3291	13	4	200	2309	2806	3010	3023	3
3	400	2676	3507	3659	3986	14	4	200	2467	3575	4174	4327	4
3	400	2621	2924	3118	3254	15	4	200	3017	4066	4451	4461	5
3	400	2696	3292	3399	3299	16	4	200	2510	3147	3399	3648	6
3	400	2722	3299	3549	3625	17	4	200	2325	2716	2649	2701	7
3	400	2529	2997	3107	2957	18	4	200	2426	2908	3149	3288	8
3	400	2654	3258	3477	3584	19	4	200	2633	3784	4202	4679	9
3	400	2199	2777	3014	3030	20	4	200	2300	3105	3553	3777	10
3	600	2285	2416	2232	2244	1	4	200	2475	3097	3622	3655	11
3	600	3036	3491	3506	3448	2	4	200	2607	3081	3331	3343	12
3	600	2731	2775	2974	3150	3	4	200	2453	3147	3498	3792	13
3	600	3142	3687	4018	4084	4	4	200	2506	3159	3470	3734	14
3	600	3002	3476	3565	3847	5	4	200	2490	2966	3137	3273	15
3	600	3157	3758	3881	3963	6	4	200	2558	3888	4423	4816	16
3	600	2570	2744	2628	2878	7	4	200	2824	3681	3952	4259	17
3	600	2764	3180	3113	3178	8	4	200	2353	3055	3636	3840	18
3	600	2743	3165	3326	3603	9	4	200	2229	2920	3127	3351	19
3	600	3050	3618	3856	4191	10	4	200	2572	3305	3626	3673	20
3	600	3073	3359	3391	3522	11	4	400	2181	2375	2435	2368	1
3	600	2467	2790	2723	2718	12	4	400	2908	3351	3797	3697	2
3	600	2777	3065	3096	3306	13	4	400	2496	2879	3037	3050	3
3	600	3087	3650	3563	4137	14	4	400	2773	3799	4222	4406	4
3	600	2677	2987	2980	3366	15	4	400	3317	4209	4324	4570	5
3	600	3238	3418	3567	3359	16	4	400	2769	3312	3502	3685	6
3	600	2623	3498	3683	3677	17	4	400	2477	2759	2795	2731	7
3	600	2708	2942	3141	2999	18	4	400	2634	3097	3174	3345	8
3	600	2993	3192	3618	3631	19	4	400	3144	3770	4339	4765	9
3	600	2411	2781	3196	3085	20	4	400	2516	3196	3545	3845	10
4	0	1987	2293	2396	2367	1	4	400	2763	3288	3633	3609	11
4	0	2425	3218	3441	3544	2	4	400	2762	3354	3357	3507	12
4	0	2158	2684	2979	3006	3	4	400	2704	3254	3660	3924	13
4	0	2206	3439	4034	4191	4	4	400	2617	3465	3676	3499	14
4	0	2726	3782	4319	4415	5	4	400	2575	3221	3234	3464	15
4	0	2255	2990	3330	3573	6	4	400	2853	4149	4741	4915	16
4	0	2158	2550	2672	2686	7	4	400	3089	3902	4221	4423	17
4	0	2189	2833	3106	3211	8	4	400	2557	3237	3480	3831	18
4	0	2337	3673	4157	4550	9	4	400	2420	3031	3339	3327	19
4	0	2062	2853	3566	3817	10	4	400	2778	3472	3654	3654	20

Tablo E.1 : Kural A için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
4	600	2247	2393	2413	2369	1	5	200	2436	3017	3402	3645	11
4	600	3138	3472	3894	3778	2	5	200	2374	3429	3984	4480	12
4	600	2677	2925	3032	3104	3	5	200	2846	4196	5291	5956	13
4	600	3113	4025	4471	4483	4	5	200	2447	3292	3656	3770	14
4	600	3541	4392	4384	4643	5	5	200	2777	4618	5708	6390	15
4	600	2895	3404	3601	3766	6	5	200	2703	3676	4148	4359	16
4	600	2711	2789	2837	2781	7	5	200	2460	3488	4008	4413	17
4	600	2763	3130	3238	3426	8	5	200	3015	4892	5591	6377	18
4	600	3222	4192	4479	4788	9	5	200	2884	3583	4088	4386	19
4	600	2715	3442	3726	3868	10	5	200	2623	3952	4665	5179	20
4	600	2876	3555	3679	3688	11	5	400	2203	2588	2747	2696	1
4	600	2971	3310	3412	3608	12	5	400	2906	3767	4139	4408	2
4	600	2957	3481	3701	3969	13	5	400	2628	3161	3489	3454	3
4	600	3011	3358	3672	3581	14	5	400	3277	4623	5163	5591	4
4	600	2795	3095	3297	3500	15	5	400	3698	4796	5291	5464	5
4	600	3396	4356	4724	4933	16	5	400	2473	3321	3809	3825	6
4	600	3463	3897	4339	4321	17	5	400	2580	3004	3188	3423	7
4	600	2628	3316	3478	3820	18	5	400	3139	4035	4164	4648	8
4	600	2659	3142	3478	3283	19	5	400	3513	4550	5047	5503	9
4	600	3040	3490	3663	3845	20	5	400	2736	3563	4010	4279	10
5	0	1966	2383	2679	2693	1	5	400	2836	3145	3494	3824	11
5	0	2277	3234	3862	4208	2	5	400	2795	3504	4158	4247	12
5	0	2205	2907	3119	3383	3	5	400	3537	4641	5421	6095	13
5	0	2425	4069	4980	5445	4	5	400	2816	3563	3697	4021	14
5	0	3018	4312	5078	5418	5	5	400	3334	5013	6077	6962	15
5	0	1940	2887	3483	3680	6	5	400	2958	3837	4182	4477	16
5	0	2154	2652	3104	2952	7	5	400	2689	3585	4080	4196	17
5	0	2438	3607	3983	4417	8	5	400	3666	5392	6145	6578	18
5	0	2436	4221	4684	5339	9	5	400	3057	3820	4270	4414	19
5	0	2123	3184	3811	4050	10	5	400	2879	4045	4774	5260	20
5	0	2021	3131	3259	3741	11	5	600	2308	2731	2762	2724	1
5	0	2223	3153	3826	4296	12	5	600	3205	4041	4373	4362	2
5	0	2421	4198	4876	5932	13	5	600	2802	3126	3517	3493	3
5	0	2102	3196	3498	3898	14	5	600	3796	4897	5334	5718	4
5	0	2423	4432	5332	6615	15	5	600	4187	4931	5408	5776	5
5	0	2339	3505	3949	4339	16	5	600	2628	3546	3803	3957	6
5	0	2250	3160	3846	4096	17	5	600	2839	3051	3273	3315	7
5	0	2640	4160	5438	6104	18	5	600	3458	4305	4481	4655	8
5	0	2446	3611	3888	4602	19	5	600	3753	4801	5354	5644	9
5	0	2279	3647	4138	5029	20	5	600	2950	3752	4089	4393	10
5	200	2111	2476	2685	2658	1	5	600	2819	3354	3681	3931	11
5	200	2574	3528	4082	4392	2	5	600	2800	3721	4373	4384	12
5	200	2424	3106	3228	3446	3	5	600	3878	5032	5905	6300	13
5	200	2793	4359	4968	5522	4	5	600	2987	3618	3766	4027	14
5	200	3375	4552	5246	5542	5	5	600	3925	5547	6407	6899	15
5	200	2204	3020	3589	3826	6	5	600	3251	4035	4345	4414	16
5	200	2389	2927	3165	2990	7	5	600	2912	3692	4153	4371	17
5	200	2863	3905	4130	4513	8	5	600	4082	5837	6561	6868	18
5	200	3032	4278	5003	5347	9	5	600	3481	4012	4392	4434	19
5	200	2369	3404	3898	4203	10	5	600	3130	4314	4854	5294	20

Tablo E.2 : Kural B için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
1	0	2118	2900	3943	5004	1	1	400	2747	3840	5018	5096	11
1	0	2322	3151	4974	6051	2	1	400	3057	3939	5434	6388	12
1	0	2330	3200	4083	4451	3	1	400	2880	3996	4697	6194	13
1	0	3084	3846	4344	5177	4	1	400	3121	4191	5241	8087	14
1	0	2458	3887	4786	5203	5	1	400	2917	4019	4799	5749	15
1	0	2800	4166	4658	5365	6	1	400	2794	3827	4515	5484	16
1	0	2235	3111	4329	5433	7	1	400	2480	3338	4406	5811	17
1	0	1864	2864	3819	4374	8	1	400	2634	4296	5034	5716	18
1	0	2150	3301	4087	4515	9	1	400	2727	3883	4990	6332	19
1	0	2817	4119	4598	5886	10	1	400	2716	3787	5207	5913	20
1	0	2228	3696	4318	5033	11	1	600	2571	3384	4727	5435	1
1	0	2625	3747	4423	5899	12	1	600	3092	3918	5616	6000	2
1	0	2341	3562	4236	5670	13	1	600	3035	3900	4550	5333	3
1	0	2602	3711	5457	6438	14	1	600	3572	4348	5449	6929	4
1	0	2519	3602	4710	5889	15	1	600	3368	4291	4927	5842	5
1	0	2250	3522	4158	5072	16	1	600	3769	4991	5227	6367	6
1	0	2128	3193	4122	6470	17	1	600	2830	3804	4747	6119	7
1	0	2105	3307	5252	5721	18	1	600	2460	3355	4490	5437	8
1	0	2476	3423	4373	5868	19	1	600	2849	3911	4994	5870	9
1	0	2235	3534	4565	4922	20	1	600	3655	4556	5426	5843	10
1	200	2274	3107	4416	5020	1	1	600	3085	4237	5690	5446	11
1	200	2488	3378	4745	6568	2	1	600	3375	4605	5158	6381	12
1	200	2468	3376	3921	5400	3	1	600	2933	4022	4630	6878	13
1	200	3231	4328	4356	7455	4	1	600	3486	4384	6111	8267	14
1	200	2639	3817	4315	5477	5	1	600	3406	4292	5131	6414	15
1	200	3021	4389	4832	5340	6	1	600	3216	3848	4926	5856	16
1	200	2390	3608	4191	5346	7	1	600	2755	3829	5231	5745	17
1	200	2016	2948	4456	4824	8	1	600	3070	4281	5471	5846	18
1	200	2439	3426	3885	6198	9	1	600	3034	4255	5518	6518	19
1	200	3021	4173	5511	6445	10	1	600	3042	3804	4644	5302	20
1	200	2545	3751	4883	5348	11	2	0	1970	2788	3944	4482	1
1	200	2791	4012	5135	5445	12	2	0	2195	3014	3955	5061	2
1	200	2448	3558	4747	5896	13	2	0	2270	3089	4496	4608	3
1	200	2734	4589	5995	6139	14	2	0	2606	3751	5724	6376	4
1	200	2682	3770	4747	6193	15	2	0	2373	3317	4434	5492	5
1	200	2374	3340	4644	5742	16	2	0	2757	3884	5361	6524	6
1	200	2267	3258	4228	5317	17	2	0	2040	2882	3508	4285	7
1	200	2338	3742	4883	5640	18	2	0	2180	3290	4113	5951	8
1	200	2674	3480	5197	6448	19	2	0	2195	3300	4229	4917	9
1	200	2420	3517	4537	6257	20	2	0	2443	3787	4651	5603	10
1	400	2425	3324	4902	5489	1	2	0	2144	3358	4203	4925	11
1	400	2778	3592	5423	5466	2	2	0	2376	3601	4895	5688	12
1	400	2833	3703	4491	4712	3	2	0	2387	3620	4975	5155	13
1	400	3379	4151	4474	7040	4	2	0	2218	3558	4231	4694	14
1	400	2908	3839	4709	5771	5	2	0	2631	4431	5276	5784	15
1	400	3303	4606	5159	5458	6	2	0	2343	3278	4448	5763	16
1	400	2646	3570	4363	6462	7	2	0	2204	3703	5288	5696	17
1	400	2215	3151	4299	4773	8	2	0	2106	3257	3903	5855	18
1	400	2641	4196	4457	5905	9	2	0	2063	3170	4416	5244	19
1	400	3299	4414	4954	7354	10	2	0	2540	3684	5370	5738	20

Tablo E.2 : Kural B için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
2	200	2152	2992	4137	4705	1	2	600	2874	4337	4415	5998	11
2	200	2427	3294	4933	4853	2	2	600	3276	4786	5320	6766	12
2	200	2505	3288	4689	5537	3	2	600	3126	4598	4624	6094	13
2	200	2663	4138	4702	6510	4	2	600	2858	3638	4479	5498	14
2	200	2624	3736	4536	4947	5	2	600	3733	5245	6375	10909	15
2	200	2864	4305	5146	6605	6	2	600	3018	3996	4581	5862	16
2	200	2329	2946	3903	4628	7	2	600	3044	4293	5920	6335	17
2	200	2425	3202	4267	5702	8	2	600	3370	4171	5130	5841	18
2	200	2540	3412	4261	5978	9	2	600	2822	4204	4882	5786	19
2	200	2624	4018	4519	7761	10	2	600	3080	4412	5049	5949	20
2	200	2498	3239	4562	6200	11	3	0	2001	2823	3671	4943	1
2	200	2638	3965	4980	6310	12	3	0	2382	3437	4704	6001	2
2	200	2536	3613	4562	5671	13	3	0	2263	3341	4396	5904	3
2	200	2535	3288	3935	5759	14	3	0	2378	4182	4504	6182	4
2	200	2962	4294	5116	7426	15	3	0	2483	3709	5938	6692	5
2	200	2510	3678	4775	4989	16	3	0	2293	3992	5152	7795	6
2	200	2619	4006	5115	6323	17	3	0	2325	3200	3780	5130	7
2	200	2504	3933	4158	4909	18	3	0	2399	3474	4148	4759	8
2	200	2293	3452	4670	5015	19	3	0	2097	3584	4605	7539	9
2	200	2767	4151	5034	5047	20	3	0	2076	3765	5402	6153	10
2	400	2432	3406	3912	4785	1	3	0	2424	4023	4751	5768	11
2	400	2786	3600	4541	4960	2	3	0	1956	3312	4112	4782	12
2	400	2813	3774	4247	5639	3	3	0	2300	3393	5037	5182	13
2	400	3202	4217	5265	6129	4	3	0	2375	3954	5694	7156	14
2	400	2969	4060	5736	5598	5	3	0	2346	3241	4675	5248	15
2	400	3311	4815	5445	6899	6	3	0	2462	3401	4983	5869	16
2	400	2415	3329	4573	5870	7	3	0	2186	3798	4386	6044	17
2	400	2701	3514	4048	6169	8	3	0	2125	3296	4670	4617	18
2	400	2779	3892	5133	6310	9	3	0	2141	3314	4671	6208	19
2	400	2971	4395	4711	6558	10	3	0	1907	3414	4805	5283	20
2	400	2648	3633	4183	5777	11	3	200	2143	3158	3755	4864	1
2	400	2857	3927	4949	5955	12	3	200	2686	3935	4935	6034	2
2	400	2852	4228	4790	6202	13	3	200	2487	3702	4601	5731	3
2	400	2740	3950	5042	5615	14	3	200	2741	4161	5281	6164	4
2	400	3130	4476	8344	7898	15	3	200	2704	3942	4882	6662	5
2	400	2785	3848	4605	5388	16	3	200	2681	3942	5687	6447	6
2	400	2850	4101	4755	6348	17	3	200	2483	3089	3930	4780	7
2	400	2597	4163	4996	6416	18	3	200	2607	3711	4353	5178	8
2	400	2446	3622	4778	5240	19	3	200	2385	3713	4320	6398	9
2	400	3049	3956	4591	6520	20	3	200	2426	4073	6022	6800	10
2	600	2748	3588	4030	4978	1	3	200	2765	3932	4588	6089	11
2	600	2969	3698	5145	5538	2	3	200	2357	3547	4544	6248	12
2	600	2919	4198	4826	5496	3	3	200	2503	3795	4959	7473	13
2	600	3259	4424	5284	6739	4	3	200	2754	4364	6031	8484	14
2	600	3082	4272	4842	5305	5	3	200	2522	3670	4565	5849	15
2	600	3594	4692	5286	7483	6	3	200	2801	4031	5585	6508	16
2	600	2603	3458	4396	4497	7	3	200	2334	3913	4653	5146	17
2	600	2929	3754	4682	6830	8	3	200	2388	3437	4223	5540	18
2	600	2929	4061	4565	5904	9	3	200	2543	3592	4952	5633	19
2	600	3378	4471	5277	5988	10	3	200	2248	3722	4136	5038	20

Tablo E.2 : Kural B için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
3	400	2406	3245	4153	4997	1	4	0	2280	3670	4495	5493	11
3	400	2953	4421	5322	6112	2	4	0	2362	3765	4974	4848	12
3	400	2644	3658	4401	6061	3	4	0	2178	3561	4568	5381	13
3	400	2996	4130	5819	6668	4	4	0	2190	3658	4833	6168	14
3	400	3122	4459	5429	6067	5	4	0	2381	3716	4311	5046	15
3	400	3053	4414	5998	6883	6	4	0	2296	4080	5909	7647	16
3	400	2749	3632	4437	5052	7	4	0	2643	4229	4769	6074	17
3	400	2918	3861	4467	5398	8	4	0	2099	3280	5059	5895	18
3	400	2759	4122	5021	6248	9	4	0	2007	3573	4646	5901	19
3	400	2875	4826	5622	6084	10	4	0	2330	3679	4581	5937	20
3	400	3199	4017	4771	6037	11	4	200	2261	3325	4017	5097	1
3	400	2560	3403	4561	5171	12	4	200	2914	4172	4914	6877	2
3	400	2860	3712	5326	5671	13	4	200	2464	3379	4258	5753	3
3	400	3088	4567	6818	7018	14	4	200	2592	4427	5391	6369	4
3	400	2710	3975	5492	6511	15	4	200	3135	4366	5832	6318	5
3	400	2895	4431	5037	6611	16	4	200	2613	3955	5349	6221	6
3	400	2925	3921	5045	5093	17	4	200	2347	3225	4094	4322	7
3	400	2684	3837	4564	5606	18	4	200	2610	3708	4801	5198	8
3	400	2848	4562	5464	6814	19	4	200	2871	4324	5860	6818	9
3	400	2477	3574	4528	7804	20	4	200	2254	3826	4722	6090	10
3	600	2682	3479	4083	4885	1	4	200	2673	4189	5264	5813	11
3	600	3427	5227	5337	6721	2	4	200	2613	3786	4994	6601	12
3	600	2906	4105	4356	6230	3	4	200	2523	3841	4943	5434	13
3	600	3439	4445	5930	7026	4	4	200	2475	4209	5458	5603	14
3	600	3585	4272	4876	5987	5	4	200	2612	3487	4849	6004	15
3	600	3498	4523	6250	9341	6	4	200	2720	4836	6136	7839	16
3	600	2816	3601	4768	6025	7	4	200	2909	4622	5955	6049	17
3	600	3166	4211	4895	5793	8	4	200	2431	3624	4403	5229	18
3	600	3124	4848	5529	6151	9	4	200	2368	3931	4534	6298	19
3	600	3493	4258	4998	6720	10	4	200	2559	3836	5371	5402	20
3	600	3287	4242	4996	5689	11	4	400	2503	3478	3918	4324	1
3	600	2836	3830	4857	5317	12	4	400	3248	4376	5286	6690	2
3	600	3019	4126	4455	6585	13	4	400	2650	3541	4808	5162	3
3	600	3369	4857	7421	8401	14	4	400	2969	4501	5823	8152	4
3	600	2933	4181	5276	7240	15	4	400	3410	4816	6269	6751	5
3	600	3407	4322	5412	7110	16	4	400	2899	4240	5630	5920	6
3	600	3067	4134	4982	5753	17	4	400	2530	3462	3986	5166	7
3	600	3075	3865	5193	6064	18	4	400	2835	4326	4969	5617	8
3	600	3379	4515	5739	6614	19	4	400	3166	5075	6555	7086	9
3	600	2692	3837	4891	7166	20	4	400	2643	4002	5363	6036	10
4	0	2080	3044	4139	4784	1	4	400	2958	4416	5038	6672	11
4	0	2603	3580	5461	5751	2	4	400	2944	4234	5184	6273	12
4	0	2222	3235	4069	5110	3	4	400	2819	4040	5322	7119	13
4	0	2368	4015	5349	6715	4	4	400	2816	4082	4944	6803	14
4	0	2775	4027	6454	6428	5	4	400	2947	3743	4702	6020	15
4	0	2240	3766	4880	5327	6	4	400	3106	5795	6396	10197	16
4	0	2198	3149	3834	5088	7	4	400	3200	4516	5861	6423	17
4	0	2292	3423	4700	5352	8	4	400	2721	3757	5181	5745	18
4	0	2448	4057	6049	5963	9	4	400	2565	4132	4787	6105	19
4	0	1960	3499	5185	5502	10	4	400	2904	4539	5206	6135	20

