

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAKIM ÇALIŞMASI ESASLI DEMONTAJ HATTI İÇİN OPTİMİZASYON  
YAKLAŞIMI: BEYAZ EŞYA ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA**

**DOKTORA TEZİ**

**Dicle ASLAN**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**MAYIS 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAKIM ÇALIŞMASI ESASLI DEMONTAJ HATTI İÇİN OPTİMİZASYON  
YAKLAŞIMI: BEYAZ EŞYA ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA**

**DOKTORA TEZİ**

**Dicle ASLAN  
(507142103)**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN**

**MAYIS 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507142103 numaralı Doktora Öğrencisi Dicle ASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TAKIM ÇALIŞMASI ESASLI DEMONTAJ HATTI İÇİN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI: BEYAZ EŞYA ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. M. Bülent DURMUŞOĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Şule İtir SATOĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. İhsan KAYA** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Nezir AYDIN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi : 04 Nisan 2019**  
**Savunma Tarihi : 06 Mayıs 2019**





*Eşime ve oğluma,*



## ÖNSÖZ

Günümüzde artan nüfus, değişen yaşam biçimleri ve tüketimin hızlanması nedeniyle atıklar içerisinde elektrikli ve elektronik eşya atıkları hızlı bir şekilde artış göstermeye başlamıştır. Bu atıkların çoğu içerikleri itibari ile tehlikeli atıklar sınıfına girdiğinden çevreye ve insan sağlığına tehdit oluşturmaktadır. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların kontrolüne ilişkin Avrupa Birliği ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı kapsamında yönetmelikler yayınlanmıştır. Yönetmelik kapsamında elektrikli ve elektronik eşya üreticileri ile tüketicilere atıkların geri kazanılması ile ilgili sorumluluklar verilmiştir.

Atık eşyaların geri kazanımına yönelik yöntemlerden biri tez çalışması kapsamında da ele alınan demontaj sistemidir. Demontaj sistemi, halihazırda nihai hale getirilmiş olan bir ürünün kendini oluşturan parçalarına ayrılması olarak ifade edilebilir. Demontaj hattı montaj hattının tam tersi olarak düşünülüyor olsa da montaj hattına göre daha karmaşık bir prosestir. Demontaj hattı dengeleme, bir dizi sökme görevini, belirli bir iş istasyonu sırasına göre bazı performans ölçütlerini (istasyon sayısı, çalışan sayısı, çevrim süresi ve iş yükü) optimize etme işlemidir.

Günümüzde atıkların hem çevreye zararlı etkilerin azaltılması hem de ekonomiye kazandırılması konusunda çalışan memnuniyetini de artırıcı niteliğe sahip demontaj sistemlerine olan ihtiyaç artmıştır. Bu kapsamda, günümüzde klasik yapıdaki her istasyonda bir çalışanın çalışabildiği istasyon yapısı yerini birden fazla sayıda işgörenin aynı istasyonda çalışabildiği takım çalışması esaslı demontaj sistemlerine bırakmıştır. Takım esaslı çalışma sistemi ile demontaj hattındaki katma değeri olmayan süreleri en küçükleme ve doğru istasyon-takım eşleştirmesi ile demontaj hatlarında iş öğelerini sıralama çalışmalarının da demontaj hattı tasarımında önemi büyüktür.

Tez çalışması kapsamında, takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme probleminin çözülmesi amacıyla yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Geliştirilen metodoloji ile takım esaslı çalışmaya imkân sağlayacak bir karma modellenmiş demontaj hattı tasarımı gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Metodoloji hem gerçek sökme hatları üzerinde hem de data setleri üzerinde uygulanmış olup sonuçların analizi gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmam kapsamında; tecrübesi, bilgisi ve ilgisi ile bana desteğini her zaman gösteren çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN'a, bu konuda çalışma olanağı sağlayan ve tez çalışması süresince her türlü desteği için değerli yöneticilerime, manevi desteklerinden ve her zaman göstermiş olduğu sabrından, tezime değerli destek ve katkılarından dolayı eşim Fatih ASLAN'a teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Dicle ASLAN  
(Endüstri Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                        |       |
|------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ.....                                                             | vii   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                      | ix    |
| KISALTMALAR .....                                                      | xi    |
| SEMBOLLER .....                                                        | xiii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                   | xv    |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                     | xvii  |
| ÖZET.....                                                              | xix   |
| SUMMARY .....                                                          | xxiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                         | 1     |
| 2. ATIKLAR.....                                                        | 9     |
| 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                         | 13    |
| 3.1 Demontaj Hattı Dengeleme ile İlgili Literatür Araştırması .....    | 13    |
| 3.2 Takım Esaslı Çalışma ile İlgili Literatür Araştırması .....        | 18    |
| 3.3 Çalışmanın Literatüre Katkısı .....                                | 23    |
| 4. PROBLEM TANIMI .....                                                | 27    |
| 5. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL .....                               | 31    |
| 5.1 İndisler.....                                                      | 31    |
| 5.2 Parametreler .....                                                 | 31    |
| 5.3 Değişkenler.....                                                   | 32    |
| 6. GELİŞTİRİLEN SEZGİSELLER.....                                       | 37    |
| 6.1 Sezgisel Yöntem-1: MMDLBH-I.....                                   | 37    |
| 6.2 Sezgisel Yöntem-2: MMDLBH-II .....                                 | 40    |
| 7. UYGULAMA.....                                                       | 43    |
| 7.1 Uygulamanın Yapıldığı Firmanın Tanıtımı.....                       | 43    |
| 7.2 Uygulamanın Yapıldığı Kısım .....                                  | 43    |
| 7.3 Çamaşır Makinesi Ürünü İçin Geliştirilen Modelin Uygulanması ..... | 44    |
| 7.4 Bulaşık Makinesi Ürünü İçin Geliştirilen Modelin Uygulanması.....  | 50    |
| 8. HESAPLAMA ANALİZİ .....                                             | 59    |
| 8.1 Duyarlılık Analizi.....                                            | 66    |
| 9. SONUÇLAR .....                                                      | 69    |
| KAYNAKLAR .....                                                        | 73    |
| EKLER.....                                                             | 81    |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                          | 95    |



## KISALTMALAR

|                  |                                                                |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>AEEE</b>      | : Atık Elektrikli Elektronik Eşyalar                           |
| <b>AOG</b>       | : AND/OR Grafiği                                               |
| <b>CPU</b>       | : Central Processing Unit                                      |
| <b>DAOG</b>      | : Dönüştürülmüş AND/OR Grafiği                                 |
| <b>DHDP</b>      | : Demontaj Hattı Dengeleme Problemi                            |
| <b>DLBP</b>      | : Disassembly Line Balancing Problem                           |
| <b>EOL</b>       | : End-of-Life                                                  |
| <b>KMHDP</b>     | : Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi                |
| <b>KTDP</b>      | : Karma Tamsayı Doğrusal Programlama                           |
| <b>KTP</b>       | : Karma Tamsayı Programlama                                    |
| <b>LBS</b>       | : Lower Bound of Station                                       |
| <b>LBW</b>       | : Lower Bound of Worker                                        |
| <b>MHDP</b>      | : Montaj Hattı Dengeleme Problemi                              |
| <b>MILP</b>      | : Mixed Integer Linear Programming                             |
| <b>MMDLBH-I</b>  | : Takım Çalışması Esaslı Demontaj Hattı için Sezgisel Yöntem-1 |
| <b>MMDLBH-II</b> | : Takım Çalışması Esaslı Demontaj Hattı için Sezgisel Yöntem-2 |
| <b>PÖD</b>       | : Parça Öncelik Diyagramı                                      |
| <b>SUF</b>       | : Space Utilization Factor                                     |
| <b>TAOG</b>      | : Transformed AND/OR Graph                                     |
| <b>YDM</b>       | : Yeniden Değerlendirme Merkezi                                |
| <b>WEEE</b>      | : Waste of Electrical and Electronic Equipments                |



## SEMBOLLER

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| <b>CT</b> | : Çevrim süresi          |
| <b>t</b>  | : Zaman                  |
| <b>M</b>  | : Pozitif çok büyük sayı |