Tablo E.2 : Kural B için ortalama iş akış süresi (dakika) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama İş Akış Süresi Sonuçları [dakika]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
4	600	2621	3433	4075	5199	1	5	200	2319	4401	5762	5739	11
4	600	3562	4656	5541	6837	2	5	200	2617	4266	5246	6484	12
4	600	2868	3711	5042	5998	3	5	200	2845	5939	7444	9106	13
4	600	3492	5060	6794	6782	4	5	200	2606	4301	4727	5917	14
4	600	3787	5640	7540	6389	5	5	200	2655	5117	6303	7969	15
4	600	3287	4428	5449	6829	6	5	200	2596	4358	5319	7853	16
4	600	2708	3544	4349	5452	7	5	200	2674	4074	5492	5781	17
4	600	2853	4104	5256	5441	8	5	200	3432	5299	7413	10342	18
4	600	3492	5540	6434	7718	9	5	200	2704	4499	6108	6060	19
4	600	3090	4541	6454	8696	10	5	200	2565	4251	5654	6212	20
4	600	3390	4502	4942	6793	11	5	400	2447	3451	4843	4957	1
4	600	3402	5040	5177	6591	12	5	400	3046	4744	5796	6656	2
4	600	3345	4453	5874	6953	13	5	400	2734	3733	4629	5986	3
4	600	3306	4901	6154	9586	14	5	400	3627	5647	7859	7874	4
4	600	3067	4732	5093	5599	15	5	400	3929	5708	6292	7240	5
4	600	3797	5663	6756	7325	16	5	400	2574	3952	4895	5543	6
4	600	3716	4708	5975	6475	17	5	400	2758	3710	4738	5644	7
4	600	2965	4271	5386	5674	18	5	400	3352	4892	6025	6270	8
4	600	2944	4311	5472	6030	19	5	400	3481	5677	6528	8577	9
4	600	3259	4178	5286	6319	20	5	400	2840	4507	5880	9103	10
5	0	1994	3189	4365	4903	1	5	400	2671	4246	5458	5448	11
5	0	2281	3915	5516	7122	2	5	400	3010	4552	5931	7681	12
5	0	2196	3468	4367	5493	3	5	400	3152	7421	7500	9561	13
5	0	2417	4784	5934	7992	4	5	400	2856	4713	5084	7595	14
5	0	3064	4928	6687	7344	5	5	400	3198	5557	6905	7707	15
5	0	1950	3365	4365	5422	6	5	400	2956	4435	5792	6216	16
5	0	2150	3338	4291	5304	7	5	400	3025	4239	5637	5810	17
5	0	2411	4385	5477	6258	8	5	400	4079	5932	7489	9139	18
5	0	2565	4479	6877	7310	9	5	400	3214	5134	5686	6998	19
5	0	2115	3671	5461	7367	10	5	400	2912	4730	5859	6522	20
5	0	2049	3759	4815	6017	11	5	600	2672	3915	4312	5548	1
5	0	2276	3586	5372	6031	12	5	600	3622	4660	6198	7211	2
5	0	2391	4657	7867	8658	13	5	600	3053	4716	5111	5932	3
5	0	2161	4067	4745	6452	14	5	600	4089	5608	7347	7571	4
5	0	2399	4981	6209	7736	15	5	600	4456	5860	7606	7891	5
5	0	2387	3704	5290	6129	16	5	600	2742	4123	4890	6180	6
5	0	2303	3889	5109	5412	17	5	600	3035	4077	5299	6116	7
5	0	2839	5242	6153	9326	18	5	600	3779	5279	6068	6740	8
5	0	2524	3975	5600	6408	19	5	600	3860	5723	7234	8013	9
5	0	2309	4040	5862	5889	20	5	600	3142	4776	6923	6449	10
5	200	2226	3243	4064	5977	1	5	600	3202	4724	5052	5753	11
5	200	2628	4515	5238	6291	2	5	600	3299	4927	7520	6458	12
5	200	2390	3469	4296	5683	3	5	600	4153	7289	8294	8563	13
5	200	2899	5084	6766	7663	4	5	600	3524	5168	5623	8803	14
5	200	3456	5160	6243	8152	5	5	600	4161	6236	7184	7933	15
5	200	2228	3510	4566	5162	6	5	600	3458	4762	5776	6365	16
5	200	2420	3610	4644	5646	7	5	600	3579	5473	6106	7250	17
5	200	2853	4348	5538	6499	8	5	600	4570	6592	7956	8621	18
5	200	3058	5351	6806	7734	9	5	600	3636	5146	6114	6619	19
5	200	2343	4346	5847	8104	10	5	600	3252	5025	5547	6606	20

Tablo E.3 : Kural A için ortalama proses içi stok (parça adedi) düzeyi sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
1	0	73	79	78	77	1	1	400	91	108	117	119	11
1	0	81	94	100	99	2	1	400	109	118	121	121	12
1	0	81	92	93	100	3	1	400	91	97	101	102	13
1	0	119	131	134	132	4	1	400	105	113	112	111	14
1	0	92	106	114	110	5	1	400	103	112	116	108	15
1	0	108	126	132	137	6	1	400	89	96	96	99	16
1	0	83	96	100	101	7	1	400	85	87	86	84	17
1	0	64	71	70	70	8	1	400	94	113	118	120	18
1	0	76	90	90	92	9	1	400	95	105	110	117	19
1	0	108	122	123	131	10	1	400	95	100	101	95	20
1	0	80	97	110	117	11	1	600	81	79	78	77	1
1	0	97	111	118	118	12	1	600	96	102	100	104	2
1	0	84	101	100	99	13	1	600	95	94	102	96	3
1	0	103	111	112	111	14	1	600	126	133	137	131	4
1	0	94	109	116	108	15	1	600	104	111	112	113	5
1	0	78	91	97	97	16	1	600	123	132	141	143	6
1	0	74	84	85	86	17	1	600	94	100	99	94	7
1	0	76	106	115	115	18	1	600	70	71	70	71	8
1	0	90	101	106	113	19	1	600	90	95	92	93	9
1	0	81	96	98	102	20	1	600	118	133	127	130	10
1	200	76	78	77	77	1	1	600	98	110	116	116	11
1	200	86	97	99	99	2	1	600	111	123	124	114	12
1	200	85	92	95	102	3	1	600	94	100	104	101	13
1	200	122	130	137	133	4	1	600	109	113	112	112	14
1	200	96	108	111	111	5	1	600	108	117	119	109	15
1	200	114	130	134	137	6	1	600	97	98	99	98	16
1	200	87	98	102	103	7	1	600	86	89	87	85	17
1	200	66	72	70	70	8	1	600	97	111	118	125	18
1	200	81	92	93	93	9	1	600	96	113	114	103	19
1	200	114	123	126	132	10	1	600	95	102	102	105	20
1	200	89	105	112	117	11	2	0	68	75	78	77	1
1	200	102	114	118	120	12	2	0	79	96	99	103	2
1	200	89	98	101	100	13	2	0	83	93	96	96	3
1	200	109	110	111	112	14	2	0	102	128	128	138	4
1	200	100	108	117	108	15	2	0	94	112	117	124	5
1	200	84	96	97	100	16	2	0	104	127	152	141	6
1	200	78	86	86	83	17	2	0	71	83	82	83	7
1	200	83	108	118	117	18	2	0	80	92	97	96	8
1	200	97	105	108	110	19	2	0	84	100	100	104	9
1	200	88	97	98	102	20	2	0	88	110	118	123	10
1	400	79	79	78	77	1	2	0	83	100	104	103	11
1	400	91	99	100	102	2	2	0	91	109	118	107	12
1	400	92	93	97	95	3	2	0	85	99	106	102	13
1	400	127	132	136	135	4	2	0	83	93	97	98	14
1	400	102	110	113	113	5	2	0	95	113	134	124	15
1	400	123	130	136	138	6	2	0	87	98	107	109	16
1	400	91	99	99	104	7	2	0	85	112	128	131	17
1	400	71	71	70	71	8	2	0	79	93	97	99	18
1	400	80	94	95	94	9	2	0	71	87	88	90	19
1	400	117	127	125	128	10	2	0	99	122	133	138	20

Tablo E.3 : Kural A için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı
		0	250	500	750				0	250	500	750	
2	200	71	77	78	77	1	2	600	100	104	107	110	11
2	200	84	99	103	103	2	2	600	105	109	106	107	12
2	200	86	95	97	97	3	2	600	97	104	103	104	13
2	200	106	124	138	140	4	2	600	94	100	100	99	14
2	200	99	114	119	126	5	2	600	117	133	135	128	15
2	200	109	140	141	145	6	2	600	101	103	107	99	16
2	200	74	84	83	84	7	2	600	107	127	137	138	17
2	200	85	93	99	98	8	2	600	98	98	104	105	18
2	200	89	95	104	107	9	2	600	82	92	97	95	19
2	200	95	116	121	126	10	2	600	121	131	139	137	20
2	200	90	102	106	106	11	3	0	71	80	80	77	1
2	200	95	109	113	108	12	3	0	87	112	116	121	2
2	200	91	103	102	103	13	3	0	82	101	101	104	3
2	200	91	97	102	98	14	3	0	96	124	143	154	4
2	200	104	132	127	127	15	3	0	101	133	136	142	5
2	200	89	97	104	108	16	3	0	89	119	140	142	6
2	200	93	116	131	142	17	3	0	83	93	97	94	7
2	200	85	91	99	101	18	3	0	86	104	109	108	8
2	200	74	91	95	91	19	3	0	77	106	111	122	9
2	200	106	124	132	140	20	3	0	80	113	130	138	10
2	400	75	79	77	78	1	3	0	98	121	126	127	11
2	400	88	97	104	107	2	3	0	71	87	95	94	12
2	400	89	95	99	99	3	3	0	86	106	116	116	13
2	400	113	133	140	141	4	3	0	94	116	131	143	14
2	400	107	122	122	127	5	3	0	84	106	109	110	15
2	400	121	139	143	144	6	3	0	101	116	141	131	16
2	400	79	87	84	86	7	3	0	75	109	116	124	17
2	400	89	98	96	98	8	3	0	73	95	96	105	18
2	400	94	103	105	111	9	3	0	90	114	131	133	19
2	400	102	121	125	124	10	3	0	75	91	98	101	20
2	400	94	103	106	107	11	3	200	75	81	80	77	1
2	400	100	111	114	107	12	3	200	94	116	118	125	2
2	400	95	103	105	108	13	3	200	87	101	103	105	3
2	400	92	98	93	98	14	3	200	103	128	145	158	4
2	400	112	128	124	132	15	3	200	111	136	139	146	5
2	400	94	103	105	108	16	3	200	100	131	146	143	6
2	400	99	125	141	136	17	3	200	87	94	98	94	7
2	400	89	102	110	97	18	3	200	90	107	110	109	8
2	400	80	89	95	93	19	3	200	86	107	114	121	9
2	400	115	128	136	143	20	3	200	89	119	130	139	10
2	600	79	80	78	76	1	3	200	106	124	131	129	11
2	600	94	103	102	104	2	3	200	79	90	94	94	12
2	600	91	95	97	99	3	3	200	91	108	116	120	13
2	600	124	136	141	150	4	3	200	101	120	129	142	14
2	600	112	123	124	130	5	3	200	89	107	111	116	15
2	600	128	141	145	149	6	3	200	108	123	129	133	16
2	600	81	84	85	87	7	3	200	82	113	123	126	17
2	600	92	98	98	99	8	3	200	81	98	101	101	18
2	600	99	105	107	106	9	3	200	100	124	125	135	19
2	600	112	126	121	128	10	3	200	75	92	101	106	20

Tablo E.3 : Kural A için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
3	400	76	80	77	77	1	4	0	85	110	122	133	11
3	400	100	121	119	120	2	4	0	96	120	124	134	12
3	400	91	104	108	110	3	4	0	85	112	126	136	13
3	400	113	136	146	154	4	4	0	88	115	129	141	14
3	400	119	133	144	153	5	4	0	86	105	115	116	15
3	400	109	133	148	147	6	4	0	92	144	164	184	16
3	400	93	97	97	101	7	4	0	102	137	150	160	17
3	400	96	107	114	123	8	4	0	81	114	129	137	18
3	400	92	108	116	125	9	4	0	72	99	109	115	19
3	400	94	123	134	144	10	4	0	91	121	130	133	20
3	400	109	125	133	133	11	4	200	73	80	83	81	1
3	400	82	94	100	93	12	4	200	104	125	139	135	2
3	400	103	114	114	125	13	4	200	86	102	109	109	3
3	400	99	128	131	144	14	4	200	100	139	160	166	4
3	400	99	109	114	123	15	4	200	130	169	185	184	5
3	400	106	127	132	128	16	4	200	97	120	128	137	6
3	400	97	116	126	128	17	4	200	87	99	97	98	7
3	400	89	105	105	100	18	4	200	91	106	114	119	8
3	400	104	127	132	136	19	4	200	104	145	159	176	9
3	400	79	96	104	105	20	4	200	86	114	128	137	10
3	600	79	83	77	78	1	4	200	93	113	129	131	11
3	600	110	125	124	122	2	4	200	104	121	128	131	12
3	600	98	99	106	112	3	4	200	92	116	127	138	13
3	600	122	141	153	154	4	4	200	97	120	132	141	14
3	600	124	140	144	156	5	4	200	91	107	112	116	15
3	600	119	138	142	144	6	4	200	102	150	172	186	16
3	600	93	99	94	103	7	4	200	112	145	154	166	17
3	600	100	113	111	113	8	4	200	90	113	132	139	18
3	600	100	114	120	130	9	4	200	79	103	112	117	19
3	600	109	129	137	148	10	4	200	100	126	139	140	20
3	600	118	131	133	135	11	4	400	75	81	83	81	1
3	600	87	98	95	93	12	4	400	112	127	143	139	2
3	600	106	118	117	125	13	4	400	92	105	109	110	3
3	600	113	133	128	150	14	4	400	110	149	163	169	4
3	600	101	112	111	127	15	4	400	140	174	178	188	5
3	600	128	132	136	130	16	4	400	106	125	131	138	6
3	600	93	124	129	130	17	4	400	91	101	100	99	7
3	600	94	101	108	102	18	4	400	97	112	115	121	8
3	600	116	122	139	138	19	4	400	123	144	163	180	9
3	600	85	97	109	106	20	4	400	93	118	128	139	10
4	0	70	79	82	81	1	4	400	101	120	130	129	11
4	0	94	123	130	133	2	4	400	109	131	132	135	12
4	0	81	98	108	108	3	4	400	101	119	133	143	13
4	0	90	135	156	161	4	4	400	101	131	138	131	14
4	0	118	158	180	182	5	4	400	95	116	114	122	15
4	0	89	114	125	134	6	4	400	113	160	181	189	16
4	0	81	93	97	98	7	4	400	122	153	164	172	17
4	0	83	104	113	116	8	4	400	97	118	127	139	18
4	0	93	141	159	171	9	4	400	85	107	115	117	19
4	0	78	105	129	137	10	4	400	108	132	138	139	20

Tablo E.3 : Kural A için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
4	600	78	82	82	81	1	5	200	91	110	122	131	11
4	600	120	130	147	142	2	5	200	95	132	153	172	12
4	600	98	105	109	112	3	5	200	115	165	206	228	13
4	600	123	155	171	171	4	5	200	95	125	138	140	14
4	600	149	182	180	191	5	5	200	110	177	221	247	15
4	600	111	129	134	141	6	5	200	104	138	154	164	16
4	600	99	100	101	100	7	5	200	98	136	153	170	17
4	600	101	113	117	123	8	5	200	122	195	222	249	18
4	600	125	158	169	180	9	5	200	117	142	159	173	19
4	600	100	124	133	139	10	5	200	100	141	166	188	20
4	600	105	128	133	132	11	5	400	79	92	97	94	1
4	600	117	129	134	138	12	5	400	110	140	151	161	2
4	600	109	127	134	145	13	5	400	99	117	129	126	3
4	600	116	127	137	134	14	5	400	132	181	202	218	4
4	600	102	110	116	123	15	5	400	159	203	221	225	5
4	600	132	166	180	190	16	5	400	92	121	137	137	6
4	600	137	152	168	168	17	5	400	95	108	113	124	7
4	600	97	122	127	140	18	5	400	122	154	158	175	8
4	600	95	110	120	115	19	5	400	145	183	201	216	9
4	600	118	132	139	145	2	5	400	103	133	149	155	10
5	0	71	85	95	95	1	5	400	105	114	125	136	11
5	0	89	122	142	154	2	5	400	110	135	159	165	12
5	0	84	109	116	125	3	5	400	140	181	210	235	13
5	0	101	161	196	212	4	5	400	108	135	139	149	14
5	0	134	184	215	224	5	5	400	131	194	233	268	15
5	0	75	106	126	133	6	5	400	114	143	157	168	16
5	0	82	96	110	105	7	5	400	108	138	156	162	17
5	0	98	140	151	166	8	5	400	146	214	243	258	18
5	0	104	172	189	212	9	5	400	123	152	165	172	19
5	0	83	119	141	149	10	5	400	110	147	168	187	20
5	0	78	116	118	136	11	5	600	83	96	97	95	1
5	0	89	123	147	165	12	5	600	121	149	160	160	2
5	0	98	165	190	227	13	5	600	105	116	130	129	3
5	0	83	121	132	146	14	5	600	150	193	208	221	4
5	0	95	175	207	260	15	5	600	179	209	226	239	5
5	0	91	134	148	165	16	5	600	99	129	138	142	6
5	0	92	126	147	157	17	5	600	105	109	119	119	7
5	0	109	168	215	239	18	5	600	133	164	168	174	8
5	0	102	144	151	180	19	5	600	154	193	212	223	9
5	0	87	134	149	183	20	5	600	111	140	150	160	10
5	200	75	88	95	93	1	5	600	104	120	131	141	11
5	200	99	132	150	161	2	5	600	109	142	167	169	12
5	200	92	116	120	127	3	5	600	154	197	228	241	13
5	200	114	171	194	214	4	5	600	113	135	141	148	14
5	200	148	193	221	230	5	5	600	152	211	243	266	15
5	200	84	111	129	139	6	5	600	123	151	162	166	16
5	200	89	105	112	107	7	5	600	114	142	158	168	17
5	200	113	151	157	169	8	5	600	164	230	257	268	18
5	200	127	174	200	213	9	5	600	138	157	170	174	19
5	200	91	127	144	153	10	5	600	115	155	172	190	20

Tablo E.4 : Kural B için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
1	0	74	99	132	167	1	1	400	101	141	181	184	11
1	0	81	109	172	207	2	1	400	115	147	199	232	12
1	0	84	113	143	153	3	1	400	105	144	167	221	13
1	0	122	150	167	197	4	1	400	120	155	196	299	14
1	0	94	147	181	195	5	1	400	108	145	175	209	15
1	0	108	159	177	201	6	1	400	98	132	157	189	16
1	0	82	113	154	191	7	1	400	89	114	150	197	17
1	0	65	95	125	142	8	1	400	96	157	178	202	18
1	0	75	111	136	148	9	1	400	101	143	179	227	19
1	0	111	159	175	226	10	1	400	100	136	192	211	20
1	0	83	136	157	182	11	1	600	88	114	158	181	1
1	0	100	140	164	215	12	1	600	105	133	191	203	2
1	0	86	129	151	202	13	1	600	106	136	156	182	3
1	0	102	139	204	237	14	1	600	141	169	208	267	4
1	0	94	130	171	217	15	1	600	127	161	184	223	5
1	0	80	122	146	175	16	1	600	144	188	199	241	6
1	0	77	110	141	220	17	1	600	103	136	170	215	7
1	0	78	122	187	202	18	1	600	82	110	151	177	8
1	0	94	126	157	212	19	1	600	96	130	165	193	9
1	0	83	129	163	178	20	1	600	142	174	211	226	10
1	200	79	105	147	166	1	1	600	113	153	206	198	11
1	200	87	116	163	225	2	1	600	126	170	191	234	12
1	200	89	117	137	188	3	1	600	106	143	164	243	13
1	200	127	170	167	286	4	1	600	131	163	226	301	14
1	200	100	143	162	205	5	1	600	123	154	187	232	15
1	200	116	166	182	202	6	1	600	112	136	173	203	16
1	200	87	129	151	188	7	1	600	96	131	175	194	17
1	200	70	98	147	154	8	1	600	111	154	193	206	18
1	200	84	116	129	203	9	1	600	112	155	198	239	19
1	200	118	160	212	249	10	1	600	112	138	171	192	20
1	200	93	137	177	194	11	2	0	68	93	131	147	1
1	200	106	149	190	201	12	2	0	80	107	139	179	2
1	200	90	128	172	209	13	2	0	83	108	156	158	3
1	200	106	173	219	229	14	2	0	104	146	217	242	4
1	200	99	138	169	221	15	2	0	94	129	168	205	5
1	200	84	117	158	198	16	2	0	108	148	203	239	6
1	200	80	113	142	175	17	2	0	72	99	119	144	7
1	200	86	135	173	196	18	2	0	80	117	142	210	8
1	200	98	126	187	232	19	2	0	79	119	149	171	9
1	200	90	129	163	225	20	2	0	91	138	171	205	10
1	400	84	113	164	182	1	2	0	80	124	155	177	11
1	400	96	123	185	189	2	2	0	90	133	179	207	12
1	400	100	129	154	163	3	2	0	88	131	178	181	13
1	400	133	162	171	269	4	2	0	84	129	153	171	14
1	400	111	142	179	216	5	2	0	104	167	202	223	15
1	400	127	175	196	208	6	2	0	87	121	161	208	16
1	400	96	129	153	226	7	2	0	82	131	188	206	17
1	400	74	104	143	158	8	2	0	78	117	136	208	18
1	400	90	139	148	193	9	2	0	73	111	156	180	19
1	400	128	168	188	279	10	2	0	102	144	208	219	20

Tablo E.4 : Kural B için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
2	200	74	100	134	155	1	2	600	107	159	159	212	11
2	200	87	116	174	171	2	2	600	121	180	197	244	12
2	200	91	114	163	191	3	2	600	113	166	164	216	13
2	200	105	160	184	246	4	2	600	105	133	160	196	14
2	200	103	142	172	184	5	2	600	142	200	239	405	15
2	200	111	161	192	247	6	2	600	112	143	163	212	16
2	200	81	101	134	158	7	2	600	110	154	212	219	17
2	200	88	112	147	195	8	2	600	120	148	178	205	18
2	200	94	122	151	206	9	2	600	99	146	166	194	19
2	200	97	149	168	282	10	2	600	121	171	196	230	20
2	200	94	119	166	220	11	3	0	71	96	123	164	1
2	200	98	146	183	228	12	3	0	88	124	169	214	2
2	200	92	130	162	201	13	3	0	82	118	153	205	3
2	200	95	120	143	206	14	3	0	95	160	170	234	4
2	200	114	163	197	276	15	3	0	104	152	235	264	5
2	200	93	135	171	177	16	3	0	88	148	191	284	6
2	200	94	144	180	220	17	3	0	84	115	134	182	7
2	200	92	139	146	173	18	3	0	88	126	146	167	8
2	200	81	120	161	174	19	3	0	80	129	164	267	9
2	200	111	164	193	194	20	3	0	77	134	191	217	10
2	400	82	113	128	159	1	3	0	94	154	181	220	11
2	400	99	128	160	174	2	3	0	71	114	143	162	12
2	400	100	133	148	193	3	3	0	89	129	188	191	13
2	400	125	163	200	230	4	3	0	89	143	205	253	14
2	400	117	156	212	210	5	3	0	90	122	172	191	15
2	400	127	183	201	256	6	3	0	98	132	194	226	16
2	400	84	114	154	201	7	3	0	80	133	153	211	17
2	400	97	123	142	214	8	3	0	76	116	159	155	18
2	400	102	138	173	217	9	3	0	86	128	175	229	19
2	400	109	161	169	236	10	3	0	69	117	163	180	20
2	400	99	133	150	210	11	3	200	75	107	126	161	1
2	400	106	144	181	213	12	3	200	99	141	175	215	2
2	400	103	152	168	221	13	3	200	90	130	160	199	3
2	400	101	143	180	199	14	3	200	108	158	201	233	4
2	400	121	169	317	295	15	3	200	112	159	195	263	5
2	400	102	140	166	193	16	3	200	102	146	208	236	6
2	400	102	146	166	221	17	3	200	90	111	140	173	7
2	400	94	146	175	224	18	3	200	96	133	154	183	8
2	400	87	125	162	177	19	3	200	88	134	154	222	9
2	400	120	154	178	250	20	3	200	89	146	214	241	10
2	600	92	118	131	166	1	3	200	107	149	175	229	11
2	600	105	130	182	195	2	3	200	83	125	157	221	12
2	600	103	145	167	190	3	3	200	95	144	185	273	13
2	600	127	170	205	252	4	3	200	102	155	219	305	14
2	600	119	159	182	197	5	3	200	96	138	171	219	15
2	600	137	177	198	285	6	3	200	111	155	212	258	16
2	600	89	119	147	151	7	3	200	84	139	161	184	17
2	600	104	130	160	234	8	3	200	85	116	145	188	18
2	600	106	141	158	201	9	3	200	101	136	188	202	19
2	600	123	164	191	217	10	3	200	81	131	141	173	20

Tablo E.4 : Kural B için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
3	400	83	109	139	167	1	4	0	85	133	161	194	11
3	400	108	160	188	218	2	4	0	96	149	193	183	12
3	400	94	129	155	210	3	4	0	82	129	165	191	13
3	400	117	158	220	251	4	4	0	86	140	184	230	14
3	400	127	179	219	243	5	4	0	88	133	155	178	15
3	400	114	163	219	255	6	4	0	92	156	229	292	16
3	400	100	130	159	183	7	4	0	106	165	186	235	17
3	400	106	138	156	188	8	4	0	80	121	183	213	18
3	400	101	148	176	218	9	4	0	72	125	165	210	19
3	400	104	171	199	210	10	4	0	92	141	171	219	20
3	400	124	153	179	227	11	4	200	78	112	136	170	1
3	400	90	117	160	176	12	4	200	113	158	186	257	2
3	400	110	139	197	210	13	4	200	89	119	149	198	3
3	400	114	164	242	250	14	4	200	104	172	207	241	4
3	400	102	148	204	237	15	4	200	132	180	241	260	5
3	400	114	172	195	255	16	4	200	101	149	202	232	6
3	400	103	136	175	178	17	4	200	85	114	143	152	7
3	400	94	130	155	190	18	4	200	96	133	170	184	8
3	400	111	173	204	256	19	4	200	112	164	220	254	9
3	400	88	124	153	262	20	4	200	84	139	168	217	10
3	600	91	117	136	164	1	4	200	99	152	188	203	11
3	600	123	187	191	239	2	4	200	105	145	191	252	12
3	600	103	144	152	215	3	4	200	94	140	175	193	13
3	600	133	168	222	265	4	4	200	95	159	208	207	14
3	600	145	170	194	239	5	4	200	95	123	169	212	15
3	600	130	167	228	337	6	4	200	108	185	236	299	16
3	600	101	129	169	211	7	4	200	115	181	229	234	17
3	600	115	151	173	204	8	4	200	92	132	161	187	18
3	600	113	173	197	220	9	4	200	85	137	155	221	19
3	600	124	151	174	239	10	4	200	99	146	197	201	20
3	600	127	161	188	216	11	4	400	86	119	131	143	1
3	600	99	135	164	180	12	4	400	124	164	195	246	2
3	600	115	153	162	238	13	4	400	95	126	169	179	3
3	600	124	175	271	312	14	4	400	117	173	224	312	4
3	600	110	155	194	267	15	4	400	142	198	255	273	5
3	600	132	165	216	275	16	4	400	111	160	210	220	6
3	600	108	144	173	194	17	4	400	91	122	144	184	7
3	600	107	133	179	208	18	4	400	104	151	175	200	8
3	600	131	170	213	244	19	4	400	123	192	249	266	9
3	600	95	130	169	247	20	4	400	98	143	191	213	10
4	0	73	103	140	160	1	4	400	108	159	180	237	11
4	0	101	136	205	215	2	4	400	117	164	202	237	12
4	0	82	116	142	178	3	4	400	104	146	191	257	13
4	0	96	156	203	253	4	4	400	108	156	185	249	14
4	0	118	167	267	265	5	4	400	106	133	170	216	15
4	0	88	143	184	198	6	4	400	122	221	243	389	16
4	0	81	113	138	182	7	4	400	126	175	227	249	17
4	0	86	123	169	188	8	4	400	102	137	186	202	18
4	0	97	155	232	222	9	4	400	90	145	170	215	19
4	0	75	126	183	199	10	4	400	111	170	193	228	20

Tablo E.4: Kural B için ortalama proses içi stok düzeyi (parça adedi) sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Proses İçi Stok Düzeyi Sonuçları [parça adedi]

YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar	YDS	HSAY	İSAY (%)				Tekrar
	(%)	0	250	500	750	Sayısı		(%)	0	250	500	750	Sayısı
4	600	90	116	135	172	1	5	200	86	161	204	203	11
4	600	134	174	206	252	2	5	200	103	164	201	245	12
4	600	103	131	175	208	3	5	200	115	227	283	344	13
4	600	136	195	256	256	4	5	200	101	161	176	216	14
4	600	156	230	307	261	5	5	200	106	195	241	298	15
4	600	125	167	204	257	6	5	200	100	163	197	289	16
4	600	98	129	155	192	7	5	200	106	158	214	225	17
4	600	104	147	188	192	8	5	200	140	211	291	396	18
4	600	134	210	241	288	9	5	200	107	177	241	232	19
4	600	112	162	227	302	10	5	200	94	155	201	219	20
4	600	123	160	176	241	11	5	400	86	119	168	169	1
4	600	133	193	203	252	12	5	400	115	178	212	245	2
4	600	122	162	209	253	13	5	400	102	138	168	215	3
4	600	125	185	233	344	14	5	400	144	221	303	306	4
4	600	110	167	182	192	15	5	400	169	239	263	295	5
4	600	146	220	260	277	16	5	400	96	143	177	198	6
4	600	145	185	230	250	17	5	400	101	135	168	198	7
4	600	110	154	190	199	18	5	400	130	185	225	231	8
4	600	103	150	194	211	19	5	400	144	226	259	343	9
4	600	124	157	199	234	20	5	400	107	164	212	330	10
5	0	71	113	149	167	1	5	400	98	153	192	192	11
5	0	89	148	204	260	2	5	400	116	174	223	288	12
5	0	84	128	159	198	3	5	400	127	277	284	364	13
5	0	100	192	232	309	4	5	400	109	177	191	277	14
5	0	135	208	277	303	5	5	400	125	214	262	295	15
5	0	74	125	160	195	6	5	400	112	167	214	229	16
5	0	81	121	154	187	7	5	400	119	165	214	224	17
5	0	97	167	204	232	8	5	400	164	234	294	354	18
5	0	108	182	275	293	9	5	400	129	200	216	269	19
5	0	82	136	199	268	10	5	400	107	172	210	235	20
5	0	77	135	172	214	11	5	600	94	134	147	189	1
5	0	90	138	204	225	12	5	600	136	173	229	265	2
5	0	97	185	296	326	13	5	600	113	175	183	216	3
5	0	84	155	178	239	14	5	600	162	219	286	293	4
5	0	94	192	235	290	15	5	600	190	247	314	326	5
5	0	92	140	196	225	16	5	600	103	149	179	229	6
5	0	94	151	196	206	17	5	600	112	145	190	216	7
5	0	116	207	241	365	18	5	600	145	197	226	249	8
5	0	103	155	221	247	19	5	600	157	228	288	318	9
5	0	88	146	211	214	20	5	600	117	173	249	231	10
5	200	79	114	142	209	1	5	600	117	170	180	201	11
5	200	101	168	191	232	2	5	600	127	185	280	243	12
5	200	90	128	158	204	3	5	600	163	275	315	326	13
5	200	117	199	262	296	4	5	600	133	193	208	324	14
5	200	150	217	262	337	5	5	600	162	239	274	301	15
5	200	84	129	165	185	6	5	600	131	177	212	241	16
5	200	90	132	165	200	7	5	600	140	212	233	278	17
5	200	113	166	208	241	8	5	600	180	258	305	337	18
5	200	128	214	272	309	9	5	600	144	200	232	251	19
5	200	90	160	210	290	10	5	600	119	180	199	236	20

Tablo E.5 : Kural A için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
1	0	0.276	0.317	0.313	0.309	1
1	0	0.330	0.384	0.398	0.397	2
1	0	0.323	0.379	0.392	0.413	3
1	0	0.401	0.434	0.433	0.435	4
1	0	0.349	0.409	0.428	0.416	5
1	0	0.394	0.458	0.474	0.482	6
1	0	0.318	0.361	0.381	0.385	7
1	0	0.230	0.284	0.283	0.283	8
1	0	0.297	0.362	0.370	0.371	9
1	0	0.380	0.427	0.420	0.438	10
1	0	0.317	0.390	0.435	0.452	11
1	0	0.357	0.418	0.441	0.435	12
1	0	0.310	0.378	0.384	0.380	13
1	0	0.379	0.424	0.426	0.430	14
1	0	0.378	0.428	0.440	0.422	15
1	0	0.309	0.379	0.403	0.408	16
1	0	0.295	0.335	0.343	0.345	17
1	0	0.279	0.396	0.412	0.412	18
1	0	0.360	0.400	0.410	0.424	19
1	0	0.319	0.376	0.389	0.402	20
1	200	0.297	0.317	0.311	0.310	1
1	200	0.351	0.396	0.397	0.397	2
1	200	0.349	0.382	0.398	0.420	3
1	200	0.415	0.436	0.442	0.437	4
1	200	0.368	0.418	0.419	0.415	5
1	200	0.413	0.469	0.481	0.483	6
1	200	0.342	0.371	0.381	0.390	7
1	200	0.248	0.288	0.282	0.285	8
1	200	0.328	0.373	0.375	0.375	9
1	200	0.402	0.429	0.430	0.436	10
1	200	0.363	0.427	0.440	0.449	11
1	200	0.381	0.435	0.437	0.440	12
1	200	0.342	0.376	0.384	0.383	13
1	200	0.404	0.427	0.428	0.434	14
1	200	0.400	0.426	0.444	0.423	15
1	200	0.343	0.394	0.407	0.410	16
1	200	0.320	0.348	0.348	0.339	17
1	200	0.311	0.397	0.421	0.422	18
1	200	0.385	0.415	0.418	0.419	19
1	200	0.348	0.384	0.388	0.399	20
1	400	0.313	0.318	0.313	0.310	1
1	400	0.375	0.404	0.400	0.408	2
1	400	0.384	0.389	0.405	0.401	3
1	400	0.427	0.439	0.437	0.438	4
1	400	0.395	0.427	0.422	0.419	5
1	400	0.439	0.471	0.481	0.488	6
1	400	0.343	0.376	0.376	0.393	7
1	400	0.280	0.283	0.283	0.287	8
1	400	0.329	0.383	0.380	0.383	9
1	400	0.407	0.439	0.426	0.427	10
1	400	0.372	0.439	0.453	0.456	11
1	400	0.417	0.450	0.445	0.444	12
1	400	0.346	0.378	0.387	0.387	13
1	400	0.411	0.438	0.434	0.427	14
1	400	0.419	0.437	0.441	0.423	15
1	400	0.369	0.401	0.405	0.408	16
1	400	0.339	0.350	0.345	0.341	17
1	400	0.345	0.413	0.420	0.424	18
1	400	0.382	0.414	0.419	0.433	19
1	400	0.373	0.398	0.400	0.384	20
1	600	0.324	0.317	0.314	0.311	1
1	600	0.390	0.408	0.402	0.412	2
1	600	0.391	0.399	0.422	0.404	3
1	600	0.429	0.441	0.439	0.432	4
1	600	0.410	0.429	0.422	0.423	5
1	600	0.447	0.474	0.486	0.491	6
1	600	0.365	0.383	0.380	0.368	7
1	600	0.280	0.285	0.285	0.285	8
1	600	0.372	0.384	0.373	0.374	9
1	600	0.412	0.449	0.431	0.435	10
1	600	0.405	0.443	0.450	0.457	11
1	600	0.425	0.461	0.451	0.422	12
1	600	0.365	0.391	0.394	0.385	13
1	600	0.429	0.434	0.436	0.431	14
1	600	0.435	0.446	0.445	0.428	15
1	600	0.404	0.412	0.412	0.410	16
1	600	0.343	0.359	0.347	0.345	17
1	600	0.360	0.415	0.418	0.446	18
1	600	0.393	0.422	0.427	0.411	19
1	600	0.375	0.396	0.402	0.407	20
2	0	0.248	0.304	0.319	0.313	1
2	0	0.302	0.376	0.389	0.404	2
2	0	0.313	0.371	0.386	0.383	3
2	0	0.358	0.439	0.440	0.460	4
2	0	0.344	0.416	0.432	0.439	5
2	0	0.402	0.462	0.513	0.496	6
2	0	0.269	0.336	0.342	0.350	7
2	0	0.295	0.352	0.381	0.378	8
2	0	0.298	0.370	0.387	0.384	9
2	0	0.348	0.424	0.429	0.442	10
2	0	0.307	0.384	0.403	0.389	11
2	0	0.342	0.409	0.438	0.404	12
2	0	0.319	0.386	0.420	0.409	13
2	0	0.321	0.375	0.397	0.390	14
2	0	0.367	0.439	0.490	0.472	15
2	0	0.342	0.392	0.414	0.425	16
2	0	0.327	0.430	0.473	0.466	17
2	0	0.300	0.360	0.374	0.380	18
2	0	0.273	0.362	0.361	0.371	19
2	0	0.364	0.444	0.477	0.494	20

Tablo E.5 : Kural A için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
2	200	0.277	0.312	0.315	0.314	1	2	600	0.388	0.401	0.413	0.419	11
2	200	0.340	0.389	0.403	0.405	2	2	600	0.414	0.416	0.409	0.402	12
2	200	0.336	0.381	0.388	0.390	3	2	600	0.387	0.419	0.419	0.415	13
2	200	0.372	0.438	0.459	0.468	4	2	600	0.383	0.396	0.402	0.394	14
2	200	0.370	0.426	0.440	0.443	5	2	600	0.451	0.494	0.495	0.479	15
2	200	0.414	0.489	0.494	0.507	6	2	600	0.409	0.416	0.422	0.402	16
2	200	0.297	0.341	0.346	0.354	7	2	600	0.413	0.478	0.492	0.480	17
2	200	0.327	0.366	0.381	0.387	8	2	600	0.384	0.387	0.395	0.396	18
2	200	0.322	0.370	0.381	0.391	9	2	600	0.345	0.378	0.397	0.389	19
2	200	0.375	0.425	0.438	0.450	10	2	600	0.453	0.471	0.502	0.482	20
2	200	0.345	0.402	0.404	0.408	11	3	0	0.262	0.317	0.323	0.317	1
2	200	0.369	0.414	0.422	0.404	12	3	0	0.350	0.435	0.441	0.447	2
2	200	0.352	0.411	0.414	0.412	13	3	0	0.318	0.405	0.405	0.409	3
2	200	0.357	0.385	0.400	0.391	14	3	0	0.337	0.435	0.473	0.492	4
2	200	0.403	0.483	0.473	0.479	15	3	0	0.365	0.475	0.483	0.504	5
2	200	0.358	0.391	0.416	0.423	16	3	0	0.335	0.437	0.494	0.494	6
2	200	0.352	0.435	0.478	0.497	17	3	0	0.317	0.376	0.389	0.379	7
2	200	0.332	0.359	0.378	0.386	18	3	0	0.325	0.409	0.436	0.430	8
2	200	0.302	0.367	0.391	0.373	19	3	0	0.270	0.394	0.407	0.435	9
2	200	0.392	0.460	0.479	0.496	20	3	0	0.314	0.447	0.490	0.503	10
2	400	0.302	0.321	0.313	0.315	1	3	0	0.352	0.441	0.456	0.461	11
2	400	0.351	0.384	0.409	0.416	2	3	0	0.260	0.352	0.379	0.390	12
2	400	0.350	0.384	0.394	0.394	3	3	0	0.323	0.403	0.441	0.436	13
2	400	0.406	0.456	0.466	0.468	4	3	0	0.346	0.428	0.478	0.507	14
2	400	0.403	0.447	0.445	0.447	5	3	0	0.325	0.403	0.413	0.427	15
2	400	0.455	0.494	0.500	0.499	6	3	0	0.372	0.427	0.485	0.472	16
2	400	0.317	0.350	0.350	0.356	7	3	0	0.276	0.411	0.430	0.445	17
2	400	0.346	0.381	0.381	0.387	8	3	0	0.291	0.394	0.398	0.428	18
2	400	0.347	0.382	0.387	0.394	9	3	0	0.352	0.430	0.479	0.476	19
2	400	0.399	0.440	0.445	0.445	10	3	0	0.257	0.342	0.363	0.377	20
2	400	0.364	0.405	0.410	0.413	11	3	200	0.296	0.321	0.324	0.318	1
2	400	0.390	0.421	0.418	0.408	12	3	200	0.378	0.442	0.450	0.458	2
2	400	0.376	0.408	0.425	0.429	13	3	200	0.341	0.408	0.411	0.410	3
2	400	0.373	0.392	0.378	0.390	14	3	200	0.368	0.444	0.478	0.497	4
2	400	0.437	0.485	0.463	0.487	15	3	200	0.410	0.476	0.493	0.510	5
2	400	0.380	0.417	0.414	0.424	16	3	200	0.376	0.487	0.506	0.496	6
2	400	0.380	0.472	0.496	0.478	17	3	200	0.338	0.382	0.391	0.382	7
2	400	0.353	0.394	0.421	0.377	18	3	200	0.354	0.428	0.437	0.435	8
2	400	0.329	0.369	0.392	0.379	19	3	200	0.323	0.397	0.416	0.430	9
2	400	0.434	0.463	0.484	0.501	20	3	200	0.366	0.459	0.483	0.501	10
2	600	0.318	0.324	0.314	0.308	1	3	200	0.395	0.453	0.471	0.467	11
2	600	0.373	0.406	0.404	0.411	2	3	200	0.313	0.366	0.380	0.382	12
2	600	0.360	0.385	0.393	0.395	3	3	200	0.352	0.414	0.439	0.455	13
2	600	0.435	0.461	0.469	0.482	4	3	200	0.379	0.453	0.479	0.510	14
2	600	0.418	0.452	0.446	0.454	5	3	200	0.355	0.408	0.429	0.437	15
2	600	0.479	0.504	0.504	0.514	6	3	200	0.400	0.451	0.459	0.461	16
2	600	0.325	0.350	0.354	0.359	7	3	200	0.319	0.423	0.445	0.442	17
2	600	0.359	0.387	0.386	0.391	8	3	200	0.331	0.408	0.425	0.422	18
2	600	0.371	0.386	0.394	0.383	9	3	200	0.379	0.454	0.465	0.476	19
2	600	0.426	0.450	0.441	0.450	10	3	200	0.274	0.352	0.382	0.386	20

Tablo E.5 : Kural A için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
3	400	0.303	0.321	0.317	0.319	1	4	0	0.325	0.427	0.467	0.488	11
3	400	0.405	0.453	0.446	0.450	2	4	0	0.348	0.441	0.459	0.487	12
3	400	0.364	0.406	0.425	0.426	3	4	0	0.315	0.412	0.445	0.468	13
3	400	0.407	0.464	0.480	0.497	4	4	0	0.350	0.456	0.484	0.516	14
3	400	0.441	0.490	0.506	0.508	5	4	0	0.303	0.403	0.441	0.450	15
3	400	0.415	0.479	0.513	0.511	6	4	0	0.335	0.476	0.500	0.524	16
3	400	0.358	0.395	0.385	0.397	7	4	0	0.380	0.486	0.507	0.519	17
3	400	0.392	0.434	0.448	0.454	8	4	0	0.307	0.449	0.484	0.500	18
3	400	0.341	0.401	0.424	0.430	9	4	0	0.264	0.368	0.402	0.415	19
3	400	0.390	0.468	0.497	0.512	10	4	0	0.324	0.431	0.450	0.467	20
3	400	0.403	0.455	0.477	0.483	11	4	200	0.285	0.323	0.343	0.339	1
3	400	0.327	0.382	0.400	0.384	12	4	200	0.399	0.462	0.494	0.480	2
3	400	0.395	0.434	0.431	0.459	13	4	200	0.331	0.412	0.428	0.425	3
3	400	0.383	0.488	0.490	0.513	14	4	200	0.355	0.475	0.517	0.507	4
3	400	0.386	0.424	0.438	0.444	15	4	200	0.438	0.539	0.563	0.555	5
3	400	0.401	0.466	0.471	0.456	16	4	200	0.365	0.435	0.456	0.469	6
3	400	0.380	0.436	0.448	0.448	17	4	200	0.319	0.396	0.391	0.401	7
3	400	0.372	0.425	0.436	0.419	18	4	200	0.348	0.418	0.438	0.450	8
3	400	0.401	0.466	0.481	0.484	19	4	200	0.367	0.474	0.498	0.532	9
3	400	0.297	0.370	0.396	0.386	20	4	200	0.337	0.449	0.489	0.502	10
3	600	0.318	0.334	0.318	0.320	1	4	200	0.361	0.427	0.486	0.474	11
3	600	0.421	0.460	0.457	0.452	2	4	200	0.381	0.445	0.473	0.472	12
3	600	0.391	0.400	0.418	0.432	3	4	200	0.349	0.423	0.452	0.473	13
3	600	0.431	0.478	0.490	0.502	4	4	200	0.390	0.471	0.491	0.513	14
3	600	0.455	0.510	0.510	0.511	5	4	200	0.336	0.422	0.441	0.453	15
3	600	0.442	0.492	0.497	0.507	6	4	200	0.367	0.483	0.510	0.524	16
3	600	0.369	0.399	0.381	0.401	7	4	200	0.419	0.504	0.516	0.529	17
3	600	0.401	0.449	0.439	0.443	8	4	200	0.343	0.446	0.489	0.504	18
3	600	0.379	0.421	0.434	0.438	9	4	200	0.307	0.389	0.408	0.424	19
3	600	0.442	0.483	0.504	0.515	10	4	200	0.368	0.464	0.480	0.484	20
3	600	0.444	0.469	0.469	0.490	11	4	400	0.298	0.331	0.346	0.340	1
3	600	0.360	0.393	0.391	0.387	12	4	400	0.424	0.468	0.501	0.491	2
3	600	0.414	0.447	0.440	0.465	13	4	400	0.364	0.417	0.428	0.426	3
3	600	0.435	0.500	0.479	0.520	14	4	400	0.394	0.483	0.516	0.514	4
3	600	0.398	0.435	0.430	0.453	15	4	400	0.467	0.550	0.550	0.558	5
3	600	0.464	0.483	0.485	0.461	16	4	400	0.399	0.456	0.463	0.471	6
3	600	0.376	0.441	0.461	0.454	17	4	400	0.346	0.396	0.407	0.407	7
3	600	0.405	0.422	0.435	0.424	18	4	400	0.382	0.444	0.443	0.455	8
3	600	0.447	0.455	0.494	0.485	19	4	400	0.423	0.481	0.508	0.530	9
3	600	0.334	0.374	0.401	0.390	20	4	400	0.377	0.453	0.487	0.505	10
4	0	0.260	0.315	0.336	0.337	1	4	400	0.395	0.452	0.481	0.473	11
4	0	0.365	0.458	0.474	0.476	2	4	400	0.409	0.471	0.474	0.493	12
4	0	0.304	0.389	0.426	0.424	3	4	400	0.383	0.440	0.466	0.479	13
4	0	0.317	0.461	0.507	0.500	4	4	400	0.409	0.511	0.513	0.492	14
4	0	0.409	0.512	0.551	0.552	5	4	400	0.354	0.445	0.451	0.463	15
4	0	0.331	0.413	0.448	0.464	6	4	400	0.414	0.501	0.528	0.531	16
4	0	0.292	0.367	0.396	0.397	7	4	400	0.456	0.518	0.536	0.536	17
4	0	0.306	0.400	0.431	0.447	8	4	400	0.373	0.469	0.479	0.501	18
4	0	0.322	0.463	0.490	0.522	9	4	400	0.338	0.405	0.427	0.423	19
4	0	0.298	0.409	0.489	0.509	10	4	400	0.398	0.482	0.493	0.478	20