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.3 : Literatür araştırması sonuçları.....                              | 24 |
| Çizelge 7.3.1 : Çamaşır makinesi demontaj işlemleri. ....                       | 45 |
| Çizelge 7.3.2 : Klasik demontaj hattı dengeleme problemi atamaları. ....        | 48 |
| Çizelge 7.3.3 : Çamaşır makinesi demontajı sonuçlarının karşılaştırılması. .... | 49 |
| Çizelge 7.4.1 : Bulaşık makinesi demontaj işlemleri. ....                       | 51 |
| Çizelge 7.4.1 (devam) : Bulaşık makinesi demontaj işlemleri. ....               | 52 |
| Çizelge 7.4.2 : Klasik demontaj hattı dengeleme problemi atamaları. ....        | 55 |
| Çizelge 7.4.3 : Bulaşık makinesi demontajı sonuçlarının karşılaştırılması. .... | 55 |
| Çizelge 8.1 : Sezgisel yöntemlerin karşılaştırılması.....                       | 61 |
| Çizelge 8.2 : Sezgisel yöntemlerin karşılaştırılması.....                       | 64 |
| Çizelge 8.3 : Sezgiseller için ortalama işlem süresi (saniye).....              | 65 |
| Çizelge 8.4 : Farklı zaman limitleri için elde edilen sonuç oranları (%).....   | 65 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2 : AEEE sembolü. ....                                                           | 10 |
| Şekil 3.1.1 : “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların sayısı. ....            | 13 |
| Şekil 3.1.2 : “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların ülke sıralaması. ....   | 14 |
| Şekil 3.1.3 : “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların doküman tipi. ....      | 14 |
| Şekil 3.1.4 : “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların kullanım alanı. ....    | 15 |
| Şekil 3.2.1 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayın sayısı. ....                     | 19 |
| Şekil 3.2.2 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayınların ülke sıralaması. ....       | 19 |
| Şekil 3.2.3 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayınların doküman tipi. ....          | 20 |
| Şekil 3.2.4 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayınların kullanım alanı. ....        | 20 |
| Şekil 4.2 : Ve, veya koşulu ile birbirine bağlı işler. ....                            | 28 |
| Şekil 6.1 : MMDLBH-I akış diyagramı. ....                                              | 39 |
| Şekil 6.2 : MMDLBH-II akış diyagramı. ....                                             | 41 |
| Şekil 7.3.1 : Çamaşır makinesi demontaj hattı teknolojik öncelik diyagramı. ....       | 46 |
| Şekil 7.3.2 : Önerilen yaklaşım sonuçlarına ilişkin gantt şeması. ....                 | 47 |
| Şekil 7.4.1 : Bulaşık makinesi demontaj hattı teknolojik öncelik diyagramı. ....       | 53 |
| Şekil 7.4.2 : Önerilen yaklaşım sonuçlarına ilişkin gantt şeması. ....                 | 54 |
| Şekil 8.1 : Önerilen montaj-demontaj sistemi dönüştürme algoritması. ....              | 60 |
| Şekil 8.2 : Montaj hattı dengeleme problemi teknolojik öncelik diyagramı. ....         | 60 |
| Şekil 8.3 : Demontaj hattı dengeleme problemi öncelik teknolojik diyagramı. ....       | 60 |
| Şekil 8.4 : Çalışan sayısı için sezgisel yöntemlerin performans karşılaştırması. ....  | 62 |
| Şekil 8.5 : İstasyon sayısı için sezgisel yöntemlerin performans karşılaştırması. .... | 63 |
| Şekil 8.6 : Farklı problem büyüklükleri için SUF (%) değerleri. ....                   | 64 |
| Şekil 8.7 : Çevrim süresine göre çalışan sayısı ve LBW(a) ve LBS(b) duyarlılığı. ....  | 66 |
| Şekil 8.8 : KMAX’a göre çalışan sayısı ve LBW(a) ve LBS(b) duyarlılığı. ....           | 67 |
| Şekil A.1 : Takım çalışması esaslı matematiksel model. ....                            | 82 |
| Şekil A.1 (devam) : Takım çalışması esaslı matematiksel model. ....                    | 83 |
| Şekil A.2 : Klasik hatlı matematiksel model. ....                                      | 83 |
| Şekil B.1 : Takım çalışması esaslı matematiksel model. ....                            | 84 |
| Şekil B.1 (devam) : Takım çalışması esaslı matematiksel model. ....                    | 85 |
| Şekil B.2 : Klasik hatlı matematiksel model. ....                                      | 85 |
| Şekil C.1 : Veri girişi. ....                                                          | 86 |
| Şekil C.2 : Algoritma seçim kriteri. ....                                              | 87 |
| Şekil C.3 : Algoritma uygulama. ....                                                   | 88 |
| Şekil D.1 : Küçük ölçekli problem çözümleri. ....                                      | 89 |
| Şekil D.2 : Orta ölçekli problem çözümleri. ....                                       | 90 |
| Şekil D.3 : Büyük ölçekli problem çözümleri. ....                                      | 91 |
| Şekil E.1 : Küçük ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları. ....                      | 92 |
| Şekil E.2 : Orta ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları. ....                       | 93 |
| Şekil E.3 : Büyük ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları. ....                      | 94 |



## **TAKIM ÇALIŞMASI ESASLI DEMONTAJ HATTI İÇİN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI: BEYAZ EŞYA ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA**

### **ÖZET**

Çevre üzerinde hızlı kentleşmenin yanı sıra sanayileşme baskısı nedeniyle ürün geri kazanımı giderek daha kritik hale gelmiştir. Dünya nüfusunun artması, tüketim alışkanlıklarının değişmesi ve teknolojinin hızla gelişiyor olması ile paralel olarak atık miktarında da hızlı bir artış görülmektedir. Dünyada genel olarak sürdürülebilir bir çevre ve ekonomik fayda sağlamak amacıyla atık yönetimi ile ilgili çeşitli yasalar ve yönetmelikler yürürlüğe alınmıştır. Yasa ve yönetmelikler ile atıklar kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Ancak son yıllarda hızla değişen yaşam alışkanlıkları ve teknoloji ile özellikle elektrikli ve elektronik atıklar dünya üzerinde oldukça fazla artış gösteren atık grubunu oluşturmaktadır. Bu artış hızı ile elektrikli ve elektronik atıklar, evsel atık miktarındaki yıllık artış hızını bile geçmeye başlamıştır.

Elektrikli ve elektronik ürünün atık olması, o ürünün tekrardan kullanılamaz, tamir edilemez, çalışamaz ve kusurlu olması anlamına gelmektedir. Yalnız bu elektrikli ve elektronik atıklar, bileşenleri ve çevreye olan etkileri bakımından oldukça fazla öneme sahiptir. Elektrikli ve elektronik atıklar içerdikleri metaller bakımından oldukça zengindir ki; altın, gümüş, bakır, çinko, demir ve alüminyum gibi metal bileşenler ve plastik içeriyor olması sebebiyle ekonomik bir değere sahiptir. Elektrikli ve elektronik atıklar artış hızı ve bileşenleri bakımından ayrıca çevresel ve ekonomik bir tehdit de oluşturmaktadır. Genel olarak yaşam ömrünü tamamlamış ya da kullanılmış ürünlerin geri kazanımı hem çevresel hem de ekonomik avantajlara sahiptir. Bu nedenle tekrardan kullanılamayacak durumda olan bu ürünlerin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik sağlanması bakımından ürünlerin geri kazandırılması fikri oluşmuştur ve bu kapsamda elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü ile ilgili bir düzenlemenin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Tüm bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak ve ekonomik anlamda katkı sağlamak amacıyla Avrupa Birliği özellikle elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüştürülmesi konusunda bir yönetmelik yayınlamış ardından yürürlüğe koymuştur. Söz konusu yönetmelik kapsamında atık elektrikli ve elektronik eşyaların (AEEE) kontrolüne ilişkin çevresel zararları ortadan kaldırmak amacıyla kurallar yer almış ve bu kapsamda üretici ve tüketicilere sorumluluklar yüklenmiştir. Atıkların yönetimi Türkiye’de temel olarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığının direkt ya da dolaylı olarak yaptığı çalışmalar ile yürütülmektedir. Atıkların geri kazanımı ve çevreye olan etkilerin minimuma indirilmesi konusunda Avrupa Birliği ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından belirlenen yönetmeliklere göre üreticiler ve tüketiciler de sorumluluklar taşımaktadır. Ülkemizde elektrikli ve elektronik ürünlerin geri kazanımı konusunda devlet tarafından yönlendirilen politikalar, yapılan yeni yasal düzenlemeler ile üreticileri ürettikleri, tüketicileri de kullandıkları ürünlerin oluşturduğu olumsuz etkiler konusunda sorumlu tutmuştur. Bu kapsamda yapılmak istenen atık olarak nitelendirilen ürünlerin geri dönüşüm oranlarının artırılması

hedeflenerek daha sürdürülebilir, temiz bir yaşam oluşturmaya çalışmaktır. Türkiye’de de mevzuat gereği elektrikli ve elektronik ürün üretimi gerçekleştiren şirketler üretmiş oldukları ürünlerden sorumlu tutularak; yaşam ömrünü tamamlamış ürünlerin yeniden ekonomiye kazandırılması ve böylelikle çevresel etkilerin azaltılması istenmektedir.