Tablo E.5 : Kural A için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural A için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı
		0	250	500	750				0	250	500	750	
4	600	0.313	0.336	0.343	0.342	1	5	200	0.357	0.431	0.479	0.497	11
4	600	0.448	0.481	0.505	0.499	2	5	200	0.358	0.493	0.545	0.579	12
4	600	0.389	0.422	0.427	0.427	3	5	200	0.408	0.515	0.577	0.604	13
4	600	0.424	0.515	0.532	0.517	4	5	200	0.371	0.467	0.499	0.504	14
4	600	0.488	0.568	0.557	0.563	5	5	200	0.403	0.562	0.615	0.630	15
4	600	0.417	0.461	0.471	0.477	6	5	200	0.394	0.492	0.524	0.532	16
4	600	0.386	0.406	0.410	0.412	7	5	200	0.376	0.509	0.552	0.574	17
4	600	0.388	0.441	0.451	0.461	8	5	200	0.423	0.555	0.587	0.623	18
4	600	0.425	0.501	0.525	0.530	9	5	200	0.424	0.504	0.533	0.552	19
4	600	0.399	0.486	0.502	0.509	10	5	200	0.374	0.509	0.575	0.592	20
4	600	0.410	0.480	0.483	0.482	11	5	400	0.313	0.375	0.393	0.391	1
4	600	0.429	0.469	0.478	0.501	12	5	400	0.428	0.500	0.528	0.537	2
4	600	0.414	0.462	0.470	0.479	13	5	400	0.375	0.442	0.470	0.462	3
4	600	0.452	0.491	0.514	0.499	14	5	400	0.462	0.555	0.582	0.605	4
4	600	0.384	0.442	0.453	0.462	15	5	400	0.511	0.593	0.634	0.622	5
4	600	0.457	0.512	0.526	0.528	16	5	400	0.373	0.453	0.486	0.483	6
4	600	0.489	0.519	0.542	0.527	17	5	400	0.386	0.426	0.444	0.459	7
4	600	0.395	0.463	0.484	0.503	18	5	400	0.445	0.525	0.533	0.563	8
4	600	0.369	0.412	0.434	0.422	19	5	400	0.476	0.571	0.594	0.605	9
4	600	0.439	0.479	0.494	0.496	20	5	400	0.399	0.491	0.524	0.540	10
5	0	0.263	0.341	0.386	0.387	1	5	400	0.416	0.454	0.485	0.515	11
5	0	0.341	0.443	0.503	0.522	2	5	400	0.424	0.507	0.561	0.555	12
5	0	0.311	0.409	0.439	0.458	3	5	400	0.481	0.547	0.582	0.608	13
5	0	0.363	0.520	0.579	0.592	4	5	400	0.408	0.496	0.501	0.515	14
5	0	0.434	0.556	0.614	0.628	5	5	400	0.476	0.578	0.637	0.655	15
5	0	0.283	0.401	0.459	0.472	6	5	400	0.434	0.505	0.522	0.543	16
5	0	0.315	0.384	0.434	0.423	7	5	400	0.413	0.518	0.557	0.562	17
5	0	0.359	0.490	0.513	0.556	8	5	400	0.486	0.577	0.614	0.630	18
5	0	0.368	0.521	0.569	0.592	9	5	400	0.441	0.513	0.548	0.557	19
5	0	0.301	0.440	0.505	0.516	10	5	400	0.412	0.526	0.582	0.597	20
5	0	0.290	0.445	0.459	0.509	11	5	600	0.330	0.389	0.396	0.393	1
5	0	0.341	0.468	0.532	0.566	12	5	600	0.455	0.524	0.538	0.524	2
5	0	0.346	0.513	0.551	0.611	13	5	600	0.404	0.445	0.475	0.464	3
5	0	0.312	0.454	0.488	0.504	14	5	600	0.506	0.569	0.594	0.609	4
5	0	0.355	0.545	0.591	0.655	15	5	600	0.551	0.609	0.640	0.647	5
5	0	0.334	0.487	0.498	0.534	16	5	600	0.389	0.469	0.484	0.488	6
5	0	0.345	0.460	0.525	0.553	17	5	600	0.406	0.433	0.443	0.454	7
5	0	0.375	0.522	0.582	0.609	18	5	600	0.480	0.543	0.555	0.566	8
5	0	0.366	0.492	0.525	0.567	19	5	600	0.510	0.583	0.620	0.614	9
5	0	0.328	0.496	0.527	0.594	20	5	600	0.424	0.509	0.532	0.538	10
5	200	0.294	0.358	0.387	0.387	1	5	600	0.414	0.473	0.504	0.525	11
5	200	0.385	0.479	0.522	0.537	2	5	600	0.421	0.534	0.577	0.563	12
5	200	0.343	0.434	0.453	0.463	3	5	600	0.501	0.574	0.606	0.618	13
5	200	0.408	0.542	0.580	0.601	4	5	600	0.436	0.500	0.510	0.514	14
5	200	0.469	0.575	0.628	0.632	5	5	600	0.514	0.613	0.638	0.657	15
5	200	0.328	0.418	0.467	0.481	6	5	600	0.462	0.515	0.531	0.537	16
5	200	0.356	0.421	0.440	0.429	7	5	600	0.439	0.531	0.557	0.575	17
5	200	0.413	0.510	0.532	0.562	8	5	600	0.510	0.598	0.633	0.639	18
5	200	0.427	0.550	0.591	0.595	9	5	600	0.490	0.535	0.564	0.554	19
5	200	0.341	0.469	0.510	0.531	10	5	600	0.438	0.551	0.578	0.602	20

Tablo E.6 : Kural B için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı
		0	250	500	750				0	250	500	750	
1	0	0.283	0.372	0.436	0.493	1	1	400	0.396	0.510	0.558	0.571	11
1	0	0.331	0.421	0.522	0.555	2	1	400	0.431	0.518	0.589	0.617	12
1	0	0.332	0.439	0.504	0.521	3	1	400	0.401	0.473	0.528	0.574	13
1	0	0.415	0.476	0.515	0.564	4	1	400	0.447	0.527	0.584	0.631	14
1	0	0.362	0.482	0.527	0.563	5	1	400	0.428	0.512	0.552	0.588	15
1	0	0.397	0.517	0.550	0.589	6	1	400	0.386	0.479	0.535	0.563	16
1	0	0.311	0.406	0.489	0.539	7	1	400	0.350	0.437	0.496	0.540	17
1	0	0.238	0.366	0.429	0.458	8	1	400	0.356	0.500	0.553	0.574	18
1	0	0.294	0.431	0.485	0.510	9	1	400	0.389	0.509	0.562	0.603	19
1	0	0.388	0.492	0.519	0.559	10	1	400	0.388	0.487	0.552	0.569	20
1	0	0.330	0.497	0.534	0.569	11	1	600	0.355	0.416	0.479	0.495	1
1	0	0.365	0.497	0.543	0.592	12	1	600	0.419	0.484	0.547	0.561	2
1	0	0.322	0.448	0.509	0.556	13	1	600	0.426	0.483	0.521	0.559	3
1	0	0.383	0.506	0.577	0.604	14	1	600	0.465	0.521	0.577	0.596	4
1	0	0.378	0.478	0.555	0.579	15	1	600	0.457	0.520	0.554	0.580	5
1	0	0.319	0.457	0.497	0.550	16	1	600	0.497	0.575	0.584	0.618	6
1	0	0.305	0.417	0.494	0.562	17	1	600	0.389	0.472	0.514	0.558	7
1	0	0.294	0.429	0.555	0.572	18	1	600	0.337	0.416	0.467	0.522	8
1	0	0.364	0.460	0.530	0.580	19	1	600	0.401	0.479	0.530	0.554	9
1	0	0.315	0.468	0.523	0.539	20	1	600	0.473	0.538	0.563	0.572	10
1	200	0.310	0.394	0.467	0.487	1	1	600	0.458	0.535	0.594	0.585	11
1	200	0.353	0.438	0.524	0.563	2	1	600	0.468	0.537	0.577	0.615	12
1	200	0.359	0.453	0.504	0.564	3	1	600	0.394	0.495	0.535	0.580	13
1	200	0.430	0.507	0.519	0.611	4	1	600	0.474	0.530	0.604	0.629	14
1	200	0.384	0.491	0.515	0.567	5	1	600	0.464	0.535	0.572	0.593	15
1	200	0.417	0.538	0.566	0.590	6	1	600	0.431	0.484	0.541	0.570	16
1	200	0.338	0.452	0.487	0.535	7	1	600	0.385	0.475	0.539	0.551	17
1	200	0.267	0.373	0.466	0.489	8	1	600	0.412	0.503	0.573	0.584	18
1	200	0.337	0.446	0.478	0.547	9	1	600	0.434	0.527	0.571	0.596	19
1	200	0.417	0.500	0.570	0.581	10	1	600	0.425	0.492	0.522	0.558	20
1	200	0.367	0.494	0.556	0.583	11	2	0	0.254	0.354	0.438	0.466	1
1	200	0.397	0.508	0.575	0.570	12	2	0	0.316	0.415	0.486	0.540	2
1	200	0.345	0.456	0.531	0.562	13	2	0	0.319	0.424	0.510	0.529	3
1	200	0.404	0.533	0.590	0.603	14	2	0	0.352	0.480	0.566	0.592	4
1	200	0.393	0.503	0.540	0.606	15	2	0	0.349	0.462	0.532	0.587	5
1	200	0.330	0.439	0.521	0.559	16	2	0	0.408	0.517	0.585	0.638	6
1	200	0.324	0.430	0.489	0.545	17	2	0	0.272	0.384	0.445	0.490	7
1	200	0.332	0.472	0.538	0.579	18	2	0	0.289	0.417	0.484	0.553	8
1	200	0.392	0.470	0.568	0.601	19	2	0	0.294	0.436	0.510	0.540	9
1	200	0.353	0.455	0.519	0.576	20	2	0	0.359	0.484	0.529	0.577	10
1	400	0.332	0.412	0.480	0.507	1	2	0	0.308	0.445	0.513	0.555	11
1	400	0.389	0.462	0.541	0.537	2	2	0	0.337	0.466	0.556	0.573	12
1	400	0.402	0.470	0.531	0.532	3	2	0	0.336	0.463	0.537	0.554	13
1	400	0.450	0.501	0.532	0.598	4	2	0	0.315	0.462	0.518	0.550	14
1	400	0.413	0.494	0.539	0.572	5	2	0	0.396	0.542	0.596	0.623	15
1	400	0.453	0.553	0.589	0.582	6	2	0	0.335	0.443	0.503	0.567	16
1	400	0.370	0.467	0.491	0.564	7	2	0	0.295	0.469	0.575	0.611	17
1	400	0.295	0.406	0.457	0.477	8	2	0	0.297	0.443	0.493	0.562	18
1	400	0.369	0.493	0.510	0.557	9	2	0	0.291	0.424	0.508	0.568	19
1	400	0.445	0.525	0.539	0.607	10	2	0	0.390	0.513	0.592	0.609	20

Tablo E.6 : Kural B için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%)				Tekrar Sayısı
		0	250	500	750				0	250	500	750	
2	200	0.286	0.375	0.442	0.487	1	2	600	0.406	0.529	0.530	0.597	11
2	200	0.354	0.442	0.522	0.533	2	2	600	0.451	0.543	0.564	0.613	12
2	200	0.350	0.446	0.519	0.561	3	2	600	0.421	0.534	0.555	0.595	13
2	200	0.367	0.511	0.542	0.597	4	2	600	0.410	0.494	0.538	0.572	14
2	200	0.385	0.489	0.531	0.566	5	2	600	0.514	0.595	0.624	0.703	15
2	200	0.416	0.547	0.591	0.642	6	2	600	0.412	0.510	0.527	0.555	16
2	200	0.317	0.382	0.468	0.508	7	2	600	0.412	0.534	0.582	0.607	17
2	200	0.321	0.423	0.491	0.550	8	2	600	0.452	0.513	0.552	0.564	18
2	200	0.344	0.439	0.508	0.573	9	2	600	0.403	0.480	0.549	0.570	19
2	200	0.379	0.500	0.533	0.623	10	2	600	0.457	0.548	0.586	0.636	20
2	200	0.358	0.446	0.541	0.586	11	3	0	0.259	0.372	0.436	0.498	1
2	200	0.383	0.507	0.567	0.589	12	3	0	0.352	0.455	0.542	0.590	2
2	200	0.356	0.478	0.528	0.564	13	3	0	0.315	0.443	0.520	0.586	3
2	200	0.374	0.465	0.506	0.561	14	3	0	0.325	0.517	0.536	0.608	4
2	200	0.428	0.549	0.593	0.656	15	3	0	0.379	0.507	0.624	0.651	5
2	200	0.369	0.473	0.525	0.553	16	3	0	0.327	0.504	0.569	0.638	6
2	200	0.357	0.493	0.563	0.600	17	3	0	0.332	0.423	0.482	0.536	7
2	200	0.364	0.494	0.511	0.538	18	3	0	0.336	0.462	0.523	0.554	8
2	200	0.329	0.443	0.528	0.543	19	3	0	0.272	0.454	0.521	0.603	9
2	200	0.413	0.532	0.585	0.579	20	3	0	0.305	0.487	0.583	0.607	10
2	400	0.326	0.408	0.443	0.485	1	3	0	0.336	0.503	0.555	0.610	11
2	400	0.391	0.462	0.520	0.540	2	3	0	0.266	0.435	0.487	0.534	12
2	400	0.396	0.476	0.507	0.566	3	3	0	0.340	0.461	0.556	0.590	13
2	400	0.426	0.517	0.565	0.589	4	3	0	0.335	0.496	0.586	0.643	14
2	400	0.425	0.516	0.586	0.588	5	3	0	0.341	0.456	0.559	0.582	15
2	400	0.469	0.571	0.618	0.651	6	3	0	0.356	0.476	0.575	0.609	16
2	400	0.334	0.428	0.489	0.536	7	3	0	0.307	0.461	0.507	0.582	17
2	400	0.359	0.447	0.478	0.564	8	3	0	0.306	0.435	0.533	0.545	18
2	400	0.384	0.474	0.540	0.568	9	3	0	0.330	0.464	0.569	0.626	19
2	400	0.421	0.521	0.537	0.612	10	3	0	0.247	0.422	0.517	0.532	20
2	400	0.380	0.481	0.528	0.573	11	3	200	0.289	0.403	0.451	0.498	1
2	400	0.412	0.505	0.560	0.584	12	3	200	0.394	0.496	0.565	0.595	2
2	400	0.395	0.509	0.557	0.582	13	3	200	0.354	0.464	0.527	0.581	3
2	400	0.401	0.500	0.557	0.568	14	3	200	0.378	0.511	0.580	0.608	4
2	400	0.456	0.562	0.672	0.671	15	3	200	0.411	0.537	0.594	0.647	5
2	400	0.400	0.492	0.534	0.561	16	3	200	0.377	0.500	0.585	0.616	6
2	400	0.389	0.503	0.550	0.604	17	3	200	0.351	0.419	0.490	0.514	7
2	400	0.375	0.507	0.517	0.574	18	3	200	0.375	0.493	0.526	0.577	8
2	400	0.350	0.462	0.521	0.547	19	3	200	0.324	0.461	0.512	0.590	9
2	400	0.446	0.534	0.590	0.639	20	3	200	0.353	0.518	0.609	0.634	10
2	600	0.362	0.424	0.452	0.482	1	3	200	0.394	0.512	0.553	0.617	11
2	600	0.416	0.468	0.536	0.553	2	3	200	0.331	0.462	0.503	0.547	12
2	600	0.412	0.514	0.542	0.563	3	3	200	0.365	0.500	0.554	0.623	13
2	600	0.435	0.512	0.562	0.607	4	3	200	0.379	0.531	0.594	0.645	14
2	600	0.434	0.535	0.574	0.590	5	3	200	0.374	0.494	0.546	0.602	15
2	600	0.492	0.574	0.606	0.668	6	3	200	0.410	0.510	0.590	0.642	16
2	600	0.359	0.430	0.483	0.493	7	3	200	0.323	0.472	0.526	0.546	17
2	600	0.395	0.469	0.521	0.572	8	3	200	0.344	0.455	0.520	0.573	18
2	600	0.397	0.502	0.527	0.552	9	3	200	0.383	0.496	0.575	0.614	19
2	600	0.454	0.531	0.571	0.591	10	3	200	0.298	0.451	0.484	0.544	20

Tablo E.6 : Kural B için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
3	400	0.329	0.412	0.475	0.506	1	4	0	0.331	0.481	0.541	0.584	11
3	400	0.426	0.528	0.583	0.592	2	4	0	0.344	0.488	0.586	0.588	12
3	400	0.374	0.475	0.521	0.576	3	4	0	0.304	0.463	0.542	0.581	13
3	400	0.402	0.522	0.591	0.618	4	4	0	0.343	0.518	0.579	0.638	14
3	400	0.470	0.576	0.603	0.638	5	4	0	0.305	0.442	0.516	0.550	15
3	400	0.416	0.538	0.600	0.625	6	4	0	0.333	0.507	0.618	0.661	16
3	400	0.375	0.462	0.502	0.527	7	4	0	0.392	0.555	0.579	0.646	17
3	400	0.411	0.502	0.539	0.577	8	4	0	0.300	0.450	0.575	0.599	18
3	400	0.378	0.503	0.554	0.593	9	4	0	0.266	0.450	0.520	0.565	19
3	400	0.417	0.559	0.602	0.621	10	4	0	0.331	0.482	0.556	0.616	20
3	400	0.453	0.522	0.568	0.613	11	4	200	0.304	0.417	0.468	0.518	1
3	400	0.362	0.450	0.517	0.549	12	4	200	0.420	0.517	0.562	0.649	2
3	400	0.414	0.514	0.578	0.593	13	4	200	0.355	0.452	0.519	0.577	3
3	400	0.414	0.537	0.613	0.643	14	4	200	0.384	0.537	0.601	0.634	4
3	400	0.408	0.514	0.590	0.613	15	4	200	0.460	0.563	0.644	0.657	5
3	400	0.423	0.540	0.592	0.641	16	4	200	0.391	0.505	0.592	0.603	6
3	400	0.400	0.485	0.537	0.554	17	4	200	0.324	0.424	0.482	0.494	7
3	400	0.384	0.492	0.540	0.585	18	4	200	0.369	0.486	0.555	0.573	8
3	400	0.418	0.563	0.610	0.647	19	4	200	0.385	0.528	0.604	0.638	9
3	400	0.338	0.447	0.510	0.608	20	4	200	0.329	0.505	0.570	0.628	10
3	600	0.363	0.432	0.472	0.505	1	4	200	0.379	0.524	0.572	0.606	11
3	600	0.472	0.561	0.585	0.610	2	4	200	0.379	0.509	0.581	0.628	12
3	600	0.409	0.499	0.524	0.582	3	4	200	0.357	0.485	0.562	0.592	13
3	600	0.446	0.542	0.598	0.630	4	4	200	0.385	0.561	0.606	0.633	14
3	600	0.510	0.572	0.596	0.639	5	4	200	0.345	0.437	0.536	0.579	15
3	600	0.462	0.538	0.616	0.665	6	4	200	0.387	0.554	0.623	0.652	16
3	600	0.394	0.471	0.526	0.564	7	4	200	0.423	0.568	0.634	0.652	17
3	600	0.438	0.525	0.556	0.596	8	4	200	0.357	0.486	0.548	0.597	18
3	600	0.412	0.540	0.566	0.592	9	4	200	0.321	0.481	0.522	0.579	19
3	600	0.475	0.542	0.581	0.640	10	4	200	0.364	0.511	0.599	0.607	20
3	600	0.463	0.538	0.579	0.613	11	4	400	0.338	0.428	0.471	0.501	1
3	600	0.397	0.480	0.536	0.544	12	4	400	0.454	0.533	0.586	0.638	2
3	600	0.441	0.534	0.546	0.622	13	4	400	0.384	0.479	0.533	0.563	3
3	600	0.438	0.562	0.624	0.649	14	4	400	0.438	0.548	0.615	0.669	4
3	600	0.434	0.526	0.587	0.629	15	4	400	0.490	0.602	0.668	0.677	5
3	600	0.469	0.551	0.599	0.651	16	4	400	0.425	0.526	0.602	0.605	6
3	600	0.415	0.500	0.541	0.551	17	4	400	0.350	0.445	0.479	0.537	7
3	600	0.429	0.506	0.574	0.604	18	4	400	0.399	0.522	0.567	0.597	8
3	600	0.477	0.556	0.623	0.652	19	4	400	0.419	0.577	0.629	0.646	9
3	600	0.362	0.469	0.538	0.589	20	4	400	0.385	0.523	0.604	0.641	10
4	0	0.270	0.388	0.467	0.506	1	4	400	0.409	0.526	0.571	0.624	11
4	0	0.386	0.482	0.578	0.606	2	4	400	0.431	0.535	0.597	0.631	12
4	0	0.317	0.445	0.506	0.559	3	4	400	0.387	0.509	0.589	0.634	13
4	0	0.355	0.511	0.590	0.640	4	4	400	0.425	0.551	0.594	0.650	14
4	0	0.416	0.538	0.665	0.671	5	4	400	0.386	0.460	0.538	0.579	15
4	0	0.335	0.485	0.568	0.591	6	4	400	0.438	0.599	0.633	0.687	16
4	0	0.293	0.418	0.469	0.520	7	4	400	0.457	0.559	0.629	0.666	17
4	0	0.311	0.449	0.543	0.568	8	4	400	0.399	0.497	0.591	0.615	18
4	0	0.331	0.495	0.598	0.614	9	4	400	0.344	0.485	0.521	0.569	19
4	0	0.269	0.472	0.574	0.604	10	4	400	0.412	0.560	0.584	0.632	20