Bu kapsamda, Türkiye’nin dayanıklı ev aletleri üretimi yapan en büyük şirketlerinden biri olan uygulama yaptığımız firma, Türkiye’de ilk ve tek şirket olma özelliğini elinde tutarak markasına bakılmaksızın yaşam ömrünü tamamlamış ya da ikinci el elektrikli ürünleri toplayarak bünyesinde yer alan geri dönüşüm tesisi çatısı altında bu ürünlerin geri kazandırılmasını sağlamaktadır. Şirket, yalnızca kendi ürettiği markalı ürünleri değil tüm elektrikli atık ürünleri toplayarak geri dönüştürmesi, çevreye yapılan olumlu etkiye büyük bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Şirket ayrıca bu ürünlerin toplanması konusunda çeşitli kampanyalar yürütülmekte; bu çalışmalar ve kampanyalar ile hem tekrardan kullanılamayacak olan ürünlere kolayca ulaşılması sağlanmakta hem de tüketicilerin teknolojik seviyesi yüksek, çevre dostu, çevreye daha az zarar verecek ürünleri kullanmasına teşvik etmektedir. Tüketicilerden de kullandıkları ürünlerin oluşturabilecek olumsuz etkilerinin farkına vararak kendilerine düşen sorumluluk kapsamında hareket etmesi ve bilinçli davranması beklenmektedir.

Atık ürünlerin geri kazanılması konusunda çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı demontaj sistemleridir. Ürünün kurtarılmasında hayati bir öneme sahip olan parçaların demontajı, bir ürünün kendi bileşenlerine sistematik bir şekilde ayrılması olarak tanımlanabilir. Bir ürünü oluşturan parçalar hem ekonomik hem de çevresel bakımdan önemli etkilere sahip olabilmektedir. Demontaj sistemleri her ne kadar montaj işleminin tersi gibi düşünülse de daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Montaj işlemi sırasında parçalar belli sıra ile ürüne entegre edilirken demontaj sürecinde bu adımlar kesin olarak belirlenmemiştir. Başka bir ifade ile genel olarak bir ürünün demontajı sırasında gerçekleştirilecek adımlar aynı anda yapılabilmekte ya da gruplanabilmektedir. Bu durum, çalışma sistematikliğini daha karmaşık bir hale getirmektedir. Demontaj işlemi, zorlu bir süreç olması yanında çevresel sürdürülebilirlik konusundaki yasalar, politikalar, artan bilinç ve üretim sistemindeki ilerlemeler sayesinde büyük bir öneme sahip olmuştur. Bu durumda, demontaj hatlarının etkili tasarımı, kaynak kullanımı açısından demontaj performansını etkilemektedir. Demontaj faaliyetlerinin iyi yapılandırılmış demontaj hatları ile kaynak etkin yürütülmesi, ürünün geri kazanımı verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Demontaj geri dönüşüm sistemi ile nihai ürün kendini oluşturan parçalarına ayrılarak ekonomik değere sahip olan parçalar ekonomiye kazandırılır; çevreye zararlı olan ürünler ise imha edilebilir.

Geleneksel demontaj hatlarında her bir işlem için bir çalışan kendisine atanan görevi yerine getirmektedir. Ancak kaynağın ve kapasitenin sınırlı olduğu gerçek üretim sistemlerinde ürün, süreç ve çalışan verimliliğini artırmak amacıyla geleneksel sistemlerden uzaklaşmıştır. Geleneksel demontaj hattı, ürünün parçalara ayrılması ve taleplerdeki değişikliklere düşük düzeyde esneklik ve adaptasyona sahiptir. Dolayısıyla, talepteki değişiklikler işçi hareketliliğine duyulan ihtiyacı artırdığında, çalışanları istasyonlar arasında transfer etmek zorlaşır. Geleneksel hatlardaki çalışanlar, düşük seviye becerileri ve sınırlı eğitim konusunda uzmanlaşmıştır. Bununla birlikte, çalışanlar arasında uyumluluğun bulunmaması nedeniyle, kusurların hızlı bir şekilde fark edilmesi ve diğer çalışanlardan öğrenme, geleneksel hatlarda zordur. Senkronize olarak çalışma potansiyeli, geleneksel hatlardaki sökme

sağlama süresini ve hat uzunluğunu azaltmak için elde edilemez. Bu kapsamda, bir grup işçinin aynı ürün üzerinde aynı anda farklı operasyonlar gerçekleştirdiği çok yönlü iş istasyonları, artan hat performansı potansiyeline sahiptir.

Gerçek üretim sistemlerinde klasik demontaj hattı çalışma sistemiği yerini takım esaslı çalışma sistemiğine bırakmıştır. Geleneksel çalışma mantığında her bir istasyona bir işçinin atanıyor olmasına karşın takım esaslı çalışmada bir istasyona birden fazla işçi atanabiliyor; ayrıca işler belirli kısıtlar ve kriterler altında gruplandırılarak paralel olarak daha verimli ve hızlı bir şekilde tamamlanabilmektedir. Özetle; bu çalışma yöntemi, klasik yapıya göre kalite, verimlilik, alan kullanımı, çalışan kabiliyetleri ve teslim süresi bakımından avantajlara sahiptir. Pratikte her ne kadar üretim tesislerinde demontaj hatlarına takım esaslı çalışma entegre edilmiş olsa da henüz literatürde bu kapsamda bir çalışma yer almamıştır.

Tez çalışması, demontaj hatlarına ilk defa takım çalışmasını entegre ederek literatüre katkıda bulunmuştur. Bu araştırma boşluğuna hitap eden çalışma, işçilerin ve açılan iş istasyonlarının sayısını en aza indirmek amacıyla takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemini çözmek için bir karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) odaklı optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır. Uygulama kısmında gerçek bir çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi demontaj sistemine KTDP model uygulanmıştır. Uygulama, çamaşır ve bulaşık makinesi demontaj hattı sistemlerinde, klasik bir demontaj sistemi tasarımına kıyasla daha kısa demontaj teslim süresi (sırasıyla %47,9 ve %80,9) ve daha düşük alan gereksinimi (sırasıyla %61 ve %60,2) ile sonuçlanmıştır. Çalışma kapsamında KTDP'nin yanı sıra iki sezgisel algoritma da geliştirilmiştir. Geliştirilen her iki sezgisel yöntem de “konum ağırlığı” ve “takip eden iş ögesi sayısı” seçim kriterine göre geliştirilmiştir. Ayrıca önerilen sezgisel yöntemlerin etkili hesaplama performansı ile yeni oluşturulan büyük boyutlu test problemleri üzerinde kabul edilebilir çözümler sağladığı doğrulanmıştır. Karşılaştırma sonuçları, algoritma ve çizelgeleme metodu için sırasıyla takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme sezgisel yöntemi-1 (MMDLBH-I) ve “maksimum konum ağırlığı” seçim kriterinin üstünlüğünü göstermiştir.



# **AN OPTIMIZATION APPROACH FOR BALANCING MULTI-MANNED DISASSEMBLY LINES: AN APPLICATION FROM WHITE GOODS INDUSTRY**

## **SUMMARY**

Product recovery has become increasingly critical due to the pressure of rapid urbanization as well as industrialization on environment. In parallel with the increase in the world population, the change in consumption patterns and the rapid development of technology, there is a rapid increase in the amount of waste. Developing and emerging economies are expected to legitimately aim at achieving the welfare of industrialized countries. With today's consumption trends, this will result in an important increase of the focus on resources, while the growth of the waste amount produced and the related environmental burdens. According to economic and environmental conditions, for the manufacturing systems, minimizing the environmental impact of waste materials is one of the significant issues. Therefore, the recent trend in the product recovery process has been increased. Various laws and regulations concerning waste management are currently in place in order to ensure a sustainable environmental and economic benefit in the world in general. Waste is trying to take under control with laws and regulations. However, in recent years, rapidly changing life habits and technology, especially electrical and electronic wastes constitute a significant increase in the world. This rate of increase even exceeds the rate of annual increase the domestic waste amount.

Waste of electrical and electronic equipments (WEEE) means that the product is not repairable, inoperable and defective. However, these electrical and electronic wastes have considerable precaution in terms of their components and their impact on the environment. Electrical and electronic wastes are complex and very rich in the metals they contain, such as gold, silver, copper, zinc, iron and aluminum, metal components, plastics and so on and it has an economic value since it contains them. Electrical and electronic waste if not properly managed is an environmental and health threat in terms of the rate of increase. In general, recycling of end-of-life (EOL) or used products has both environmental and economic contribution and to enhance resource efficiency the improvement of collection, treatment and recycling of the waste products is essential. For this reason, the idea of reclaiming products in terms of environmental and economic sustainability of these products, which cannot be used again, has emerged and the necessity of a regulation regarding the recycling of such wastes in relation to electrical and electronic wastes has emerged.

In order to remove all these negative effects and contribute to the economy the European Union has issued and enforced a regulation on the recycling of electrical and electronic products named the Directive on electrical and electronic waste equipment (WEEE Directive). The WEEE Directive requires the collection and recycling the electrical and electronic waste. In this context, the producers are expected to design their products by evaluating the recycling, recycling and

degradability possibilities based on the fact that the producers are also responsible for the end of the life of their products. The WEEE Directive aims to protect the environment and human health by adopting the waste management strategies related to recycling and reuse, using the natural resources wisely by the WEEE Directive. This regulation includes rules to eliminate environmental damages related to the control of waste electrical and electronic goods, and responsibilities to producers and consumers to reduce the effect. Waste management of the Ministry of Environment and Urban Planning in Turkey are carried out mainly by direct or indirect this work. Manufacturers and consumers are also responsible for the recovery of wastes and for minimizing the impact on the environment, according to regulations laid down by the European Union and the Ministry of Environment and Urbanization. Government-led policies on the recovery of electrical and electronic products in our country bear responsibility for the damage caused by the novel legal regulations and products manufactured by the producers and used by the consumers. Therefore, it is aimed at increasing recycling rates and trying to create a more sustainable and clean life. Companies in Turkey are required performing to bring in money to economy and thus reduce the environmental impact as recovering of the electrical and electronic EOL products.

In this context, the company carried out the application, one of Turkey's largest companies engaged in the production of durable home appliances, is the first and only company that with regardless of the brand collects the EOL or second-hand electrical products and recycles the products in the recycling plant. The fact that the company not only produces and recycles its own branded products but also recycles all branded electrical waste products and shows that it has a big share and contribution in the environment. Various campaigns are carried out to collect these products; thanks to these works and campaigns, it is ensured that both the products which cannot be used again are easily reached and the consumers are encouraged to use the products with high technological level, nature friendly and less harm to the environment. It is expected that consumers will be aware of the negative effects of the products they use and they will be responsible for their responsibility.

Various methods are applied to recover waste products. The most common of these methods is disassembly systems. Having a vital importance on product recovery, disassembly might be described as the separation of a product into its components in a systematic manner. The components of a product might have significant economic and environmental impacts. Although disassembly systems are considered to be the opposite of the assembly process, they have a more complex and challenging structure. While the parts are integrated into the product in a certain order during the assembly process, these steps have not been determined precisely and might not be checked as in an assembly environment in the disassembly process. In other words, the steps to be taken during the disassembly of a product in general can be performed or grouped at the same time. This makes the working systematic more complex. In addition to being a challenging process, the disassembly process has been of great importance due to the laws, policies, progressive consciousness and progress in the production system. In this case, the effective design of the disassembly lines affects the performance of disassembly in terms of resource utilization. The effective execution of disassembly activities with well-structured disassembly lines has a direct impact on product recovery efficiency. With disassembly system, the final product is divided into its constituent parts and the parts having economic value are added to economy; also the products which are harmful to the environment are

transferred to the destruction facilities for disposal. Disassembly has attracted significant importance which stems from the increasing consciousness about environmental sustainability and the advances in manufacturing systems. That being the case, effective design of disassembly lines stimulates disassembly performance in terms of resource utilization. Resource-effective execution of disassembly activities via well-structured disassembly lines has a direct effect on the product recovery efficiency.

In traditional disassembly lines, for each workstation, only one worker may be assigned. However, in production systems where resource and capacity is limited, classical systems have been moved away in order to increase product, process and employee productivity. The conventional disassembly line has low level of flexibility and adaptation to changes in product design and demand. So the changes in demand and worker mobility increase and transferring them between stations becomes difficult. Workers in a traditional line have specialized low level skills and limited training. In addition, quick realization of defects and learning from other worker may not be obtained in conventional lines owing to the fact cohesiveness among workers does not exist. The potential of working synchronously cannot be achieved for decreasing disassembly lead time and line length in conventional lines. In this multi-manned workstations context, a group of workers who perform on the same station different tasks simultaneously on the same product and the capability of assigning more than one worker to each workstation, have the potential for increased line performance. In the production systems, the classical disassembly works has been replaced by the multi-manned working system. As for disassembly system design aspect, lines with multi-manned workstations are not only a novel branch of disassembly line balancing problem (DLBP), but also suitable for industries with large-sized products. DLBP allocates the disassembly tasks in sequence manner and makes the optimization of performance criterias such as cycle time, number of workers, number of workstations, work load and so on. In the traditional work logic, although a worker is assigned to each task, in a multi-manned system a worker can be assigned to more than one task and can carry out the assigned tasks according to task precedence, and the work is completed more efficiently and quickly by grouping under certain constraints and criteria. In summary; this method of operation has advantages in terms of quality, efficiency, space utilization, worker skill and lead time compared to classical structure. In the literature, disassembly line balancing is widely studied and the number of studies has increasing year by year. Furthermore, studies in the literature regarding multi-manned stations has increasing trend. However, there is no any study about multi-manned disassembly lines. Multi-manned workstation integrated design has not yet been proposed for disassembly line balancing problem.

This study contributes to the relevant literature by integrating multi-manned stations to disassembly lines for the first time. This study is the first attempt to address a mixed integer linear programming (MILP) oriented optimization approach to solve multi-manned DLBP with the aim of minimizing the number of workers and workstations. An AND/OR graph is structured in the model and used to indicate precedence sequence among tasks. A MILP model and two framework heuristic algorithms are developed with the aim of minimizing the number of workers and workstations. MILP model is solved by using mathematical programming software named GAMS and was applied to a real life washing machine and dishwasher disassembly line. For washing machine and dishwasher multi-manned disassembly line system, the application resulted in shorter disassembly lead time (respectively

47.9% and 80.9%) and lower space requirement (respectively 61.0% and 60.2%) when compared to a classical disassembly system design. Moreover, the computational efficient performance of the proposed heuristics has been verified on newly generated large-sized test problems. The comparison results indicated the superiority of MMDLBH-I and “maximum positional weight” for framework algorithm and task selection rule, respectively.



## 1. GİRİŞ

Atık miktarını azaltmak için ürün geri kazanım sürecine olan ilgi son zamanlarda artmıştır (Ren ve diğ., 2018). Ürünlerin geri kazanılması çevreye ve sağlığa olan zararların azaltılması ve ekonomiye yeniden kazandırılması konusunda çok çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı ve çalışmada ele alınan demontaj yöntemidir. Ürün geri kazanımının ilk ve en çok zaman alan adımı olan demontaj, kullanım ömrü bitmiş ürünlerin bileşenlerinin bir dizi işlemle sistematik olarak ayrılmasıdır. Demontaj işlemi ürünlerin geri kazanımı ile ilgili etkili ve etkin bir yöntemdir. Literatürde yer alan ilk çalışmalardan Gupta ve Taleb (1994) demontajı, bir ürünü oluşturan parçalarına, alt montajlarına ve diğer gruptandırmalarına ayırmak için sistematik bir yöntem olarak ve Gupta ve McLean (1996) ise ana üründen istenen bileşenlerin sistematik olarak uzaklaştırılması olarak tanımlamıştır. Genel bir geri kazanım süreci, kullanılmayan ya da modası geçmiş ürünlerin seçilmiş demontaj faaliyetleri ile parçalanmasını içermektedir (McGovern ve Gupta, 2003). Yeniden üretmenin en kritik ve zaman alıcı aşaması, bir dizi işlemle değerli parçaların/alt montajların ve atılan ürün malzemelerinin sistematik olarak ayrılması olarak gösterilebilen demontaj işlemidir (McGovern ve Gupta, 2007a). Demontaj işlemi ile yaşam ömrünü tamamlamış ya da kullanılmış ürünlerin tam ya da kısmi olarak parçalarına ayrıştırılıp parçaların diğer endüstrilerde veya yeni ürün üretiminde kullanılması ve çevre üzerinde zararlı etkilerin azaltılması sağlanmaktadır. Yüksek verim oranları ve otomasyonun demontaj işlemlerine entegrasyonu nedeniyle akış hattı, ürün demontajı için en uygun sistem olarak kabul edilebilir. Demontaj işlemlerine göre, demontaj işlemi için bir hücre, bir hat veya tek bir iş istasyonu uygun olabilmektedir. Geri gönderilen ürünlerin otomatik olarak sökülmesi için Güngör ve Gupta (2002), demontaj hatlarını en iyi seçenek olarak kabul etmiş ve demontaj hattının yüksek hacimli ürünlerde etkili tasarımının önemini ortaya koymuştur. Demontaj işlemi hem ekonomik hem de çevresel anlamda olumlu etkiler oluşturmaktadır. Demontaj işlemi ile çevreye zararlı olabilecek malzemelerin yaşam ömrünü tamamlamış ürünlerden ayrıştırılması sağlanarak çevresel etkiler

azaltılabilmektedir. Ayrıca kullanılamayacak durumda olan ürünlerin/parçaların yeniden geri kazanılması söz konusu olduğundan maliyet avantajı sağlanabilmektedir.