Tablo E.6 : Kural B için ortalama katma değersiz süre oranı sonuçları (DEVAM)

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Kural B için Ortalama Katma Değersiz Süre Oranı Sonuçları

YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı	YDS	HSAY (%)	İSAY (%) 0	250	500	750	Tekrar Sayısı
4	600	0.353	0.426	0.479	0.536	1	5	200	0.326	0.548	0.622	0.625	11
4	600	0.480	0.555	0.616	0.654	2	5	200	0.391	0.558	0.612	0.671	12
4	600	0.415	0.491	0.540	0.582	3	5	200	0.397	0.624	0.697	0.732	13
4	600	0.490	0.577	0.650	0.647	4	5	200	0.385	0.549	0.580	0.624	14
4	600	0.521	0.646	0.693	0.662	5	5	200	0.400	0.601	0.665	0.724	15
4	600	0.458	0.548	0.593	0.637	6	5	200	0.358	0.535	0.589	0.667	16
4	600	0.368	0.456	0.489	0.528	7	5	200	0.397	0.551	0.630	0.637	17
4	600	0.392	0.514	0.571	0.589	8	5	200	0.452	0.596	0.682	0.724	18
4	600	0.454	0.585	0.625	0.664	9	5	200	0.409	0.575	0.637	0.665	19
4	600	0.433	0.555	0.643	0.666	10	5	200	0.367	0.534	0.624	0.639	20
4	600	0.452	0.546	0.572	0.627	11	5	400	0.334	0.440	0.515	0.541	1
4	600	0.476	0.574	0.603	0.646	12	5	400	0.432	0.573	0.626	0.651	2
4	600	0.449	0.537	0.623	0.633	13	5	400	0.388	0.481	0.551	0.593	3
4	600	0.484	0.600	0.628	0.681	14	5	400	0.487	0.625	0.681	0.707	4
4	600	0.403	0.523	0.563	0.585	15	5	400	0.520	0.647	0.672	0.719	5
4	600	0.502	0.598	0.655	0.650	16	5	400	0.375	0.498	0.566	0.592	6
4	600	0.516	0.578	0.639	0.663	17	5	400	0.401	0.478	0.538	0.574	7
4	600	0.418	0.539	0.600	0.614	18	5	400	0.463	0.581	0.621	0.648	8
4	600	0.392	0.499	0.556	0.581	19	5	400	0.487	0.631	0.671	0.711	9
4	600	0.453	0.541	0.595	0.643	20	5	400	0.404	0.564	0.628	0.680	10
5	0	0.263	0.409	0.490	0.519	1	5	400	0.391	0.549	0.606	0.620	11
5	0	0.339	0.511	0.597	0.646	2	5	400	0.443	0.580	0.638	0.679	12
5	0	0.303	0.455	0.530	0.569	3	5	400	0.438	0.667	0.688	0.742	13
5	0	0.356	0.568	0.644	0.693	4	5	400	0.418	0.575	0.598	0.658	14
5	0	0.442	0.601	0.682	0.704	5	5	400	0.460	0.636	0.685	0.710	15
5	0	0.282	0.454	0.527	0.592	6	5	400	0.407	0.551	0.607	0.642	16
5	0	0.313	0.452	0.532	0.572	7	5	400	0.449	0.574	0.641	0.655	17
5	0	0.349	0.549	0.604	0.628	8	5	400	0.508	0.626	0.687	0.736	18
5	0	0.383	0.569	0.681	0.687	9	5	400	0.459	0.604	0.636	0.683	19
5	0	0.305	0.485	0.597	0.667	10	5	400	0.407	0.573	0.633	0.664	20
5	0	0.303	0.498	0.573	0.621	11	5	600	0.364	0.477	0.504	0.547	1
5	0	0.343	0.493	0.617	0.646	12	5	600	0.483	0.573	0.633	0.661	2
5	0	0.346	0.565	0.685	0.714	13	5	600	0.421	0.534	0.567	0.591	3
5	0	0.318	0.535	0.572	0.632	14	5	600	0.520	0.629	0.679	0.705	4
5	0	0.347	0.576	0.662	0.709	15	5	600	0.556	0.661	0.711	0.729	5
5	0	0.344	0.473	0.593	0.624	16	5	600	0.399	0.528	0.574	0.618	6
5	0	0.349	0.529	0.609	0.640	17	5	600	0.418	0.516	0.568	0.605	7
5	0	0.403	0.579	0.636	0.736	18	5	600	0.501	0.600	0.628	0.655	8
5	0	0.375	0.535	0.629	0.665	19	5	600	0.516	0.638	0.701	0.717	9
5	0	0.328	0.507	0.628	0.643	20	5	600	0.433	0.577	0.656	0.665	10
5	200	0.298	0.414	0.480	0.548	1	5	600	0.445	0.574	0.600	0.627	11
5	200	0.384	0.555	0.603	0.638	2	5	600	0.470	0.600	0.674	0.671	12
5	200	0.335	0.453	0.530	0.583	3	5	600	0.517	0.683	0.710	0.734	13
5	200	0.421	0.600	0.658	0.691	4	5	600	0.479	0.593	0.619	0.680	14
5	200	0.479	0.616	0.675	0.737	5	5	600	0.544	0.657	0.692	0.729	15
5	200	0.322	0.462	0.543	0.585	6	5	600	0.469	0.565	0.611	0.627	16
5	200	0.353	0.464	0.542	0.574	7	5	600	0.506	0.614	0.647	0.675	17
5	200	0.410	0.553	0.608	0.653	8	5	600	0.544	0.650	0.690	0.700	18
5	200	0.443	0.610	0.671	0.700	9	5	600	0.501	0.610	0.647	0.676	19
5	200	0.332	0.548	0.631	0.665	10	5	600	0.444	0.590	0.614	0.664	20

Tablo E.7 : Baz durum için sonuçlar

Not : Sonuç değerleri yuvarlatılmıştır.

Baz Durum için Sonuçlar

YDS	OİAS (dakika)	OPİSD (parça adedi)	OKDSO	Tekrar Sayısı	YDS	OİAS (dakika)	OPİSD (parça adedi)	OKDSO	Tekrar Sayısı
1	2199	76	0.309	1	3	3136	121	0.446	11
1	2847	98	0.382	2	3	2584	90	0.370	12
1	2560	91	0.381	3	3	2878	109	0.420	13
1	3161	126	0.423	4	3	3883	139	0.489	14
1	2654	102	0.395	5	3	2844	106	0.405	15
1	3318	127	0.451	6	3	3334	129	0.443	16
1	2616	95	0.371	7	3	3503	122	0.427	17
1	2066	70	0.284	8	3	2894	100	0.414	18
1	2532	87	0.350	9	3	3609	139	0.465	19
1	3115	120	0.413	10	3	2867	100	0.357	20
1	3101	113	0.423	11	4	2343	80	0.341	1
1	2946	112	0.418	12	4	3687	137	0.468	2
1	2666	95	0.375	13	4	2877	104	0.405	3
1	2793	106	0.410	14	4	4492	172	0.487	4
1	2922	107	0.418	15	4	4154	174	0.516	5
1	2694	94	0.390	16	4	3588	135	0.447	6
1	2340	82	0.332	17	4	2599	95	0.390	7
1	3201	115	0.405	18	4	3016	110	0.421	8
1	2668	99	0.390	19	4	4648	173	0.490	9
1	2596	96	0.379	20	4	3623	131	0.468	10
2	2172	74	0.304	1	4	3403	124	0.440	11
2	2920	103	0.388	2	4	3381	131	0.467	12
2	2600	94	0.377	3	4	3676	134	0.436	13
2	3555	137	0.440	4	4	3380	129	0.462	14
2	2852	110	0.419	5	4	3176	113	0.438	15
2	3701	140	0.475	6	4	4963	190	0.476	16
2	2388	82	0.341	7	4	3771	147	0.474	17
2	2617	92	0.363	8	4	3524	131	0.475	18
2	2712	100	0.365	9	4	3347	114	0.405	19
2	3298	120	0.423	10	4	3462	131	0.450	20
2	2697	101	0.383	11	5	2579	90	0.377	1
2	2799	105	0.396	12	5	4410	161	0.498	2
2	2850	103	0.411	13	5	3190	117	0.441	3
2	2542	94	0.375	14	5	5597	216	0.565	4
2	3153	121	0.451	15	5	5443	225	0.599	5
2	2695	100	0.400	16	5	4112	146	0.464	6
2	3823	135	0.452	17	5	2981	106	0.421	7
2	2547	93	0.361	18	5	4591	176	0.518	8
2	2543	90	0.369	19	5	6324	245	0.588	9
2	3285	128	0.456	20	5	4142	152	0.500	10
3	2240	78	0.321	1	5	3679	133	0.490	11
3	3241	115	0.425	2	5	4175	161	0.526	12
3	2736	98	0.389	3	5	7436	280	0.573	13
3	4006	152	0.466	4	5	3849	143	0.491	14
3	3245	132	0.462	5	5	7612	294	0.596	15
3	3724	136	0.458	6	5	4531	170	0.510	16
3	2614	94	0.381	7	5	3862	147	0.502	17
3	3022	107	0.424	8	5	6972	272	0.563	18
3	3254	116	0.403	9	5	4262	167	0.525	19
3	3904	139	0.469	10	5	5554	197	0.566	20

EK F

EŞLEŞTİRİLMİŞ T-TEST SONUÇLARI :

Tablo F.1 : Kural A ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OİAS (dakika)	Baz Durum Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
1	0	0	2338	2750	-412	-529.33	-294.36	-7.34	0
1	0	200	2493	2750	-257	-361.05	-152.46	-5.15	0
1	0	400	2620	2750	-130	-224.23	-35.87	-2.89	0.009
1	0	600	2714	2750	-36	-117.49	45.59	-0.92	0.368
1	250	0	2749	2750	-1	-70.99	69.12	-0.03	0.978
1	250	200	2801	2750	51	-1.02	103.26	2.05	0.054
1	250	400	2857	2750	107	60.20	154.59	4.76	0
1	250	600	2921	2750	171	109.61	232.26	5.83	0
1	500	0	2866	2750	117	70.22	162.83	5.27	0
1	500	200	2897	2750	147	103.09	190.98	7	0
1	500	400	2918	2750	168	123.04	212.62	7.84	0
1	500	600	2956	2750	206	147.73	263.96	7.41	0
1	750	0	2898	2750	148	98.72	197.42	6.28	0
1	750	200	2912	2750	162	113.83	209.78	7.06	0
1	750	400	2926	2750	176	117.86	234.36	6.33	0
1	750	600	2919	2750	170	111.83	227.58	6.14	0
2	0	0	2268	2887	-619	-764.12	-474.48	-8.95	0
2	0	200	2429	2887	-458	-598.02	-318.90	-6.88	0
2	0	400	2598	2887	-290	-414.82	-164.94	-4.86	0
2	0	600	2755	2887	-132	-236.99	-27.60	-2.64	0.016
2	250	0	2769	2887	-119	-206.14	-31.36	-2.84	0.01
2	250	200	2851	2887	-36	-122.85	49.94	-0.88	0.388
2	250	400	2945	2887	58	-9.99	125.98	1.79	0.09
2	250	600	2991	2887	103	45.83	161.13	3.76	0.001
2	500	0	2973	2887	85	12.01	158.49	2.44	0.025
2	500	200	2989	2887	101	58.62	144.11	4.96	0
2	500	400	3033	2887	145	95.90	194.68	6.16	0
2	500	600	3054	2887	166	115.18	217.21	6.82	0
2	750	0	2985	2887	98	52.21	143.69	4.48	0
2	750	200	3043	2887	155	110.95	199.65	7.33	0
2	750	400	3067	2887	180	132.22	226.83	7.94	0
2	750	600	3072	2887	184	128.79	240.10	6.94	0
3	0	0	2239	3176	-937	-1136.95	-736.14	-9.78	0
3	0	200	2440	3176	-736	-921.30	-550.48	-8.31	0
3	0	400	2614	3176	-562	-740.11	-383.76	-6.6	0
3	0	600	2827	3176	-349	-496.71	-201.83	-4.96	0
3	250	0	2898	3176	-278	-412.65	-142.39	-4.3	0
3	250	200	3001	3176	-175	-288.02	-62.54	-3.25	0.004
3	250	400	3104	3176	-72	-171.24	26.97	-1.52	0.144
3	250	600	3200	3176	24	-70.27	117.55	0.53	0.604

Tablo F.1 : Kural A ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OİAS (dakika)	Baz Durum Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
3	500	0	3162	3176	-14	-91.65	62.99	-0.39	0.702
3	500	200	3201	3176	25	-59.94	110.71	0.62	0.541
3	500	400	3281	3176	105	21.80	188.10	2.64	0.016
3	500	600	3303	3176	127	54.28	199.43	3.66	0.002
3	750	0	3261	3176	85	41.81	128.51	4.11	0.001
3	750	200	3311	3176	135	80.77	188.58	5.23	0
3	750	400	3378	3176	202	124.77	278.97	5.48	0
3	750	600	3419	3176	243	165.09	321.56	6.51	0
4	0	0	2255	3555	-1301	-1575.20	-1026.47	-9.92	0
4	0	200	2492	3555	-1063	-1322.83	-803.74	-8.57	0
4	0	400	2717	3555	-839	-1067.60	-610.08	-7.67	0
4	0	600	2941	3555	-615	-822.16	-407.03	-6.2	0
4	250	0	3072	3555	-484	-638.90	-328.83	-6.53	0
4	250	200	3201	3555	-354	-501.58	-206.48	-5.02	0
4	250	400	3356	3555	-199	-348.33	-50.35	-2.8	0.011
4	250	600	3458	3555	-97	-204.86	10.29	-1.89	0.074
4	500	0	3438	3555	-118	-228.11	-6.89	-2.22	0.039
4	500	200	3527	3555	-29	-134.46	76.55	-0.57	0.572
4	500	400	3608	3555	53	-37.07	142.52	1.23	0.234
4	500	600	3676	3555	120	37.38	203.28	3.04	0.007
4	750	0	3635	3555	80	-9.46	168.87	1.87	0.077
4	750	200	3680	3555	125	44.15	205.80	3.24	0.004
4	750	400	3731	3555	175	94.28	256.42	4.53	0
4	750	600	3778	3555	222	144.05	300.33	5.95	0
5	0	0	2306	4765	-2459	-3066.49	-1851.07	-8.47	0
5	0	200	2635	4765	-2130	-2710.00	-1550.13	-7.69	0
5	0	400	2986	4765	-1779	-2296.79	-1261.35	-7.19	0
5	0	600	3260	4765	-1506	-1982.07	-1028.93	-6.61	0
5	250	0	3482	4765	-1283	-1712.20	-853.03	-6.25	0
5	250	200	3685	4765	-1080	-1498.43	-661.94	-5.41	0
5	250	400	3898	4765	-867	-1240.28	-494.59	-4.87	0
5	250	600	4117	4765	-648	-969.47	-326.46	-4.22	0
5	500	0	4042	4765	-723	-1078.67	-368.12	-4.26	0
5	500	200	4227	4765	-538	-848.62	-227.97	-3.63	0.002
5	500	400	4367	4765	-398	-684.75	-111.08	-2.9	0.009
5	500	600	4542	4765	-223	-463.14	16.30	-1.95	0.066
5	750	0	4512	4765	-253	-482.05	-24.39	-2.32	0.032
5	750	200	4570	4765	-195	-435.22	44.78	-1.7	0.105
5	750	400	4668	4765	-97	-298.34	104.75	-1.01	0.327
5	750	600	4748	4765	-17	-209.61	175.55	-0.19	0.855

Tablo F.2 : Kural B ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OİAS (dakika)	Baz Durum Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
1	0	0	2384	2750	-365	-481.98	-248.73	-6.56	0
1	0	200	2563	2750	-187	-290.52	-82.90	-3.76	0.001
1	0	400	2825	2750	75	-24.22	174.77	1.58	0.13
1	0	600	3130	2750	380	286.25	474.69	8.45	0
1	250	0	3492	2750	742	627.58	856.85	13.55	0
1	250	200	3678	2750	929	800.33	1057.00	15.15	0
1	250	400	3883	2750	1133	1033.97	1232.66	23.88	0
1	250	600	4101	2750	1351	1546.95	1876.94	21.72	0
1	500	0	4462	2750	1712	1546.95	1876.94	21.72	0
1	500	200	4681	2750	1931	1710.22	2152.60	18.28	0
1	500	400	4829	2750	2079	1913.93	2243.80	26.38	0
1	500	600	5133	2750	2383	2216.37	2550.61	29.85	0
1	750	0	5422	2750	2672	2392.61	2952.17	19.99	0
1	750	200	5825	2750	3075	2806.98	3343.21	24.01	0
1	750	400	5960	2750	3210	2840.27	3580.49	18.16	0
1	750	600	6091	2750	3342	3027.17	3656.10	22.24	0
2	0	0	2302	2887	-585	-735.60	-435.24	-8.16	0
2	0	200	2551	2887	-337	-491.38	-182.09	-4.56	0
2	0	400	2817	2887	-71	-202.67	61.15	-1.12	0.276
2	0	600	3081	2887	193	29.62	356.76	2.47	0.023
2	250	0	3438	2887	551	403.24	698.03	7.82	0
2	250	200	3647	2887	760	629.82	890.22	12.22	0
2	250	400	3945	2887	1058	913.05	1202.71	15.29	0
2	250	600	4215	2887	1327	1136.28	1518.33	14.54	0
2	500	0	4571	2887	1684	1525.92	1841.15	22.36	0
2	500	200	4600	2887	1713	1564.55	1860.64	24.21	0
2	500	400	4932	2887	2045	1632.97	2456.72	10.39	0
2	500	600	4955	2887	2068	1890.55	2245.44	24.39	0
2	750	0	5392	2887	2505	2300.08	2709.24	25.62	0
2	750	200	5744	2887	2856	2521.00	3191.66	17.83	0
2	750	400	6014	2887	3126	2854.13	3398.63	24.04	0
2	750	600	6190	2887	3302	2755.57	3849.25	12.64	0
3	0	0	2246	3176	-930	-1146.85	-713.38	-8.98	0
3	0	200	2528	3176	-648	-840.84	-455.18	-7.03	0
3	0	400	2836	3176	-340	-512.51	-167.19	-4.12	0.001
3	0	600	3160	3176	-16	-155.16	123.28	-0.24	0.813
3	250	0	3532	3176	356	221.70	491.29	5.54	0
3	250	200	3771	3176	595	457.31	733.63	9.02	0
3	250	400	4038	3176	862	742.39	982.59	15.03	0
3	250	600	4244	3176	1068	893.87	1242.06	12.84	0

Tablo F.2 : Kural B ile BAZ durum ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OİAS (dakika)	Baz Durum Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
3	500	0	4704	3176	1528	1307.10	1749.36	14.46	0
3	500	200	4800	3176	1624	1451.20	1797.00	19.66	0
3	500	400	5114	3176	1938	1757.01	2118.75	22.43	0
3	500	600	5212	3176	2036	1803.17	2269.37	18.28	0
3	750	0	5863	3176	2687	2373.17	3000.51	17.93	0
3	750	200	6053	3176	2877	2513.74	3240.99	16.56	0
3	750	400	6095	3176	2919	2611.23	3227.24	19.84	0
3	750	600	6541	3176	3365	2977.50	3752.39	18.18	0
4	0	0	2298	3555	-1258	-1534.43	-981.38	-9.52	0
4	0	200	2597	3555	-958	-1212.29	-704.17	-7.89	0
4	0	400	2892	3555	-664	-899.76	-427.69	-5.89	0
4	0	600	3248	3555	-308	-496.61	-119.29	-3.42	0.003
4	250	0	3650	3555	95	-100.53	290.03	1.02	0.323
4	250	200	3953	3555	398	234.68	561.11	5.1	0
4	250	400	4254	3555	698	550.65	845.71	9.91	0
4	250	600	4571	3555	1015	870.19	1160.24	14.65	0
4	500	0	4913	3555	1358	1188.22	1527.29	16.76	0
4	500	200	5057	3555	1502	1325.63	1677.94	17.84	0
4	500	400	5261	3555	1706	1594.73	1816.90	32.14	0
4	500	600	5652	3555	2097	1885.84	2308.14	20.79	0
4	750	0	5720	3555	2165	1979.53	2350.44	24.43	0
4	750	200	5967	3555	2411	2184.48	2638.11	22.25	0
4	750	400	6420	3555	2864	2531.68	3197.12	18.02	0
4	750	600	6634	3555	3079	2623.76	3533.90	14.16	0
5	0	0	2339	4765	-2426	-3030.20	-1821.69	-8.4	0
5	0	200	2676	4765	-2089	-2669.07	-1509.44	-7.54	0
5	0	400	3093	4765	-1672	-2228.70	-1115.16	-6.29	0
5	0	600	3564	4765	-1201	-1694.54	-707.16	-5.09	0
5	250	0	4071	4765	-694	-1142.24	-245.48	-3.24	0.004
5	250	200	4457	4765	-308	-718.34	102.37	-1.57	0.133
5	250	400	4849	4765	84	-262.25	430.21	0.51	0.618
5	250	600	5204	4765	439	65.29	812.40	2.46	0.024
5	500	0	5518	4765	753	395.26	1110.54	4.41	0
5	500	200	5674	4765	909	545.15	1272.43	5.23	0
5	500	400	5941	4765	1176	812.07	1540.48	6.76	0
5	500	600	6308	4765	1543	1129.01	1956.85	7.8	0
5	750	0	6629	4765	1864	1497.61	2229.69	10.66	0
5	750	200	6919	4765	2154	1721.78	2585.55	10.44	0
5	750	400	7026	4765	2261	1780.69	2741.87	9.85	0
5	750	600	7031	4765	2266	1811.60	2720.53	10.44	0

Tablo F.3 : Kural A ile Kural B ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OİAS (dakika)	Kural B Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
1	0	0	2338	2384	-46	-64.56	-28.43	-5.39	0
1	0	200	2493	2563	-70	-95.10	-45.00	-5.85	0
1	0	400	2620	2825	-205	-249.70	-160.96	-9.69	0
1	0	600	2714	3130	-416	-473.22	-359.62	-15.35	0
1	250	0	2749	3492	-743	-836.14	-650.17	-16.73	0
1	250	200	2801	3678	-878	-987.10	-768.00	-16.77	0
1	250	400	2857	3883	-1026	-1113.01	-938.83	-24.66	0
1	250	600	2921	4101	-1180	-1253.34	-1106.76	-33.7	0
1	500	0	2866	4462	-1595	-1764.89	-1425.95	-19.7	0
1	500	200	2897	4681	-1784	-2024.10	-1544.65	-15.58	0
1	500	400	2918	4829	-1911	-2091.90	-1730.17	-22.11	0
1	500	600	2956	5133	-2178	-2370.62	-1984.67	-23.62	0
1	750	0	2898	5422	-2524	-2816.18	-2232.45	-18.1	0
1	750	200	2912	5825	-2913	-3183.13	-2643.45	-22.6	0
1	750	400	2926	5960	-3034	-3404.89	-2663.64	-17.14	0
1	750	600	2919	6091	-3172	-3505.23	-2838.64	-19.92	0
2	0	0	2268	2302	-34	-67.88	0.12	-2.09	0.051
2	0	200	2429	2551	-122	-153.69	-89.76	-7.97	0
2	0	400	2598	2817	-219	-248.99	-189.25	-15.36	0
2	0	600	2755	3081	-325	-408.99	-241.99	-8.16	0
2	250	0	2769	3438	-669	-784.71	-554.07	-12.15	0
2	250	200	2851	3647	-796	-902.02	-690.92	-15.79	0
2	250	400	2945	3945	-1000	-1103.78	-895.98	-20.14	0
2	250	600	2991	4215	-1224	-1382.54	-1065.11	-16.14	0
2	500	0	2973	4571	-1598	-1748.39	-1448.19	-22.29	0
2	500	200	2989	4600	-1611	-1744.73	-1477.74	-25.26	0
2	500	400	3033	4932	-1900	-2317.18	-1481.93	-9.52	0
2	500	600	3054	4955	-1902	-2067.64	-1735.96	-24	0
2	750	0	2985	5392	-2407	-2598.38	-2215.04	-26.28	0
2	750	200	3043	5744	-2701	-3045.62	-2356.44	-16.41	0
2	750	400	3067	6014	-2947	-3211.03	-2682.68	-23.35	0
2	750	600	3072	6190	-3118	-3667.90	-2568.03	-11.87	0
3	0	0	2239	2246	-6	-46.97	34.12	-0.33	0.744
3	0	200	2440	2528	-88	-113.80	-61.95	-7.1	0
3	0	400	2614	2836	-222	-262.84	-181.33	-11.41	0
3	0	600	2827	3160	-333	-381.43	-285.24	-14.51	0
3	250	0	2898	3532	-634	-720.47	-547.57	-15.35	0
3	250	200	3001	3771	-771	-862.15	-679.34	-17.65	0
3	250	400	3104	4038	-935	-1038.08	-831.17	-18.91	0
3	250	600	3200	4244	-1044	-1186.03	-902.63	-15.43	0

Tablo F.3 : Kural A ile Kural B ortalama iş akış süreleri (dakika) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OİAS (dakika)	Kural B Ortalama OİAS (dakika)	FARK (dakika)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (dakika)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (dakika)	T	P
3	500	0	3162	4704	-1543	-1740.91	-1344.21	-16.28	0
3	500	200	3201	4800	-1599	-1786.96	-1410.48	-17.78	0
3	500	400	3281	5114	-1833	-2037.90	-1627.97	-18.72	0
3	500	600	3303	5212	-1909	-2182.71	-1636.13	-14.62	0
3	750	0	3261	5863	-2602	-2902.34	-2301.02	-18.11	0
3	750	200	3311	6053	-2743	-3090.31	-2395.06	-16.51	0
3	750	400	3378	6095	-2717	-3031.16	-2403.57	-18.12	0
3	750	600	3419	6541	-3122	-3505.69	-2737.54	-17.01	0
4	0	0	2255	2298	-43	-75.60	-10.27	-2.75	0.013
4	0	200	2492	2597	-105	-144.12	-66.00	-5.63	0
4	0	400	2717	2892	-175	-217.62	-132.61	-8.62	0
4	0	600	2941	3248	-307	-363.85	-249.45	-11.22	0
4	250	0	3072	3650	-579	-663.95	-493.29	-14.19	0
4	250	200	3201	3953	-752	-854.79	-649.06	-15.3	0
4	250	400	3356	4254	-898	-1037.48	-757.56	-13.42	0
4	250	600	3458	4571	-1112	-1247.38	-977.61	-17.26	0
4	500	0	3438	4913	-1475	-1635.64	-1314.86	-19.25	0
4	500	200	3527	5057	-1531	-1675.16	-1386.32	-22.18	0
4	500	400	3608	5261	-1653	-1775.00	-1531.18	-28.38	0
4	500	600	3676	5652	-1977	-2181.70	-1771.62	-20.18	0
4	750	0	3635	5720	-2085	-2282.56	-1888.00	-22.12	0
4	750	200	3680	5967	-2286	-2557.75	-2014.89	-17.63	0
4	750	400	3731	6420	-2689	-3058.13	-2319.98	-15.25	0
4	750	600	3778	6634	-2857	-3321.16	-2392.12	-12.87	0
5	0	0	2306	2339	-33	-59.03	-6.64	-2.62	0.017
5	0	200	2635	2676	-41	-107.44	25.82	-1.28	0.215
5	0	400	2986	3093	-107	-196.16	-18.13	-2.52	0.021
5	0	600	3260	3564	-305	-377.01	-232.29	-8.81	0
5	250	0	3482	4071	-589	-689.39	-488.11	-12.24	0
5	250	200	3685	4457	-772	-939.52	-604.87	-9.66	0
5	250	400	3898	4849	-951	-1179.87	-722.95	-8.72	0
5	250	600	4117	5204	-1087	-1292.18	-881.45	-11.08	0
5	500	0	4042	5518	-1476	-1713.37	-1239.21	-13.03	0
5	500	200	4227	5674	-1447	-1665.78	-1228.39	-13.85	0
5	500	400	4367	5941	-1574	-1784.27	-1364.11	-15.68	0
5	500	600	4542	6308	-1766	-2048.75	-1483.95	-13.09	0
5	750	0	4512	6629	-2117	-2419.98	-1813.75	-14.62	0
5	750	200	4570	6919	-2349	-2742.78	-1955.00	-12.48	0
5	750	400	4668	7026	-2358	-2803.33	-1912.82	-11.08	0
5	750	600	4748	7031	-2283	-2638.41	-1927.79	-13.45	0

Tablo F.4 : Kural A ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OPİSD (parça adedi)	Baz Durum Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
1	0	0	87	101	-13	-17.56	-9.39	-6.9	0
1	0	200	92	101	-8	-12.00	-4.72	-4.8	0
1	0	400	96	101	-4	-7.27	-1.06	-2.81	0.011
1	0	600	99	101	-1	-3.82	1.56	-0.88	0.39
1	250	0	101	101	0	-2.32	2.42	0.05	0.964
1	250	200	102	101	2	0.13	3.41	2.26	0.036
1	250	400	104	101	4	2.04	5.09	4.9	0
1	250	600	106	101	6	3.48	7.76	5.51	0
1	500	0	105	101	4	2.36	5.59	5.15	0
1	500	200	106	101	5	3.45	6.57	6.72	0
1	500	400	106	101	6	4.25	7.37	7.8	0
1	500	600	108	101	7	5.03	9.19	7.14	0
1	750	0	106	101	5	3.33	6.88	6.02	0
1	750	200	106	101	6	3.85	7.32	6.73	0
1	750	400	107	101	6	3.93	8.07	6.07	0
1	750	600	106	101	5	3.48	7.44	5.77	0
2	0	0	85	106	-21	-25.66	-15.37	-8.35	0
2	0	200	91	106	-15	-19.92	-10.27	-6.55	0
2	0	400	96	106	-10	-13.71	-5.32	-4.75	0
2	0	600	102	106	-4	-7.82	-0.82	-2.58	0.018
2	250	0	102	106	-4	-6.71	-0.81	-2.67	0.015
2	250	200	105	106	-1	-4.09	1.94	-0.74	0.466
2	250	400	108	106	2	-0.14	4.54	1.97	0.064
2	250	600	110	106	4	1.55	5.69	3.66	0.002
2	500	0	109	106	3	0.05	5.73	2.13	0.047
2	500	200	110	106	4	1.97	5.08	4.73	0
2	500	400	111	106	5	3.28	6.96	5.83	0
2	500	600	112	106	6	3.70	7.61	6.05	0
2	750	0	109	106	3	1.46	5.14	3.75	0.001
2	750	200	111	106	5	3.58	7.13	6.32	0
2	750	400	112	106	6	4.19	8.25	6.4	0
2	750	600	113	106	7	4.29	8.81	6.06	0
3	0	0	85	116	-31	-38.17	-24.19	-9.34	0
3	0	200	92	116	-24	-30.68	-17.99	-8.03	0
3	0	400	98	116	-18	-24.70	-12.29	-6.24	0
3	0	600	105	116	-11	-16.47	-6.21	-4.63	0
3	250	0	107	116	-9	-13.54	-4.11	-3.92	0.001
3	250	200	111	116	-5	-9.18	-1.32	-2.79	0.012
3	250	400	114	116	-2	-5.34	1.54	-1.16	0.261
3	250	600	117	116	1	-2.08	4.86	0.84	0.413

Tablo F.4 : Kural A ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OPİSD (parça adedi)	Baz Durum Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
3	500	0	116	116	0	-2.84	2.74	-0.04	0.97
3	500	200	117	116	1	-2.00	4.19	0.74	0.468
3	500	400	120	116	4	0.73	6.72	2.6	0.017
3	500	600	121	116	5	1.99	7.08	3.74	0.001
3	750	0	119	116	3	1.58	4.85	4.12	0.001
3	750	200	121	116	5	2.79	6.96	4.9	0
3	750	400	123	116	7	4.29	10.44	5.01	0
3	750	600	125	116	9	5.57	11.96	5.74	0
4	0	0	88	133	-45	-55.19	-34.66	-9.16	0
4	0	200	96	133	-37	-46.28	-27.20	-8.06	0
4	0	400	104	133	-29	-37.39	-20.72	-7.3	0
4	0	600	111	133	-21	-28.65	-13.67	-5.91	0
4	250	0	116	133	-16	-21.80	-10.92	-6.29	0
4	250	200	121	133	-12	-17.17	-6.70	-4.77	0
4	250	400	126	133	-6	-11.63	-1.28	-2.61	0.017
4	250	600	129	133	-4	-7.39	0.22	-1.97	0.063
4	500	0	129	133	-4	-7.62	-0.07	-2.13	0.047
4	500	200	132	133	-1	-4.21	2.83	-0.41	0.687
4	500	400	134	133	2	-1.48	4.76	1.1	0.285
4	500	600	137	133	4	0.91	7.03	2.72	0.014
4	750	0	135	133	3	-0.01	5.56	2.09	0.051
4	750	200	137	133	5	1.87	7.29	3.54	0.002
4	750	400	139	133	6	3.54	9.12	4.74	0
4	750	600	140	133	8	5.20	10.46	6.23	0
5	0	0	92	180	-88	-111.05	-64.35	-7.86	0
5	0	200	104	180	-76	-98.13	-53.97	-7.21	0
5	0	400	117	180	-63	-82.92	-43.78	-6.77	0
5	0	600	126	180	-54	-71.51	-35.68	-6.26	0
5	250	0	135	180	-45	-61.00	-29.12	-5.92	0
5	250	200	141	180	-39	-54.19	-22.81	-5.14	0
5	250	400	149	180	-31	-44.50	-16.93	-4.66	0
5	250	600	157	180	-23	-34.89	-11.27	-4.09	0.001
5	500	0	154	180	-26	-38.70	-12.77	-4.15	0.001
5	500	200	161	180	-19	-30.38	-7.87	-3.56	0.002
5	500	400	166	180	-14	-24.82	-3.94	-2.88	0.01
5	500	600	172	180	-8	-16.93	0.75	-1.91	0.071
5	750	0	172	180	-8	-16.36	-0.15	-2.13	0.046
5	750	200	173	180	-7	-15.41	2.10	-1.59	0.128
5	750	400	177	180	-3	-10.53	3.83	-0.98	0.341
5	750	600	180	180	0	-7.22	6.49	-0.11	0.913

Tablo F.5 : Kural B ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OPİSD (parça adedi)	Baz Durum Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
1	0	0	89	101	-12	-16.14	-7.91	-6.12	0
1	0	200	94	101	-6	-9.67	-2.59	-3.63	0.002
1	0	400	104	101	3	-0.49	6.45	1.8	0.088
1	0	600	114	101	13	9.78	16.47	8.22	0
1	250	0	127	101	26	22.18	30.30	13.52	0
1	250	200	133	101	33	27.78	37.59	13.95	0
1	250	400	140	101	39	35.91	42.64	24.4	0
1	250	600	147	101	47	43.16	50.62	26.3	0
1	500	0	160	101	60	53.43	65.72	20.28	0
1	500	200	167	101	67	8.72	74.88	17.3	0
1	500	400	173	101	72	66.33	78.13	25.62	0
1	500	600	184	101	83	77.45	88.94	30.32	0
1	750	0	193	101	93	82.61	102.93	19.12	0
1	750	200	207	101	107	96.35	117.15	21.48	0
1	750	400	213	101	112	98.01	125.94	16.78	0
1	750	600	218	101	117	105.24	128.62	20.94	0
2	0	0	86	106	-20	-24.76	-14.62	-8.13	0
2	0	200	95	106	-11	-16.54	-5.77	-4.33	0
2	0	400	104	106	-2	-6.74	2.24	-1.05	0.307
2	0	600	113	106	7	1.37	12.24	2.62	0.017
2	250	0	126	106	20	14.55	24.73	8.08	0
2	250	200	133	106	27	22.37	31.44	12.42	0
2	250	400	143	106	37	32.35	42.04	16.07	0
2	250	600	153	106	47	39.71	53.59	14.06	0
2	500	0	166	106	60	53.14	65.94	19.48	0
2	500	200	166	106	60	55.18	64.81	26.07	0
2	500	400	176	106	70	54.73	86.26	9.36	0
2	500	600	178	106	72	65.16	78.58	22.41	0
2	750	0	194	106	88	80.00	95.86	23.21	0
2	750	200	205	106	99	86.76	111.51	16.76	0
2	750	400	215	106	109	98.44	118.98	22.15	0
2	750	600	221	106	115	94.27	135.64	11.63	0
3	0	0	85	116	-31	-38.72	-23.60	-8.63	0
3	0	200	95	116	-21	-28.01	-14.72	-6.73	0
3	0	400	105	116	-11	-17.06	-4.98	-3.82	0.001
3	0	600	116	116	0	-4.58	4.97	0.08	0.934
3	250	0	130	116	13	8.76	18.09	6.02	0
3	250	200	138	116	22	16.61	26.53	9.11	0
3	250	400	147	116	31	26.52	35.49	14.46	0
3	250	600	154	116	38	31.43	44.09	12.48	0

Tablo F.5 : Kural B ile BAZ durum ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OPİSD (parça adedi)	Baz Durum Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
3	500	0	170	116	54	45.82	62.86	13.35	0
3	500	200	174	116	58	51.24	64.73	18	0
3	500	400	185	116	69	61.40	75.84	19.89	0
3	500	600	188	116	72	62.91	81.39	16.34	0
3	750	0	211	116	95	82.83	106.55	16.71	0
3	750	200	219	116	103	89.06	116.86	15.5	0
3	750	400	219	116	103	92.35	113.89	20.04	0
3	750	600	236	116	120	104.72	134.47	16.83	0
4	0	0	89	133	-44	-54.14	-33.68	-8.99	0
4	0	200	99	133	-34	-42.78	-24.32	-7.61	0
4	0	400	109	133	-23	-31.95	-14.93	-5.77	0
4	0	600	122	133	-11	-17.79	-4.23	-3.4	0.003
4	250	0	136	133	4	-3.25	10.88	1.13	0.273
4	250	200	147	133	14	8.75	20.12	5.31	0
4	250	400	158	133	25	20.01	30.16	10.35	0
4	250	600	170	133	37	31.67	42.41	14.44	0
4	500	0	183	133	50	43.09	57.03	15.03	0
4	500	200	186	133	54	47.13	60.53	16.81	0
4	500	400	194	133	62	57.14	66.48	27.7	0
4	500	600	208	133	76	67.03	84.49	18.16	0
4	750	0	210	133	78	70.46	84.80	22.66	0
4	750	200	219	133	86	77.04	95.07	19.98	0
4	750	400	236	133	103	89.60	116.90	15.83	0
4	750	600	242	133	109	93.41	124.70	14.59	0
5	0	0	93	180	-87	-110.29	-63.91	-7.86	0
5	0	200	105	180	-75	-96.82	-53.04	-7.17	0
5	0	400	120	180	-60	-80.80	-39.13	-6.02	0
5	0	600	137	180	-43	-61.00	-24.24	-4.85	0
5	250	0	156	180	-24	-40.21	-7.41	-3.04	0.007
5	250	200	170	180	-10	-25.62	5.26	-1.38	0.184
5	250	400	184	180	4	-8.88	17.06	0.66	0.517
5	250	600	197	180	17	2.87	30.41	2.53	0.02
5	500	0	208	180	28	14.64	41.79	4.35	0
5	500	200	214	180	34	20.63	47.63	5.29	0
5	500	400	223	180	43	29.73	55.80	6.87	0
5	500	600	236	180	57	41.51	71.53	7.88	0
5	750	0	248	180	68	54.68	81.51	10.62	0
5	750	200	258	180	79	62.74	94.32	10.41	0
5	750	400	263	180	83	65.51	100.30	9.98	0
5	750	600	263	180	83	66.94	100.05	10.56	0

Tablo F.6 : Kural A ile Kural B ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OPİSD (parça adedi)	Kural B Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
1	0	0	87	89	-1	-2.15	-0.75	-4.36	0
1	0	200	92	94	-2	-3.20	-1.26	-4.82	0
1	0	400	96	104	-7	-8.85	-5.45	-8.8	0
1	0	600	99	114	-14	-16.62	-11.90	-12.65	0
1	250	0	101	127	-26	-29.78	-22.59	-15.26	0
1	250	200	102	133	-31	-35.30	-26.53	-14.75	0
1	250	400	104	140	-36	-38.72	-32.70	-24.8	0
1	250	600	106	147	-41	-44.19	-38.34	-29.53	0
1	500	0	105	160	-56	-61.61	-49.59	-19.37	0
1	500	200	106	167	-62	-70.25	-53.32	-15.28	0
1	500	400	106	173	-66	-72.73	-60.11	-22.02	0
1	500	600	108	184	-76	-82.49	-69.68	-24.86	0
1	750	0	106	193	-88	-97.97	-77.35	-17.8	0
1	750	200	106	207	-101	-111.29	-91.03	-20.91	0
1	750	400	107	213	-106	-119.68	-92.28	-16.19	0
1	750	600	106	218	-111	-123.46	-99.47	-19.45	0
2	0	0	85	86	-1	-2.22	0.57	-1.24	0.23
2	0	200	91	95	-4	-5.11	-2.77	-7.04	0
2	0	400	96	104	-7	-8.34	-6.20	-14.21	0
2	0	600	102	113	-11	-14.06	-8.20	-7.95	0
2	250	0	102	126	-23	-27.65	-19.14	-11.52	0
2	250	200	105	133	-28	-32.05	-23.91	-14.39	0
2	250	400	108	143	-35	-38.51	-31.48	-20.83	0
2	250	600	110	153	-43	-49.11	-36.94	-14.8	0
2	500	0	109	166	-57	-62.72	-50.59	-19.55	0
2	500	200	110	166	-56	-60.86	-52.08	-26.92	0
2	500	400	111	176	-65	-81.20	-49.54	-8.64	0
2	500	600	112	178	-66	-72.61	-59.82	-21.68	0
2	750	0	109	194	-85	-92.05	-77.22	-23.89	0
2	750	200	111	205	-94	-106.53	-81.02	-15.39	0
2	750	400	112	215	-102	-112.29	-92.69	-21.89	0
2	750	600	113	221	-108	-129.11	-87.70	-10.96	0
3	0	0	85	85	0	-1.66	1.61	-0.03	0.975
3	0	200	92	95	-3	-3.93	-2.00	-6.44	0
3	0	400	98	105	-7	-8.95	-5.99	-10.57	0
3	0	600	105	116	-12	-13.32	-9.75	-13.55	0
3	250	0	107	130	-22	-25.16	-19.34	-15.99	0
3	250	200	111	138	-27	-30.20	-23.44	-16.62	0
3	250	400	114	147	-33	-36.94	-28.87	-17.08	0
3	250	600	117	154	-36	-41.42	-31.31	-15.06	0

Tablo F.6 : Kural A ile Kural B ortalama proses içi stok düzeyleri (parça adedi) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OPİSD (parça adedi)	Kural B Ortalama OPİSD (parça adedi)	FARK (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır (parça adedi)	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır (parça adedi)	T	P
3	500	0	116	170	-54	-61.96	-46.82	-15.04	0
3	500	200	117	174	-57	-64.19	-49.59	-16.3	0
3	500	400	120	185	-65	-72.80	-56.99	-17.19	0
3	500	600	121	188	-68	-78.15	-57.08	-13.43	0
3	750	0	119	211	-91	-102.74	-80.21	-16.99	0
3	750	200	121	219	-98	-111.11	-85.06	-15.76	0
3	750	400	123	219	-96	-106.77	-84.75	-18.2	0
3	750	600	125	236	-111	-125.49	-96.18	-15.83	0
4	0	0	88	89	-1	-2.27	0.26	-1.67	0.112
4	0	200	96	99	-3	-4.72	-1.67	-4.38	0
4	0	400	104	109	-6	-7.26	-3.97	-7.15	0
4	0	600	111	122	-10	-12.30	-8.01	-9.9	0
4	250	0	116	136	-20	-23.26	-17.09	-13.71	0
4	250	200	121	147	-26	-30.36	-22.38	-13.83	0
4	250	400	126	158	-32	-36.74	-26.34	-12.7	0
4	250	600	129	170	-41	-45.96	-35.29	-15.94	0
4	500	0	129	183	-54	-60.80	-47.00	-16.35	0
4	500	200	132	186	-55	-60.36	-48.67	-19.53	0
4	500	400	134	194	-60	-65.28	-55.07	-24.66	0
4	500	600	137	208	-72	-80.41	-63.17	-17.43	0
4	750	0	135	210	-75	-82.24	-67.46	-21.2	0
4	750	200	137	219	-81	-91.71	-71.24	-16.66	0
4	750	400	139	236	-97	-111.64	-82.21	-13.79	0
4	750	600	140	242	-101	-117.24	-85.22	-13.23	0
5	0	0	92	93	-1	-1.55	0.36	-1.31	0.207
5	0	200	104	105	-1	-3.96	1.72	-0.83	0.419
5	0	400	117	120	-3	-6.76	0.00	-2.09	0.05
5	0	600	126	137	-11	-13.67	-8.28	-8.53	0
5	250	0	135	156	-21	-25.19	-17.31	-11.29	0
5	250	200	141	170	-28	-34.23	-22.42	-10.04	0
5	250	400	149	184	-35	-42.59	-27.01	-9.35	0
5	250	600	157	197	-40	-47.20	-32.24	-11.12	0
5	500	0	154	208	-54	-62.71	-45.19	-12.89	0
5	500	200	161	214	-53	-61.53	-44.98	-13.47	0
5	500	400	166	223	-57	-64.48	-49.82	-16.33	0
5	500	600	172	236	-65	-74.95	-54.27	-13.08	0
5	750	0	172	248	-76	-88.30	-64.40	-13.38	0
5	750	200	173	258	-85	-99.90	-70.47	-12.12	0
5	750	400	177	263	-86	-102.85	-69.67	-10.88	0
5	750	600	180	263	-84	-97.08	-70.64	-13.28	0