Bu araştırma alanında önemli bir konu olan demontaj hattı dengeleme kavramı, son zamanlarda teorik çalışmalarda ve kaynak kullanımının optimize edilmesine yönelik pratik uygulamalarda büyük ilgi görmektedir. Demontaj hattı dengeleme problemi (DHDP), çeşitli kısıtlamaları (öncelik ilişkisi, çevrim süresi vb.) karşılarken, sıralı bir iş istasyonu dizisine sökme görevlerin atanması olarak ifade edilebilir (Ding ve diğ., 2010). Demontaj operasyonlarının kendine has özelliklerinin olması ve montaj operasyonlarının tersi olarak kabul edilemediği için, fiziksel ve operasyonel farklılıklar DHDP için çeşitli çözüm yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Altekin 2017). Demontaj hattı tasarımı için kritik bir adım olarak, DHDP, önceden belirlenen amaç(lar) ile ilgili olarak iş istasyonlarına görev atamakla ilgilidir. Montaj işleminden farklı olarak, ürün, bir sökme işleminde kalite, miktar ve güvenilirliğin bozulmadan muhafaza edilmesi gereken çok sayıda alt bileşene ayrılır. Ayrıca, bazı teknik ve ekonomik kısıtlamalardan dolayı demontaj, montajın tersi olarak kabul edilemez (Özceylan ve diğ., 2018). Demontajın tüm bu özellikleri, montaj hatlarına kıyasla demontaj hatlarını yönetmeyi daha da zorlaştırmaktadır. Demontaj hatlarındaki karşılaşılan en önemli belirsizlik gelen ürün ve alt parçaların kalite bakımından yüksek derecede farklılık göstermesidir. Ayrıca parçalara ve alt montaj ekipmanlarına duyulan ihtiyaç ile gerçekte demontaj sürecinde elde edilen miktarın arasındaki farklılık ciddi bir sorun oluşturabilmektedir (McGovern ve Gupta, 2007b). Demontaj hattı, birbiri ardına sıralanmış farklı işlemlerin yapıldığı istasyonlardan oluşur. Genellikle demontaj hattı tasarımı ile ilgili amaç işlerin istasyon ve çalışan bazında dengeli olmasını ve var olan kaynaklardan ise maksimum seviyede faydalanılmasını sağlamaktır. Demontaj hattının kurulmasındaki temel amaçlar aşağıdaki gibidir:

- Düzenli bir malzeme akışını sağlamak
- Açılan iş istasyonu sayısını ve çalışan sayısını minimize etmek
- İşçilerin ve ekipman kapasitelerinden maksimum düzeyde faydalanmak
- İşlemlerin en kısa sürede yapılmasını sağlamak
- İşlemler gerçekleştirilirken en az kapasiteden faydalanmak
- İşlemin olmadığı zamanları ve dengeleme kayıplarını minimize etmek
- Dengeleme konusunda oluşan kayıpları düzenli bir şekilde atamak

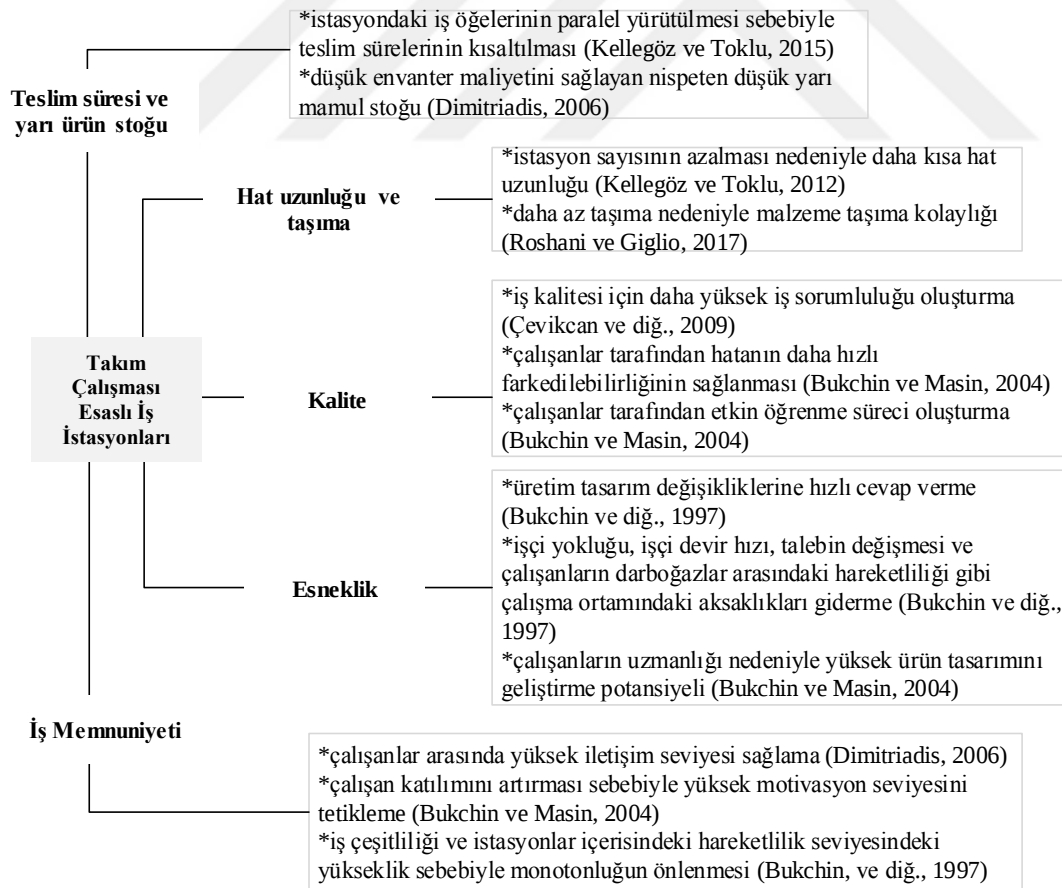
Demontaj hattı dengeleme problemi ise, ürünü tam ya da kısmi olarak demonte etmeyi sağlayacak şekilde bir ürünün demontaj işlerinin birbiri ardına sıralanmış iş istasyonlarında gerçekleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Demontaj hattı dengeleme çalışmasında yukarıda bahsedilen ve birbiriyle çelişen bu amaçların hepsini yerine getirmek olası değildir. Hat dengeleme çalışması yapılırken maliyetlerin de minimizasyonu sağlanmalıdır. Bu kapsamda işgücü maliyeti en önemli maliyet kalemini oluşturmaktadır.

Demontaj hattı dengelemeyi etkileyen temel kısıtlar çevrim süresi ve öncelik ilişkileridir. Bir istasyona atanan iş öğelerinin sürelerinin toplamı çevrim süresini aşamaz ve istasyonlara atanan iş öğeleri arasında bir öncelik ilişkisi olması durumunda öncül işi yapılmayan iş öğesi ataması yapılamaz. Bazı durumlarda işlerin aynı ya da birbirini izleyen istasyonlara atanması istenebilir. Tam tersi bazı işlerin de aynı istasyonlara atanmaması gerekebilir. Örneğin; iş yükü açısından yüksek olan işlerin aynı istasyonlarda yapılması istenmez.