Tablo F.7 : Kural A ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OKDSO	Baz Durum Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır	T	P
1	0	0	0.33	0.38	-0.05	-0.0667	-0.0429	-9.620	0.000
1	0	200	0.36	0.38	-0.03	-0.0393	-0.0196	-6.260	0.000
1	0	400	0.37	0.38	-0.01	-0.0204	-0.0032	-2.860	0.010
1	0	600	0.39	0.38	0.00	-0.0045	0.0099	0.790	0.440
1	250	0	0.39	0.38	0.00	-0.0034	0.0074	0.790	0.441
1	250	200	0.40	0.38	0.01	0.0062	0.0146	5.170	0.000
1	250	400	0.40	0.38	0.02	0.0127	0.0222	7.720	0.000
1	250	600	0.41	0.38	0.02	0.0175	0.0273	9.600	0.000
1	500	0	0.40	0.38	0.01	0.0101	0.0175	7.820	0.000
1	500	200	0.40	0.38	0.02	0.0128	0.0203	9.170	0.000
1	500	400	0.40	0.38	0.02	0.0143	0.0229	8.980	0.000
1	500	600	0.41	0.38	0.02	0.0171	0.0268	9.440	0.000
1	750	0	0.40	0.38	0.02	0.0121	0.0218	7.300	0.000
1	750	200	0.40	0.38	0.02	0.0137	0.0230	8.210	0.000
1	750	400	0.40	0.38	0.02	0.0137	0.0245	7.420	0.000
1	750	600	0.40	0.38	0.02	0.0129	0.0248	6.610	0.000
2	0	0	0.32	0.40	-0.08	-0.0837	-0.0675	-19.430	0.000
2	0	200	0.35	0.40	-0.05	-0.0566	-0.0393	-11.570	0.000
2	0	400	0.37	0.40	-0.02	-0.0304	-0.0156	-6.480	0.000
2	0	600	0.39	0.40	0.00	-0.0103	0.0042	-0.870	0.395
2	250	0	0.39	0.40	-0.01	-0.0103	-0.0019	-3.020	0.007
2	250	200	0.40	0.40	0.00	-0.0003	0.0097	1.960	0.064
2	250	400	0.41	0.40	0.02	0.0108	0.0207	6.620	0.000
2	250	600	0.42	0.40	0.02	0.0164	0.0248	10.290	0.000
2	500	0	0.41	0.40	0.02	0.0096	0.0219	5.330	0.000
2	500	200	0.42	0.40	0.02	0.0146	0.0205	12.400	0.000
2	500	400	0.42	0.40	0.02	0.0161	0.0278	7.890	0.000
2	500	600	0.42	0.40	0.03	0.0201	0.0301	10.500	0.000
2	750	0	0.41	0.40	0.01	0.0107	0.0191	7.380	0.000
2	750	200	0.42	0.40	0.02	0.0161	0.0266	8.470	0.000
2	750	400	0.42	0.40	0.02	0.0186	0.0269	11.470	0.000
2	750	600	0.42	0.40	0.02	0.0171	0.0282	8.500	0.000
3	0	0	0.32	0.42	-0.10	-0.1178	-0.0906	-16.050	0.000
3	0	200	0.35	0.42	-0.07	-0.0808	-0.0578	-12.620	0.000
3	0	400	0.38	0.42	-0.04	-0.0543	-0.0329	-8.520	0.000
3	0	600	0.41	0.42	-0.02	-0.0235	-0.0071	-3.890	0.001
3	250	0	0.41	0.42	-0.01	-0.0218	-0.0054	-3.460	0.003
3	250	200	0.42	0.42	0.00	-0.0071	0.0064	-0.100	0.919
3	250	400	0.43	0.42	0.01	0.0068	0.0158	5.250	0.000
3	250	600	0.44	0.42	0.02	0.0146	0.0268	7.110	0.000

Tablo F.7 : Kural A ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OKDSO	Baz Durum Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	Üst Sınır	T	P
3	500	0	0.43	0.42	0.01	0.0052	0.0178	3.840	0.001
3	500	200	0.44	0.42	0.02	0.0108	0.0222	6.020	0.000
3	500	400	0.45	0.42	0.02	0.0172	0.0306	7.440	0.000
3	500	600	0.45	0.42	0.02	0.0178	0.0321	7.350	0.000
3	750	0	0.44	0.42	0.02	0.0141	0.0251	7.490	0.000
3	750	200	0.44	0.42	0.02	0.0160	0.0282	7.560	0.000
3	750	400	0.45	0.42	0.03	0.0209	0.0340	8.790	0.000
3	750	600	0.45	0.42	0.03	0.0240	0.0376	9.510	0.000
4	0	0	0.32	0.45	-0.13	-0.1377	-0.1124	-20.680	0.000
4	0	200	0.36	0.45	-0.09	-0.1009	-0.0781	-16.390	0.000
4	0	400	0.39	0.45	-0.06	-0.0675	-0.0478	-12.270	0.000
4	0	600	0.42	0.45	-0.03	-0.0433	-0.0208	-5.980	0.000
4	250	0	0.43	0.45	-0.02	-0.0282	-0.0138	-6.100	0.000
4	250	200	0.44	0.45	-0.01	-0.0125	0.0023	-1.440	0.167
4	250	400	0.46	0.45	0.01	0.0024	0.0194	2.680	0.015
4	250	600	0.47	0.45	0.02	0.0119	0.0273	5.330	0.000
4	500	0	0.46	0.45	0.01	0.0056	0.0175	4.040	0.001
4	500	200	0.47	0.45	0.02	0.0135	0.0274	6.170	0.000
4	500	400	0.47	0.45	0.03	0.0194	0.0345	7.470	0.000
4	500	600	0.48	0.45	0.03	0.0245	0.0397	8.830	0.000
4	750	0	0.47	0.45	0.03	0.0177	0.0328	7.010	0.000
4	750	200	0.48	0.45	0.03	0.0206	0.0351	8.010	0.000
4	750	400	0.48	0.45	0.03	0.0241	0.0369	9.910	0.000
4	750	600	0.48	0.45	0.03	0.0279	0.0399	11.810	0.000
5	0	0	0.34	0.52	-0.18	-0.1966	-0.1615	-21.370	0.000
5	0	200	0.38	0.52	-0.13	-0.1489	-0.1168	-17.330	0.000
5	0	400	0.43	0.52	-0.09	-0.0992	-0.0761	-15.910	0.000
5	0	600	0.45	0.52	-0.06	-0.0736	-0.0493	-10.550	0.000
5	250	0	0.47	0.52	-0.05	-0.0524	-0.0399	-15.410	0.000
5	250	200	0.49	0.52	-0.03	-0.0346	-0.0171	-6.180	0.000
5	250	400	0.51	0.52	-0.01	-0.0151	-0.0008	-2.320	0.031
5	250	600	0.52	0.52	0.01	0.0032	0.0155	3.170	0.005
5	500	0	0.51	0.52	0.00	-0.0093	0.0062	-0.420	0.678
5	500	200	0.53	0.52	0.01	0.0085	0.0200	5.160	0.000
5	500	400	0.54	0.52	0.02	0.0163	0.0303	6.970	0.000
5	500	600	0.55	0.52	0.03	0.0263	0.0401	10.070	0.000
5	750	0	0.54	0.52	0.03	0.0193	0.0344	7.430	0.000
5	750	200	0.55	0.52	0.03	0.0214	0.0381	7.430	0.000
5	750	400	0.55	0.52	0.03	0.0277	0.0413	10.590	0.000
5	750	600	0.55	0.52	0.04	0.0309	0.0463	10.470	0.000

Tablo F.8 : Kural B ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OKDSO	Baz Durum Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır	T	P
1	0	0	0.34	0.38	-0.05	-0.0600	-0.0371	-8.860	0.000
1	0	200	0.36	0.38	-0.02	-0.0326	-0.0123	-4.640	0.000
1	0	400	0.39	0.38	0.01	0.0001	0.0190	2.120	0.047
1	0	600	0.43	0.38	0.04	0.0364	0.0502	13.190	0.000
1	250	0	0.45	0.38	0.07	0.0592	0.0770	15.960	0.000
1	250	200	0.47	0.38	0.08	0.0752	0.0901	23.330	0.000
1	250	400	0.49	0.38	0.10	0.0946	0.1092	29.330	0.000
1	250	600	0.50	0.38	0.12	0.1093	0.1224	36.950	0.000
1	500	0	0.51	0.38	0.13	0.1206	0.1391	29.260	0.000
1	500	200	0.53	0.38	0.14	0.1301	0.1524	26.510	0.000
1	500	400	0.54	0.38	0.15	0.1418	0.1600	34.660	0.000
1	500	600	0.55	0.38	0.16	0.1543	0.1721	38.430	0.000
1	750	0	0.55	0.38	0.17	0.1575	0.1781	34.060	0.000
1	750	200	0.57	0.38	0.18	0.1719	0.1900	41.840	0.000
1	750	400	0.57	0.38	0.18	0.1720	0.1945	34.160	0.000
1	750	600	0.57	0.38	0.19	0.1792	0.1986	40.900	0.000
2	0	0	0.33	0.40	-0.07	-0.0822	-0.0618	-14.800	0.000
2	0	200	0.36	0.40	-0.04	-0.0460	-0.0242	-6.750	0.000
2	0	400	0.40	0.40	0.00	-0.0102	0.0085	-0.190	0.852
2	0	600	0.42	0.40	0.03	0.0143	0.0401	4.420	0.000
2	250	0	0.45	0.40	0.05	0.0458	0.0634	13.020	0.000
2	250	200	0.47	0.40	0.07	0.0642	0.0841	15.550	0.000
2	250	400	0.49	0.40	0.10	0.0869	0.1055	21.720	0.000
2	250	600	0.51	0.40	0.11	0.1032	0.1257	21.240	0.000
2	500	0	0.52	0.40	0.13	0.1185	0.1341	33.840	0.000
2	500	200	0.53	0.40	0.13	0.1236	0.1407	32.350	0.000
2	500	400	0.54	0.40	0.15	0.1330	0.1587	23.690	0.000
2	500	600	0.55	0.40	0.15	0.1427	0.1601	36.380	0.000
2	750	0	0.56	0.40	0.17	0.1590	0.1743	45.670	0.000
2	750	200	0.57	0.40	0.17	0.1618	0.1840	32.640	0.000
2	750	400	0.58	0.40	0.18	0.1733	0.1917	41.490	0.000
2	750	600	0.58	0.40	0.19	0.1751	0.1983	33.710	0.000
3	0	0	0.32	0.42	-0.10	-0.1186	-0.0883	-14.290	0.000
3	0	200	0.36	0.42	-0.06	-0.0746	-0.0481	-9.710	0.000
3	0	400	0.40	0.42	-0.02	-0.0323	-0.0097	-3.890	0.001
3	0	600	0.44	0.42	0.01	0.0029	0.0244	2.660	0.015
3	250	0	0.46	0.42	0.04	0.0316	0.0484	9.970	0.000
3	250	200	0.48	0.42	0.06	0.0534	0.0717	14.290	0.000
3	250	400	0.51	0.42	0.09	0.0774	0.0934	22.300	0.000
3	250	600	0.52	0.42	0.10	0.0912	0.1098	22.700	0.000

Tablo F.8 : Kural B ile BAZ durum ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural B Ortalama OKDSO	Baz Durum Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır	T	P
3	500	0	0.54	0.42	0.12	0.1063	0.1285	22.130	0.000
3	500	200	0.54	0.42	0.12	0.1154	0.1299	35.360	0.000
3	500	400	0.56	0.42	0.14	0.1311	0.1481	34.290	0.000
3	500	600	0.57	0.42	0.15	0.1373	0.1560	32.930	0.000
3	750	0	0.59	0.42	0.16	0.1554	0.1738	37.450	0.000
3	750	200	0.59	0.42	0.17	0.1583	0.1797	32.960	0.000
3	750	400	0.60	0.42	0.17	0.1620	0.1867	29.450	0.000
3	750	600	0.61	0.42	0.18	0.1736	0.1959	34.590	0.000
4	0	0	0.33	0.45	-0.12	-0.1363	-0.1062	-16.850	0.000
4	0	200	0.37	0.45	-0.08	-0.0893	-0.0645	-12.980	0.000
4	0	400	0.41	0.45	-0.04	-0.0494	-0.0294	-8.230	0.000
4	0	600	0.45	0.45	0.00	-0.0141	0.0096	-0.400	0.692
4	250	0	0.48	0.45	0.03	0.0177	0.0385	5.670	0.000
4	250	200	0.50	0.45	0.05	0.0428	0.0667	9.580	0.000
4	250	400	0.52	0.45	0.08	0.0637	0.0871	13.490	0.000
4	250	600	0.54	0.45	0.10	0.0879	0.1052	23.480	0.000
4	500	0	0.56	0.45	0.11	0.1027	0.1187	28.850	0.000
4	500	200	0.57	0.45	0.12	0.1108	0.1317	24.240	0.000
4	500	400	0.58	0.45	0.13	0.1236	0.1408	32.280	0.000
4	500	600	0.60	0.45	0.15	0.1384	0.1590	30.260	0.000
4	750	0	0.60	0.45	0.15	0.1384	0.1567	33.600	0.000
4	750	200	0.60	0.45	0.16	0.1478	0.1663	35.680	0.000
4	750	400	0.62	0.45	0.17	0.1615	0.1791	40.490	0.000
4	750	600	0.62	0.45	0.18	0.1664	0.1866	36.580	0.000
5	0	0	0.34	0.52	-0.18	-0.1935	-0.1586	-21.140	0.000
5	0	200	0.38	0.52	-0.13	-0.1494	-0.1158	-16.520	0.000
5	0	400	0.43	0.52	-0.08	-0.0980	-0.0661	-10.760	0.000
5	0	600	0.48	0.52	-0.04	-0.0529	-0.0250	-5.840	0.000
5	250	0	0.52	0.52	0.00	-0.0108	0.0141	0.280	0.784
5	250	200	0.55	0.52	0.03	0.0210	0.0425	6.170	0.000
5	250	400	0.57	0.52	0.06	0.0479	0.0665	12.900	0.000
5	250	600	0.59	0.52	0.08	0.0677	0.0882	15.920	0.000
5	500	0	0.60	0.52	0.09	0.0814	0.0963	25.070	0.000
5	500	200	0.61	0.52	0.10	0.0879	0.1087	19.820	0.000
5	500	400	0.62	0.52	0.11	0.0998	0.1181	24.870	0.000
5	500	600	0.64	0.52	0.12	0.1097	0.1319	22.790	0.000
5	750	0	0.65	0.52	0.13	0.1191	0.1405	25.410	0.000
5	750	200	0.65	0.52	0.14	0.1284	0.1487	28.620	0.000
5	750	400	0.66	0.52	0.14	0.1344	0.1548	29.680	0.000
5	750	600	0.66	0.52	0.15	0.1377	0.1588	29.450	0.000

Tablo F.9 : Kural A ile Kural B ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OKDSO	Kural B Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır	T	P
1	0	0	0.33	0.34	-0.01	-0.0091	-0.0034	-4.520	0.000
1	0	200	0.36	0.36	-0.01	-0.0112	-0.0027	-3.410	0.003
1	0	400	0.37	0.39	-0.02	-0.0271	-0.0156	-7.740	0.000
1	0	600	0.39	0.43	-0.04	-0.0458	-0.0354	-16.270	0.000
1	250	0	0.39	0.45	-0.07	-0.0749	-0.0572	-15.560	0.000
1	250	200	0.40	0.47	-0.07	-0.0787	-0.0658	-23.400	0.000
1	250	400	0.40	0.49	-0.08	-0.0919	-0.0771	-23.930	0.000
1	250	600	0.41	0.50	-0.09	-0.1000	-0.0869	-29.880	0.000
1	500	0	0.40	0.51	-0.12	-0.1262	-0.1059	-23.970	0.000
1	500	200	0.40	0.53	-0.12	-0.1377	-0.1116	-20.010	0.000
1	500	400	0.40	0.54	-0.13	-0.1422	-0.1224	-27.910	0.000
1	500	600	0.41	0.55	-0.14	-0.1525	-0.1300	-26.320	0.000
1	750	0	0.40	0.55	-0.15	-0.1638	-0.1381	-24.580	0.000
1	750	200	0.40	0.57	-0.16	-0.1742	-0.1510	-29.440	0.000
1	750	400	0.40	0.57	-0.16	-0.1777	-0.1507	-25.390	0.000
1	750	600	0.40	0.57	-0.17	-0.1835	-0.1567	-26.520	0.000
2	0	0	0.32	0.33	0.00	-0.0100	0.0027	-1.190	0.248
2	0	200	0.35	0.36	-0.01	-0.0175	-0.0080	-5.640	0.000
2	0	400	0.37	0.40	-0.02	-0.0265	-0.0178	-10.600	0.000
2	0	600	0.39	0.42	-0.03	-0.0400	-0.0205	-6.470	0.000
2	250	0	0.39	0.45	-0.06	-0.0685	-0.0529	-16.290	0.000
2	250	200	0.40	0.47	-0.07	-0.0787	-0.0602	-15.710	0.000
2	250	400	0.41	0.49	-0.08	-0.0888	-0.0722	-20.280	0.000
2	250	600	0.42	0.51	-0.09	-0.1053	-0.0824	-17.190	0.000
2	500	0	0.41	0.52	-0.11	-0.1180	-0.1032	-31.280	0.000
2	500	200	0.42	0.53	-0.11	-0.1230	-0.1062	-28.540	0.000
2	500	400	0.42	0.54	-0.12	-0.1394	-0.1083	-16.700	0.000
2	500	600	0.42	0.55	-0.13	-0.1363	-0.1163	-26.380	0.000
2	750	0	0.41	0.56	-0.15	-0.1607	-0.1428	-35.350	0.000
2	750	200	0.42	0.57	-0.15	-0.1648	-0.1383	-23.890	0.000
2	750	400	0.42	0.58	-0.16	-0.1701	-0.1495	-32.430	0.000
2	750	600	0.42	0.58	-0.16	-0.1763	-0.1518	-28.020	0.000
3	0	0	0.32	0.32	0.00	-0.0074	0.0059	-0.230	0.819
3	0	200	0.35	0.36	-0.01	-0.0125	-0.0035	-3.680	0.002
3	0	400	0.38	0.40	-0.02	-0.0286	-0.0165	-7.760	0.000
3	0	600	0.41	0.44	-0.03	-0.0354	-0.0225	-9.410	0.000
3	250	0	0.41	0.46	-0.05	-0.0616	-0.0455	-13.950	0.000
3	250	200	0.42	0.48	-0.06	-0.0726	-0.0532	-13.560	0.000
3	250	400	0.43	0.51	-0.07	-0.0811	-0.0671	-22.060	0.000
3	250	600	0.44	0.52	-0.08	-0.0886	-0.0709	-18.780	0.000

Tablo F.9 : Kural A ile Kural B ortalama katma değersiz süre oranları (OKDSO) karşılaştırması için eşleştirilmiş t testi sonuçları (DEVAM)

Not : Ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanıştır ve yuvarlatılmıştır.

YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Kural A Ortalama OKDSO	Kural B Ortalama OKDSO	FARK	% 95 Güven Aralığı Alt Sınır	% 95 Güven Aralığı Üst Sınır	T	P
3	500	0	0.43	0.54	-0.11	-0.1171	-0.0946	-19.660	0.000
3	500	200	0.44	0.54	-0.11	-0.1135	-0.0987	-30.010	0.000
3	500	400	0.45	0.56	-0.12	-0.1258	-0.1056	-24.020	0.000
3	500	600	0.45	0.57	-0.12	-0.1327	-0.1107	-23.210	0.000
3	750	0	0.44	0.59	-0.14	-0.1541	-0.1359	-33.440	0.000
3	750	200	0.44	0.59	-0.15	-0.1571	-0.1367	-30.110	0.000
3	750	400	0.45	0.60	-0.15	-0.1610	-0.1328	-21.830	0.000
3	750	600	0.45	0.61	-0.15	-0.1661	-0.1417	-26.380	0.000
4	0	0	0.32	0.33	0.00	-0.0100	0.0024	-1.280	0.217
4	0	200	0.36	0.37	-0.01	-0.0178	-0.0074	-5.080	0.000
4	0	400	0.39	0.41	-0.02	-0.0242	-0.0123	-6.460	0.000
4	0	600	0.42	0.45	-0.03	-0.0379	-0.0217	-7.690	0.000
4	250	0	0.43	0.48	-0.05	-0.0582	-0.0400	-11.250	0.000
4	250	200	0.44	0.50	-0.06	-0.0707	-0.0489	-11.510	0.000
4	250	400	0.46	0.52	-0.06	-0.0750	-0.0542	-13.010	0.000
4	250	600	0.47	0.54	-0.08	-0.0838	-0.0701	-23.420	0.000
4	500	0	0.46	0.56	-0.10	-0.1081	-0.0902	-23.140	0.000
4	500	200	0.47	0.57	-0.10	-0.1102	-0.0913	-22.320	0.000
4	500	400	0.47	0.58	-0.11	-0.1137	-0.0968	-25.980	0.000
4	500	600	0.48	0.60	-0.12	-0.1251	-0.1082	-28.890	0.000
4	750	0	0.47	0.60	-0.12	-0.1321	-0.1125	-26.120	0.000
4	750	200	0.48	0.60	-0.13	-0.1401	-0.1183	-24.800	0.000
4	750	400	0.48	0.62	-0.14	-0.1469	-0.1327	-41.250	0.000
4	750	600	0.48	0.62	-0.14	-0.1535	-0.1318	-27.480	0.000
5	0	0	0.34	0.34	0.00	-0.0073	0.0012	-1.490	0.153
5	0	200	0.38	0.38	0.00	-0.0085	0.0080	-0.070	0.942
5	0	400	0.43	0.43	-0.01	-0.0148	0.0036	-1.280	0.218
5	0	600	0.45	0.48	-0.02	-0.0304	-0.0147	-5.990	0.000
5	250	0	0.47	0.52	-0.05	-0.0581	-0.0375	-9.750	0.000
5	250	200	0.49	0.55	-0.06	-0.0695	-0.0457	-10.160	0.000
5	250	400	0.51	0.57	-0.07	-0.0744	-0.0558	-14.630	0.000
5	250	600	0.52	0.59	-0.07	-0.0781	-0.0591	-15.080	0.000
5	500	0	0.51	0.60	-0.09	-0.0994	-0.0814	-21.000	0.000
5	500	200	0.53	0.61	-0.08	-0.0957	-0.0725	-15.180	0.000
5	500	400	0.54	0.62	-0.09	-0.0960	-0.0754	-17.380	0.000
5	500	600	0.55	0.64	-0.09	-0.0980	-0.0772	-17.600	0.000
5	750	0	0.54	0.65	-0.10	-0.1163	-0.0897	-16.240	0.000
5	750	200	0.55	0.65	-0.11	-0.1213	-0.0963	-18.180	0.000
5	750	400	0.55	0.66	-0.11	-0.1215	-0.0987	-20.210	0.000
5	750	600	0.55	0.66	-0.11	-0.1236	-0.0958	-16.500	0.000

Minitab Project Report

08.06.2005 02:08:44

```
Welcome to Minitab, press F1 for help.
```

Results for: q1r1i.MTW

Paired T-Test and CI: C8; C9

```
Paired T for C8 - C9

               N      Mean    StDev  SE Mean
C8            20   2337.91   289.26    64.68
C9            20   2749.76   334.03    74.69
Difference    20  -411.845  251.027    56.131


95% CI for mean difference: (-529.330; -294.361)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -7.34  P-Value = 0.000
```

Results for: q2r1i.MTW

Paired T-Test and CI: C8; C9

```
Paired T for C8 - C9

               N      Mean    StDev  SE Mean
C8            20   2493.00   291.73    65.23
C9            20   2749.76   334.03    74.69
Difference    20  -256.756  222.845    49.830


95% CI for mean difference: (-361.050; -152.461)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -5.15  P-Value = 0.000
```

Results for: q3r1i.MTW

Paired T-Test and CI: C8; C9

```
Paired T for C8 - C9

               N      Mean    StDev  SE Mean
C8            20   2619.70   289.82    64.81
C9            20   2749.76   334.03    74.69
Difference    20  -130.052  201.235    44.998


95% CI for mean difference: (-224.233; -35.871)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -2.89  P-Value = 0.009
```

Şekil F.1 : Kural A ile Baz Durum OİAS değerlerinin eşleştirilmiş t testi için çalışmada elde edilen Minitab Proje Raporu örnek parçası

EK G - BİRİNCİL PERFORMANS ÖLÇÜTLERİNİN ORTALAMALARI :

Tablo G.1 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS değerleri

Not : Ortalama OİAS değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanmış ve yuvarlatılmıştır.

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural A	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2338	2749	2866	2898
2	2268	2769	2973	2985
3	2239	2898	3162	3261
4	2255	3072	3438	3635
5	2306	3482	4042	4512

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural B	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2384	3492	4462	5422
2	2302	3438	4571	5392
3	2246	3532	4704	5863
4	2298	3650	4913	5720
5	2339	4071	5518	6629

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural A	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2493	2801	2897	2912
2	2429	2851	2989	3043
3	2440	3001	3201	3311
4	2492	3201	3527	3680
5	2635	3685	4227	4570

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural B	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2563	3678	4681	5825
2	2551	3647	4600	5744
3	2528	3771	4800	6053
4	2597	3953	5057	5967
5	2676	4457	5674	6919

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural A	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2620	2857	2918	2926
2	2598	2945	3033	3067
3	2614	3104	3281	3378
4	2717	3356	3608	3731
5	2986	3898	4367	4668

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural B	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2825	3883	4829	5960
2	2817	3945	4932	6014
3	2836	4038	5114	6095
4	2892	4254	5261	6420
5	3093	4849	5941	7026

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural A	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	2714	2921	2956	2919
2	2755	2991	3054	3072
3	2827	3200	3303	3419
4	2941	3458	3676	3778
5	3260	4117	4542	4748

Ortalama OİAS (dakika)				
Kural B	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	3130	4101	5133	6091
2	3081	4215	4955	6190
3	3160	4244	5212	6541
4	3248	4571	5652	6634
5	3564	5204	6308	7031

Tablo G.2 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OPİSD değerleri

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanmış ve yuvarlatılmıştır.

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural A	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	87	101	105	106
2	85	102	109	109
3	85	107	116	119
4	88	116	129	135
5	92	135	154	172

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural B	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	89	127	160	193
2	86	126	166	194
3	85	130	170	211
4	89	136	183	210
5	93	156	208	248

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural A	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	92	102	105	106
2	91	105	109	111
3	92	111	116	121
4	96	121	129	137
5	104	141	154	173

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural B	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	94	133	167	207
2	95	133	166	205
3	95	138	174	219
4	99	147	186	219
5	105	170	214	258

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural A	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	96	104	106	107
2	96	108	111	112
3	98	114	120	123
4	104	126	134	139
5	117	149	166	177

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural B	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	104	140	173	213
2	104	143	176	215
3	105	147	185	219
4	109	158	194	236
5	120	184	223	263

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural A	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	99	106	108	106
2	102	110	112	113
3	105	117	121	125
4	111	129	137	140
5	126	157	172	180

Ortalama OPİSD (parça adedi)				
Kural B	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	114	147	184	218
2	113	153	178	221
3	116	154	188	236
4	122	170	208	242
5	137	197	236	263

Tablo G.3 : Kural A ve Kural B için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OKDSO değerleri

Not : Ortalama OPİSD değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanmış ve yuvarlatılmıştır.

Ortalama OKDSO				
Kural A	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .330	0 .387	0 .399	0 .402
2	0 .322	0 .391	0 .413	0 .412
3	0 .317	0 .408	0 .433	0 .441
4	0 .323	0 .427	0 .459	0 .473
5	0 .336	0 .469	0 .514	0 .542

Ortalama OKDSO				
Kural B	HSAY = % 0			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .336	0 .453	0 .515	0 .553
2	0 .326	0 .452	0 .524	0 .564
3	0 .318	0 .462	0 .539	0 .586
4	0 .327	0 .476	0 .559	0 .595
5	0 .340	0 .517	0 .604	0 .645

Ortalama OKDSO				
Kural A	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .355	0 .395	0 .402	0 .403
2	0 .350	0 .402	0 .415	0 .419
3	0 .352	0 .421	0 .438	0 .444
4	0 .358	0 .443	0 .468	0 .476
5	0 .383	0 .490	0 .530	0 .545

Ortalama OKDSO				
Kural B	HSAY = % 200			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .362	0 .468	0 .526	0 .566
2	0 .362	0 .472	0 .530	0 .570
3	0 .360	0 .484	0 .544	0 .591
4	0 .371	0 .503	0 .569	0 .605
5	0 .383	0 .547	0 .614	0 .654

Ortalama OKDSO				
Kural A	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .373	0 .402	0 .404	0 .404
2	0 .375	0 .413	0 .420	0 .420
3	0 .378	0 .433	0 .446	0 .449
4	0 .390	0 .459	0 .475	0 .478
5	0 .428	0 .508	0 .539	0 .550

Ortalama OKDSO				
Kural B	HSAY = % 400			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .395	0 .487	0 .536	0 .568
2	0 .397	0 .494	0 .543	0 .580
3	0 .401	0 .507	0 .561	0 .596
4	0 .408	0 .523	0 .580	0 .618
5	0 .433	0 .573	0 .625	0 .660

Ortalama OKDSO				
Kural A	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .388	0 .407	0 .407	0 .404
2	0 .395	0 .418	0 .423	0 .420
3	0 .406	0 .442	0 .447	0 .452
4	0 .416	0 .467	0 .480	0 .482
5	0 .454	0 .525	0 .549	0 .554

Ortalama OKDSO				
Kural B	HSAY = % 600			
YDS	İSAY (%)			
	0	250	500	750
1	0 .428	0 .501	0 .548	0 .574
2	0 .425	0 .512	0 .549	0 .584
3	0 .435	0 .522	0 .568	0 .606
4	0 .446	0 .544	0 .597	0 .624
5	0 .477	0 .593	0 .636	0 .664

Tablo G.4 : Baz Durum için benzetim koşumu tekrar sayısı 20 üzerinden hesaplanan ortalama OİAS, ortalama OPİSD ve ortalama OKDSO değerleri

Not : Ortalama OİAS, ortalama OPİSD ve ortalama OKDSO değerleri benzetim koşum tekrar sayısı 20 değeri üzerinden hesaplanmış ve yuvarlatılmıştır.

Baz Durum			
YDS	**Ortalama OİAS (dakika)**	**Ortalama OPİSD (parça adedi)**	**Ortalama OKDSO**
1	**2750**	**100**	**0 .385**
2	**2887**	**106**	**0 .398**
3	**3176**	**116**	**0 .422**
4	**3555**	**133**	**0 .448**
5	**4765**	**180**	**0 .516**

EK H

İKİNCİL PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ İÇİN BENZETİM DENEYLERİ SONUÇLARININ ORTALAMA DEĞERLERİ :

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları

Baz Durum					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	-	-	0.67	0.69	0.64
10	-	-	0.67	0.73	0.61
15	-	-	0.68	0.77	0.58
20	-	-	0.69	0.82	0.56
25	-	-	0.71	0.88	0.54
Genel Ortalama			0.68	0.78	0.59
Ortalamaların Minimumu			0.67	0.69	0.54
Ortalamaların Maksimumu			0.71	0.88	0.64

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 5 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	0	0	0.67	0.60	0.73
10	0	0	0.67	0.62	0.72
15	0	0	0.67	0.64	0.71
20	0	0	0.69	0.67	0.71
25	0	0	0.71	0.70	0.72
5	250	0	0.69	0.66	0.73
10	250	0	0.71	0.69	0.72
15	250	0	0.72	0.73	0.72
20	250	0	0.75	0.76	0.73
25	250	0	0.78	0.81	0.76
5	500	0	0.69	0.68	0.71
10	500	0	0.71	0.71	0.70
15	500	0	0.72	0.75	0.69
20	500	0	0.75	0.79	0.70
25	500	0	0.79	0.84	0.73
5	750	0	0.69	0.68	0.69
10	750	0	0.70	0.72	0.67
15	750	0	0.71	0.76	0.67
20	750	0	0.74	0.80	0.68
25	750	0	0.78	0.86	0.71
5	0	200	0.68	0.62	0.74
10	0	200	0.69	0.64	0.74
15	0	200	0.70	0.67	0.73
20	0	200	0.72	0.70	0.73
25	0	200	0.74	0.74	0.74
5	250	200	0.70	0.67	0.73
10	250	200	0.71	0.70	0.73
15	250	200	0.73	0.73	0.72
20	250	200	0.75	0.77	0.74
25	250	200	0.79	0.82	0.76

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	500	200	0.69	0.68	0.70
10	500	200	0.71	0.72	0.70
15	500	200	0.72	0.75	0.69
20	500	200	0.75	0.79	0.71
25	500	200	0.79	0.85	0.74
5	750	200	0.69	0.68	0.69
10	750	200	0.70	0.72	0.67
15	750	200	0.72	0.76	0.67
20	750	200	0.74	0.80	0.68
25	750	200	0.79	0.86	0.72
5	0	400	0.69	0.64	0.75
10	0	400	0.70	0.66	0.74
15	0	400	0.71	0.69	0.74
20	0	400	0.73	0.72	0.75
25	0	400	0.76	0.76	0.76
5	250	400	0.70	0.67	0.73
10	250	400	0.71	0.70	0.73
15	250	400	0.73	0.74	0.73
20	250	400	0.76	0.78	0.74
25	250	400	0.80	0.83	0.76
5	500	400	0.69	0.68	0.70
10	500	400	0.71	0.72	0.70
15	500	400	0.73	0.75	0.70
20	500	400	0.75	0.80	0.71
25	500	400	0.80	0.85	0.74
5	750	400	0.69	0.68	0.69
10	750	400	0.70	0.72	0.67
15	750	400	0.72	0.76	0.67
20	750	400	0.74	0.80	0.68
25	750	400	0.79	0.86	0.72

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	0	600	0.70	0.65	0.75
10	0	600	0.71	0.68	0.74
15	0	600	0.72	0.70	0.75
20	0	600	0.75	0.74	0.76
25	0	600	0.78	0.78	0.77
5	250	600	0.70	0.67	0.73
10	250	600	0.72	0.71	0.72
15	250	600	0.73	0.75	0.72
20	250	600	0.76	0.78	0.74
25	250	600	0.80	0.83	0.76
5	500	600	0.69	0.68	0.70
10	500	600	0.71	0.72	0.69
15	500	600	0.72	0.76	0.69
20	500	600	0.75	0.80	0.71
25	500	600	0.80	0.85	0.74
5	750	600	0.68	0.69	0.68
10	750	600	0.70	0.72	0.67
15	750	600	0.72	0.76	0.67
20	750	600	0.74	0.81	0.68
25	750	600	0.79	0.86	0.71
Genel Ortalama			0.73	0.74	0.72
Ortalamaların Minimumu			0.67	0.60	0.67
Ortalamaların Maksimumu			0.80	0.86	0.77

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	0	0	0.67	0.56	0.77
10	0	0	0.67	0.58	0.76
15	0	0	0.68	0.60	0.75
20	0	0	0.69	0.62	0.76
25	0	0	0.71	0.66	0.77
5	250	0	0.75	0.61	0.88
10	250	0	0.76	0.65	0.88
15	250	0	0.78	0.68	0.88
20	250	0	0.80	0.71	0.88
25	250	0	0.83	0.76	0.90
5	500	0	0.78	0.64	0.91
10	500	0	0.79	0.67	0.91
15	500	0	0.81	0.70	0.92
20	500	0	0.84	0.75	0.92
25	500	0	0.87	0.80	0.94
5	750	0	0.79	0.65	0.93
10	750	0	0.81	0.69	0.93
15	750	0	0.83	0.72	0.94
20	750	0	0.85	0.76	0.94
25	750	0	0.89	0.82	0.96
5	0	200	0.69	0.58	0.80
10	0	200	0.70	0.60	0.80
15	0	200	0.70	0.62	0.79
20	0	200	0.72	0.65	0.79
25	0	200	0.74	0.68	0.81
5	250	200	0.75	0.62	0.88
10	250	200	0.77	0.65	0.89
15	250	200	0.79	0.69	0.89
20	250	200	0.81	0.72	0.90
25	250	200	0.85	0.77	0.92

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	500	200	0.78	0.64	0.92
10	500	200	0.80	0.68	0.92
15	500	200	0.82	0.71	0.92
20	500	200	0.84	0.75	0.93
25	500	200	0.88	0.81	0.95
5	750	200	0.79	0.65	0.94
10	750	200	0.81	0.69	0.94
15	750	200	0.84	0.72	0.95
20	750	200	0.86	0.77	0.95
25	750	200	0.89	0.82	0.96
5	0	400	0.71	0.59	0.82
10	0	400	0.72	0.61	0.82
15	0	400	0.73	0.63	0.83
20	0	400	0.75	0.67	0.82
25	0	400	0.77	0.71	0.84
5	250	400	0.76	0.63	0.90
10	250	400	0.78	0.66	0.90
15	250	400	0.80	0.69	0.91
20	250	400	0.82	0.73	0.91
25	250	400	0.86	0.78	0.93
5	500	400	0.78	0.64	0.92
10	500	400	0.80	0.68	0.92
15	500	400	0.82	0.71	0.93
20	500	400	0.85	0.76	0.94
25	500	400	0.88	0.81	0.95
5	750	400	0.80	0.65	0.94
10	750	400	0.82	0.69	0.94
15	750	400	0.84	0.73	0.95
20	750	400	0.86	0.77	0.95
25	750	400	0.90	0.83	0.96

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.1 : Ortalama sistem, uzman hücre ve seçenek hücre kullanım oranlarının ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B					
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Sistem Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Uzman Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları	Ortalama Seçenek Hücre Kullanım Oranı Ortalamaları
5	0	600	0.72	0.60	0.84
10	0	600	0.74	0.63	0.84
15	0	600	0.75	0.65	0.85
20	0	600	0.77	0.69	0.85
25	0	600	0.80	0.73	0.87
5	250	600	0.77	0.63	0.90
10	250	600	0.79	0.67	0.91
15	250	600	0.80	0.70	0.90
20	250	600	0.83	0.74	0.92
25	250	600	0.86	0.79	0.94
5	500	600	0.79	0.65	0.93
10	500	600	0.80	0.68	0.93
15	500	600	0.83	0.72	0.93
20	500	600	0.85	0.76	0.95
25	500	600	0.89	0.82	0.95
5	750	600	0.80	0.66	0.94
10	750	600	0.82	0.69	0.94
15	750	600	0.84	0.73	0.95
20	750	600	0.87	0.77	0.96
25	750	600	0.90	0.83	0.96
Genel Ortalama			0.80	0.69	0.90
Ortalamaların Minimumu			0.67	0.56	0.75
Ortalamaların Maksimumu			0.90	0.83	0.96

Not : Ortalama kullanım oranları ortalamaları (ile minimum ve maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama kullanım oranları ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları

Baz Durum				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	-	-	1907	345
10	-	-	2104	350
15	-	-	2480	364
20	-	-	2952	379
25	-	-	4346	416
Genel Ortalama			2758	371
Ortalamaların Minimumu			1907	345
Ortalamaların Maksimumu			4346	416

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 5 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	0	0	1408	303
10	0	0	1329	297
15	0	0	1315	290
20	0	0	1287	298
25	0	0	1304	310
5	250	0	1776	365
10	250	0	1766	372
15	250	0	1874	388
20	250	0	2005	406
25	250	0	2363	439
5	500	0	1956	365
10	500	0	2053	376
15	500	0	2226	394
20	500	0	2476	415
25	500	0	3000	454
5	750	0	2017	364
10	750	0	2113	370
15	750	0	2383	392
20	750	0	2752	415
25	750	0	3548	459
5	0	200	1483	338
10	0	200	1394	335
15	0	200	1394	338
20	0	200	1432	345
25	0	200	1534	368
5	250	200	1827	370
10	250	200	1858	377
15	250	200	1985	394
20	250	200	2151	413
25	250	200	2581	447

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	500	200	2000	366
10	500	200	2081	376
15	500	200	2281	395
20	500	200	2570	419
25	500	200	3193	460
5	750	200	2036	364
10	750	200	2176	374
15	750	200	2458	392
20	750	200	2815	415
25	750	200	3616	460
5	0	400	1596	358
10	0	400	1532	363
15	0	400	1519	370
20	0	400	1588	385
25	0	400	1818	414
5	250	400	1898	372
10	250	400	1976	381
15	250	400	2108	399
20	250	400	2327	420
25	250	400	2810	455
5	500	400	2038	365
10	500	400	2131	378
15	500	400	2381	397
20	500	400	2688	419
25	500	400	3345	463
5	750	400	2059	364
10	750	400	2226	372
15	750	400	2545	394
20	750	400	2900	414
25	750	400	3744	460

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı A				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	0	600	1685	370
10	0	600	1706	377
15	0	600	1734	392
20	0	600	1832	403
25	0	600	2093	434
5	250	600	1992	373
10	250	600	2047	381
15	250	600	2232	402
20	250	600	2453	422
25	250	600	3037	462
5	500	600	2087	367
10	500	600	2160	379
15	500	600	2423	396
20	500	600	2773	420
25	500	600	3547	465
5	750	600	2058	363
10	750	600	2243	371
15	750	600	2600	395
20	750	600	2955	415
25	750	600	3845	460
Genel Ortalama			2207	390
Ortalamaların Minimumu			1287	290
Ortalamaların Maksimumu			3845	465

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	0	0	1472	310
10	0	0	1397	298
15	0	0	1328	292
20	0	0	1368	301
25	0	0	1368	313
5	250	0	2574	415
10	250	0	2472	419
15	250	0	2535	429
20	250	0	2597	443
25	250	0	2957	468
5	500	0	3738	439
10	500	0	3784	448
15	500	0	3864	458
20	500	0	3973	474
25	500	0	4435	502
5	750	0	4912	450
10	750	0	4735	462
15	750	0	5170	476
20	750	0	4849	488
25	750	0	5604	515
5	0	200	1576	344
10	0	200	1565	345
15	0	200	1503	348
20	0	200	1554	358
25	0	200	1610	369
5	250	200	2806	419
10	250	200	2699	428
15	250	200	2803	438
20	250	200	2929	452
25	250	200	3336	481

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	500	200	4000	443
10	500	200	3818	450
15	500	200	3969	460
20	500	200	4112	479
25	500	200	4602	504
5	750	200	5395	455
10	750	200	5190	461
15	750	200	5402	476
20	750	200	5133	490
25	750	200	5940	516
5	0	400	1812	377
10	0	400	1772	384
15	0	400	1755	393
20	0	400	1785	400
25	0	400	1954	421
5	250	400	3019	430
10	250	400	3063	435
15	250	400	3075	449
20	250	400	3258	460
25	250	400	3729	491
5	500	400	4176	446
10	500	400	4222	452
15	500	400	4343	464
20	500	400	4333	482
25	500	400	4887	508
5	750	400	5568	454
10	750	400	5516	463
15	750	400	5443	478
20	750	400	5630	493
25	750	400	6027	518

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

Tablo H.2 : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (devam)

Dışsal İş Akışı Esnekliğini Uygulama Kuralı B				
YDS	İSAY (%)	HSAY (%)	Ortalama Parti Teslim Gecikme Süreleri Ortalamaları (dakika)	Teslimi Geciken Parti Adedi Ortalamaları (adet)
5	0	600	2138	401
10	0	600	2050	405
15	0	600	2087	417
20	0	600	2133	428
25	0	600	2435	447
5	250	600	3270	435
10	250	600	3356	444
15	250	600	3300	455
20	250	600	3587	469
25	250	600	4107	498
5	500	600	4523	451
10	500	600	4225	456
15	500	600	4419	469
20	500	600	4763	486
25	500	600	5294	509
5	750	600	5715	457
10	750	600	5694	466
15	750	600	5978	479
20	750	600	5895	494
25	750	600	6038	519
Genel Ortalama			3643	441
Ortalamaların Minimumu			1328	292
Ortalamaların Maksimumu			6038	519

Not : Ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamaları ve teslimi geciken parti adedi ortalamaları (ve minimum ile maksimum değerleri) tekrar sayısı 20 değeri üzerinden ve genel ortalamalar ise ortalama parti teslim gecikme süreleri ortalamalarının nicel faktör seviyelerinin kombinasyon adedi olan 80 değeri üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tablo değerleri yuvarlatılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ÖZKIRIM İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'nden lisans derecesini aldıktan sonra aynı fakültede göreve başladı ve bu arda İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği yüksek lisans programını tamamladı. Bir süre TCDD adına İngiltere'de dil eğitimi ve mesleki eğitim gördükten sonra TCDD Haydarpaşa Liman İşletmesinde çalıştı. Halen İTÜ Makina Fakültesinde görev yapan Mustafa ÖZKIRIM eğitim, seminer ve akademik yayın faaliyetlerinde bulunmaktadır.