Klasik montaj ve demontaj hatlarında her istasyonda bir işgören çalışmaktadır. Ancak günümüzde gerçek üretim sistemlerinde işgören, alan, zaman konusunda kapasite kısıtı nedeniyle klasik çalışma mantığından uzaklaşarak takım esaslı çalışma benimsenmeye başlamıştır. Takım çalışması esaslı iş istasyonlarında, büyük ölçekli ve yüksek hacimli ürünler için klasik hatların dezavantajlarının üstesinden gelmek için iş istasyonlarında birden fazla işçinin çalıştırılmasına ve aynı iş parçasının farklı görevlerinin eşzamanlı olarak gerçekleştirilmesine izin verilmektedir. Bir işçiye sahip geleneksel istasyonlara göre aynı istasyonda birden fazla işçinin çalışabildiği takım çalışması esaslı istasyonların ana avantajları, teslim süresi ve yarı ürün stoğu (Kellegöz ve Toklu, 2015), kalite (Bukchin ve Masin, 2004), hat uzunluğu ve taşıma (Roshani ve Giglio, 2015a), esneklik (Bukchin ve diğ., 1997) ve iş memnuniyeti (Dimitriadis, 2006) gibi konulardır. Tek kişilik çalışma istasyonlarına sahip geleneksel hatlardan farklı olarak, her bir takım çalışması esaslı iş istasyonu birden fazla operatörle donatılabilir ve her operatör aynı zamanda görev önceliğine göre demontaj işlemlerini gerçekleştirebilir (Chen, 2017). Geleneksel demontaj hattının, ürün tasarımı ve taleplerindeki değişikliklere karşı düşük esneklik ve adaptasyon seviyesi vardır. Bu nedenle, talepteki değişimler işçi hareketliliğine duyulan ihtiyacı artırdığı zaman, işçileri istasyonlar arasında transfer etmek zorlaşır. Geleneksel bir hatta çalışanlar, düşük seviyeli becerilere ve sınırlı eğitime sahiptir. Buna ek olarak, çalışanlar arasında bir arada bulunma gereği nedeniyle, kusurların ve

diğerlerinden öğrenmenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi, geleneksel hatlarda elde edilemeyebilir. Son olarak, geleneksel hatlarda demontaj sağlama süresinin ve hat uzunluğunun azaltılması için eşzamanlı çalışma olasılığı elde edilemez (Bukchin ve diğ., 1997). Bu nedenle, mekânsal kullanım, teslim süresi ve çalışan becerileri açısından çok yönlü hatların geleneksel hatlara göre bazı avantajları vardır (Çevikcan ve diğ., 2009). Demontaj hatlarında takım bazlı çalışma ise hücresel yapıların oluşturulması ile elde edilen faydanın ortaya çıkarılmasını sağlar. Takım çalışması esaslı yapı, klasik çalışma yapısına göre sisteme esneklik, kalite ve verimlilik yönünden avantajlar sağlar (Çevikcan, 2006).

Takım çalışması esaslı istasyonlara sahip hatların en belirgin özelliği, aynı iş parçasının farklı görevlerinin her istasyonda aynı anda gerçekleştirilmesine izin verilmesidir. Bununla birlikte, aynı iş parçasına ilişkin görevlerin paralel yürütülmesi, tek çalışan istasyonlara sahip hatlarda gözlenemez. Takım çalışması esaslı istasyonların klasik istasyonlara göre en önemli avantajları Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1 : Takım çalışması esaslı istasyonların avantajları.**

İşçiler farklı görevlere atanabildiğinden kabiliyetleri ve iş tatminleri artmaktadır. Bu çalışma ile daha az alan ihtiyacı oluşmaktadır. İşçilerin aynı bölgede birbirlerine yakın olarak çalışması nedeniyle hataların kısa sürede ve hızlı bir şekilde farkına varılması bakımından az hatalı ve kaliteli ürünler elde edilebilmektedir. Öncelik kısıtı bulunmayan işler aynı anda yapılabileceğinden süre bakımından da avantaj sağlanır.

Bukchin ve Masin (2004) tarafından takım esaslı çalışma ile ilgili yapılan açıklamalar aşağıdaki gibidir:

*Çalışan uzmanlığı:* Takım esaslı çalışma sistemi, her biri sorumluluk alabilen ve takıma atanan her görevi yapabilen çapraz eğitilmiş ve uzman işçiler tarafından sağlanmalıdır.

*Kısa akış:* Takım esaslı çalışma sistemlerinde toplanan ürünler, geleneksel montaj hatlarına göre daha kısa akış süresine sahiptir; çünkü daha öncesinde çalışma öncelik kısıtlamaları ile çelişmediğinde paralel olarak gerçekleştirilebilirdi. Öte yandan, geleneksel çizgilerde, iş her zaman sırayla gerçekleştirilir.

*Sürekli akış:* Tüm takımların verimi yaklaşık olarak eşitse ve sistem dengelendiyse, bir transfer kümesine eşit sürekli akış sağlanmış olur.

*Yüksek motivasyon:* Takım yapılandırması kullanmanın en büyük avantajlarından biri iyileştirme ve çalışma ortamlarında ve üretim süreçlerinde çalışan katılımında artıştır. Bu tür değişikliklerin, doğru üretim sistemlerinde önemli bir faktör olan çalışanların motivasyonunu artırabileceğini bekleyebiliriz.

*Esneklik:* Bir takım esaslı çalışma sisteminin modüler yapısı, ürün tasarımı, teknoloji ve taleplerindeki değişimlere daha hızlı cevap verebilmesini sağlar, çünkü her bir değişiklik, montaj sisteminin nispeten küçük otonom kısımlarını etkilemektedir. Montaj sistemindeki teknolojik değişiklikler sadece spesifik teknolojiyi kullanan ekipleri etkiler. Ürün tasarımıdaki değişiklikler sadece belirli alt montajdan sorumlu ekibi etkiler. Çok fonksiyonlu çalışanlar, montaj ortamındaki çalışan yokluğu, çalışan devir hızı, talep değişimleri ve darboğaz istasyonları arasında çalışanların hareketliliği gibi rahatsızlıkları ortadan kaldırabilir.

*Kalite:* Ürün kalitesi, kusurların hızlı bir şekilde tanımlanmasına, sorunların hızlı bir şekilde tespit edilmesine ve hatalardan öğrenmenin etkili bir sürecine bağlıdır. Geleneksel montaj hatlarında, hat boyunca yayılan birçok işçi, kaliteden sorumlu belirli bir kişi olmaksızın tek bir alt montajın birleştirilmesinde rol oynayabilir. Takım esaslı çalışma sistemlerinde, iş öğelerinin ürün yapısına göre tahsis edilmesi,

alışmasının kalitesine daha gl bir işçi taahhüdü yaratmaktadır. Her takım bir veya daha fazla büyük alt montajın üretiminden sorumludur ve ekip yeleri ürünlerinin kalitesinden sorumludur. Her bir çalışanın ekip tarafından toplanan büyük bir alt montaj sorumluluğu, ekip üyelerinin kusurlarının hızlı bir şekilde tanımlanmasını ve problemden sorumlu çalışanın verimli bir öğrenme sürecini mümkün kılar. Bu süreç aynı zamanda işçinin motivasyonuna da bağlıdır. Bu sistem, geleneksel montaj hatlarından çok daha tatmin edici bir çalışma koşuluna katkıda bulunacak ve bu da yüksek işçi motivasyonuna yol açacaktır.

*Verim ve stok:* Geleneksel montaj hatlarının dengeleme yöntemlerinin ortak bir amacı maksimum verimdir (kısa çevrim süresi). Geleneksel hatlarda olduğu gibi, bir takıma atanan çalışma içeriği çevrim süresini azaltmak ve maksimum üretim hızına ulaşmak için üyeler arasında dengelenmelidir. Geleneksel montaj hatları montaj görevleri sırayla düzenlendiğinden, uzun bir akış süresi ile karakterize edilir. Uzun akış süresi nispeten yüksek stoğa neden olur, yüksek stok maliyetleri ile sonuçlanır. Takım alışması esaslı montaj sistemindeki ekipler, teknolojik kısıtlamalar olmadığı sürece paralel çalışabilmektedir. Sonuç olarak, akış süresi ve stok azaltılır.

Tez çalışmasının amacı, takım çalışması esaslı demontaj hatlarının dengeleme problemi için karma modelli yeni bir metodoloji geliştirmektir. Metodolojinin amacı, eşit kabiliyetteki iřęrenlerden takımlar oluşturarak çalışan sayısını ve açılan istasyon sayısını azaltmaktır. Montaj hatlarında olduğu gibi, takım çalışması esaslı demontaj hatları, klasik demontaj hatlarına kıyasla verimlilik, esneklik, kalite, tedarik süresi, iş memnuniyeti konularında üstünlüğe sahiptir. Çalışmada dengeleme iki adımda gerçekleştirilmektedir. Birinci adımda iřęren sayısının en küçüklenmesi amaçlanırken ikinci adımda ise minimum iřęren sayısını temel alarak açılan istasyon sayısının en azlanması istenmektedir. Sonrasında her istasyon için uygun iřęrenlerden takımlar oluşturularak işlerin öncelik kısıtları dikkate alınıp paralel olarak aynı istasyonda yapılması sağlanarak daha düşük istasyon süresine bağlı daha düşük işlem süreleri ve alan kullanımı hedeflenmektedir.

Demontaj hatları her ne kadar montaj hatlarının tersi gibi düşünülüyor olsa da montaj hatlarına göre daha zorlu bir süreç olmaktadır. Demonte edilecek kullanım ömrünü tamamlamış olan ana üründen kendini oluşturan parçalarına hem miktar hem de kalite yönünden bir eksiklik olmadan ayrılması beklenmektedir. Ayrıca demontaj işlemi sırasında montaj işleminden farklı olarak tehlikeli durumlar (parçalar) ile de karşılaşma riski bulunmaktadır. Çünkü parçalarına ayrılan ana ürünün içeriğinin tam

olarak ne olduğu ve parçaların hangi özelliklere sahip olduğu bilinmemektedir. Bu sebepler ile demontaj hatları montaj hatlarına göre daha karmaşık ve zorlu bir sürece sahiptir.

Montaj işlemi her ürüne uygulanabileceği gibi demontaj işleminin büyük boyutlu ürünlere uygulanması daha uygun olmaktadır. Oldukça küçük boyutlardaki ürünler için geri dönüşümü sırasında demontaj işlemi yerine doğrudan imha yöntemine gidilebilir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, bu çalışma, karmaşık tamsayılı doğrusal programlama ve sezgisel algoritmalar yoluyla takım çalışması esaslı DHDP hesaplamayı verimli bir şekilde ele alan ilk girişimdir. Bununla birlikte, yönetimsel açıdan gerçek endüstriyel demontaj sistemlerinde, kaynakların daha verimli kullanılması ve kusurların hızlı bir şekilde fark edilmesi için tek parça akış ortamını gerçekleştirme potansiyeline sahiptir.

Yapılan alışma, “Giriş” ile “Sonuçlar” bölümleri dahil olmak üzere dokuz bölümden oluşmaktadır. Sonraki bölümde, elektrikli ve elektronik atıklar konusuna değinilmiştir. nc bölümde, konu ile ilgili literatürde yer alan demontaj hattı tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmada yapılan literatür araştırması, demontaj hattı dengeleme ve takım esaslı çalışma olarak iki kısımda incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde literatür matrisine de yer verilmiştir. Problem tanımı dördüncü bölümde yapılmıştır. Demontaj hattı dengeleme problemi, geliştirilen matematiksel programlama modeli ve takım çalışması esaslı demontaj hatları için sezgisel yöntemler sırasıyla beşinci ve altıncı bölümlerde açıklanmıştır. Tez alışması kapsamında yedinci bölümde yer alan uygulama kısmı yer almıştır. Sekizinci bölümde matematiksel model ve sezgisel yöntemlerden elde edilen sonuçların hesaplama analizine yer verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar, literatüre katkılar ile çalışmanın eksik yönlerinin değerlendirildiği “Sonuçlar” kısmı yer almıştır.



## 2. ATIKLAR

Son yıllarda yasal mevzuatlar gereği çevresel etkiler üreticilerin ve de tüketicilerin sorumluluklarının artmasına neden olmuş ve ürünlerin geri dönüşümü, geri kazandırılması konusu gündeme gelmiştir (Aydemir-Karadağ, A. ve Türkbey, O., 2011). Günümüzün ekonomik ve çevre koşullarında, atık malzemelerin çevresel etkilerini en aza indirmek, üretimdeki önemli sorunlardan biridir. Bu nedenle, son zamanlarda atık miktarını azaltmak için ürün geri kazanım sürecine olan ilgi artmıştır. Sürdürülebilirlik için kaynak verimliliğini artırmak ve gelecek için yüksek bir yaşam kalitesini garanti altına almak amacıyla, birçok imalat ve hizmet şirketi yeniden üretim faaliyetlerini yürütmektedir (Jafari ve diğ., 2017). Çalışmalar, yeniden üretim stratejileri uygulayarak firmaların %40-65 oranında maliyet tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir, bu da sadece yeni parçaları üretmek için hammadde kullanımını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kaynak israfını da önleyebilmektedir (Yi ve diğ., 2016). Özellikle son yıllarda değişen yaşam şekilleri ve hızla gelişen teknoloji ile elektrikli ve elektronik atıkların miktarı diğer atıklara göre oldukça fazla artış göstermektedir.

Tüketici tarafından kullanılacak durumda olmayan kırılmış, bozulmuş, hasarlı, yeniden çalıştırılır hale getirilemez elektrikli ve elektronik aletlerin tümüne Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) denir (TÜBİSAD, 2018). Elektrikli ve elektronik atıklar, içeriğinde zengin metallerin (altın, gümüş, bakır, çinko, demir ve alüminyum) ve plastiğin olması ile hem ekonomiye hem çevreye hem de sağlığa etkileri sebebiyle önemli atıklar arasında yer almaktadır.

Bu kapsamda ilk olarak Avrupa Birliği komisyonu hem elektrikli ve elektronik eşyaların hem de ihtiva ettikleri çevreye zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması konusunda 2003 yılında “Elektrikli ve Elektronik Eşya Atıkları Direktifi” (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) ve “Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi” (The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment) yayınlanmıştır. Ayrıca direktifte elektrikli ve elektronik

ürünlerin üretimini yapan üreticilere ve kullanıcılara da sorumluluklar yüklenmiştir. Direktifte elektrikli ve elektronik eşyaların artan atık miktarlarından, içerdikleri zararlı maddeler ve çevreye olan etkilerinden, üretici sorumluluklarına değinilmiştir. İhtiva ettiği zararlı maddeler nedeniyle çevreye ve sağlığa olan tehditin azaltılması hatta ortadan kaldırılması için üreticiler ürettikleri ürünlerin geri dönüştürülmesi ve tüketiciler de bu konuda katkıda bulunması ve bilinçlenmesi gerektiği yer almıştır. Yönetmelikle, oluşan atık miktarının ve ihtiva ettiği zararlı bileşenlerin bertarafını azaltmak amacıyla geri dönüşüm teknikleri ve pratikleri desteklenmiş ve bu kapsamda yeni teknolojilere sahip tesislerin bu atıkları herhangi bir zarara yol açmadan geri dönüştürmesi ve gerekli bileşenlerin bertaraf edilmesi hedeflenmiştir (URL-1).

2003 yılında yayınlanan yönetmelik sonrasında ülkemizde de AEEE'nin geri kazanımı ile ilgili yürütülecek çalışmalar Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde 2012 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan “Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği”nde bu eşyalarda bir takım zararlı maddeleri ihtiva etmesinin sınırlandırılmasına ilişkin kural ile ülkemizde üretilen ya da ithal edilen elektrikli ve elektronik eşyalarda kurşun, cıva, krom, kadmiyum gibi çevreye ve insan sağlığına zararlı maddelerin bulunması yasaklanmıştır. AEEE bileşenlerinin yeniden kullanılmasının önceliklendirilmesi ve şayet tekrar kullanım mümkün değil ise geri kazanım ve bertaraf tesislerine gönderilmesi atık yönetimi prensipleri arasındadır. Ayrıca yönetmelikte, bu atıklar için kullanılacak bir sembol belirlenmiştir ve Şekil 2’de yer alan bu sembol ile bu tür atıkların çöp olmadığı ve toplama merkezleri, konteynerlere atılması gerektiği ifade edilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı AEEE Kontrolü Yönetmeliği, 2012).



**Şekil 2 : AEEE sembolü (TÜBİSAD, 2018).**

Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği'nde AEEE kategorileri buzdolabı/soğutucular, bilişim ekipmanları, televizyonlar, büyük beyaz eşyalar, küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar olarak gruplara ayrılmaktadır (TÜBİSAD, 2018).

Yönetmelik ile birlikte bu atıklarının toplanması, işlenmesi, geri dönüştürülmesi ve bertarafı üreticiye yüklenmiştir (Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2014-2017). Son senelerde sıkı çevresel mevzuatlar ile üretici sorumlulukların artması ve tüketicilerin farkındalık kazanması, çok sayıda üreticinin tüketim sonrası atık ürünleri geri kazanmasına ve değerlendirmeye başlamasını sağlamıştır. Türkiye'de ise tüketiciler kadar üretici şirketlere de yeni mevzuatlar gereği sorumluluklar yüklenmiştir.

AEEE'lerin insan sağlığına ve çevreye etkilerinin azaltılması ve ekonomiye kazandırılması kapsamında geri dönüşümünü gerçekleştiren ilk ve tek şirket, uygulamamızı gerçekleştirdiğimiz dayanıklı ev aletleri üreticisidir. Şirket, yalnızca dayanıklı ev aletleri üretimi gerçekleştirmemekte, bunun yanında markasına bakılmaksızın atık ve ikinci el elektrikli ürünleri alıp geri dönüşüm tesislerinde geri dönüşümünü sağlayarak çevreye, insan sağlığına ve ekonomiye katkı sağlamaktadır.



### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

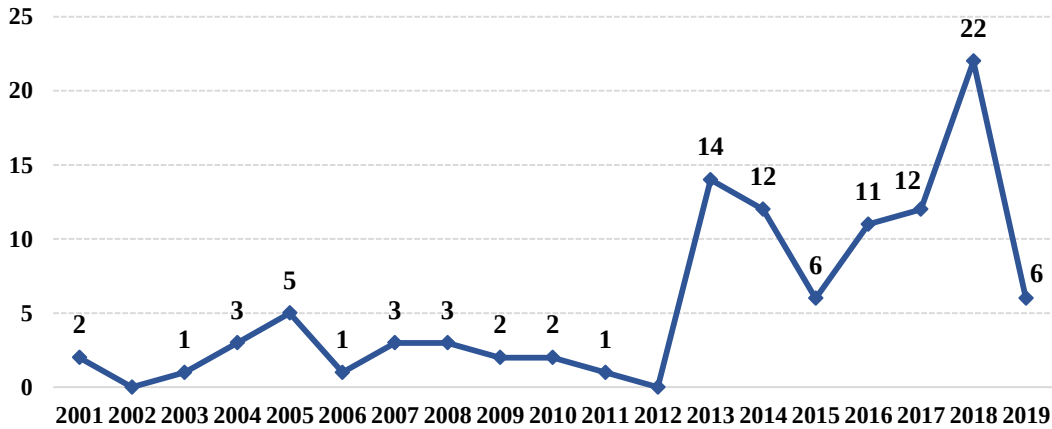
Bu çalışmada takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi incelendiğinden, literatür taraması, demontaj hattı dengeleme ve takım esaslı çalışma olmak üzere iki konuda derlenmiştir.

#### 3.1 Demontaj Hattı Dengeleme ile İlgili Literatür Araştırması

Tezin çalışma alanını oluşturan anahtar kelimeler kullanılarak yıllara göre yapılan yayın sayısı araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Hem literatürde hem de uygulama alanlarında demontaj hattı dengeleme ile ilgili yapılan çalışmalarda son yıllarda artış görülmektedir.

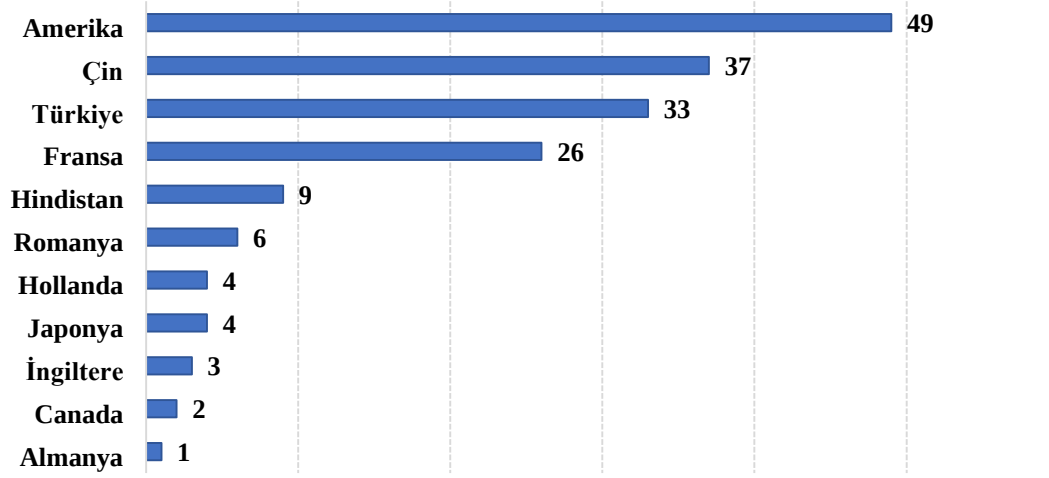
Scopus veri tabanı kullanılarak yapılan aramalarda, “demontaj hattı dengeleme” anahtar kelimesi ile arama yapıldığında 2000’li yıllardan itibaren çalışma sayılarında artış olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan mevcut çalışmalarda ise Türkiye’nin en fazla yayın yayınlayan ülkelerden biri olduğu ayrıca gözlenmiştir. Bu durum, Türkiye’de yasal mevzuatların akademik çalışmalara pozitif etkisi olduğunu göstermektedir.

“Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili Scopus veri tabanında 2019 Mart ayında alınan verilere göre literatürde yer alan yayınların yıllara göre dağılımı Şekil 3.1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.1 : “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların sayısı (Scopus, 2019).

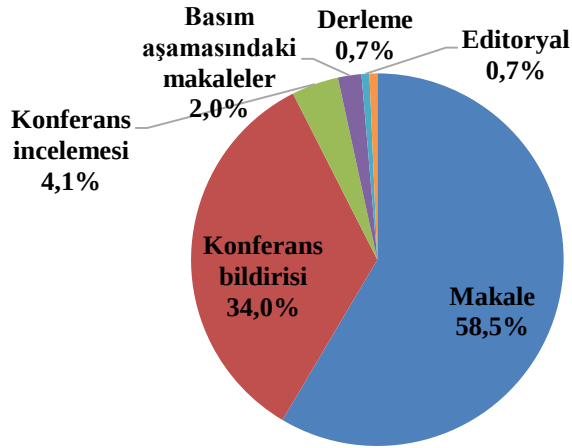
2001-2018 yılları arasında “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili ülke bazında yayınların sayısı da Şekil 3.1.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.2 :** “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların ülke sıralaması (Scopus, 2019).

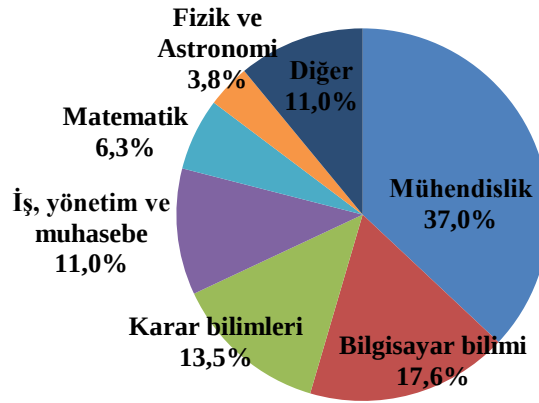
Şekil 3.1.2’de yer aldığına göre bu kapsamda Türkiye, dünya çapında en çok yayın yapılan ülkelerden biri olmuştur.

Şekil 3.1.3’te “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların doküman tipi bilgisi yer almaktadır. Çalışmaların yarısından fazlası makale olarak yayınlanmıştır.



**Şekil 3.1.3 :** “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların doküman tipi (Scopus, 2019).

Şekil 3.1.4’de “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların hangi alanlarda yer aldığı bilgisi yer almaktadır. Şekilden görüldüğü gibi bu konu daha çok mühendislik alanındaki çalışmalarda yer almıştır.



**Şekil 3.1.4 :** “Demontaj hattı dengeleme” ile ilgili yayınların kullanım alanı (Scopus, 2019).

Demontaj işlemi, parçaların ve malzemelerin bileşenlerinin birbiri ardına sıralanmış operasyonlar ile çıkarılması, malzeme ve ürün geri kazanım aşamasında önemli bir işlem olarak değerlendirilmektedir (Gupta ve Taleb, 1994). Demontaj hattı tasarımı son yıllarda hem uygulayıcılar hem de araştırmacıların ilgisini çektiğinden literatürde bu konu ile ilgili yer alan çalışma sayısı giderek artış göstermektedir. Sökme işlemi, ürünün çok sayıda parçaya ayrılması ve her bir alt montaj ekipmanının adet ve kalite montaj hattındaki gibi kontrollü olmadığından montaj işleminden daha karmaşık yapıdadır. Montaj işlemi tamamlanmak zorunda olmasına rağmen demontaj işlemi bazı teknik ve ekonomik kısıtlar nedeniyle tamamlanması zorunlu olmamaktadır. Örneğin, ürün parçalarının tersinmez bağlantıları teknik kısıtlama olarak değerlendirilirken sökme maliyetinin yeniden kazanılmış parçadan elde edilecek gelirden daha yüksek olduğu durum da ekonomik kısıt olarak değerlendirilebilir (Bentaha ve diğ., 2014d).

Hat konfigürasyon perspektifinden, düz hat demontaj tipi, ürünlerin tanımlanmış belirli kısıtlamalar altında sıralı bir iş istasyonları dizisinde demonte edildiği DHDP'nin en basit halidir.

Demontaj hatları, ilk olarak Güngör ve Gupta (2001) tarafından sunulmuş ve o zamandan beri çalışmalarda göz önüne alınan en yaygın hat tipi olmaya devam etmiştir. Bu çalışmada montaj hattı dengeleme probleminden (MHDP) adapte edilen demontaj hattı üzerinde hatalı/kusurlu parçaları minimize eden en kısa yol yöntemi formülasyonu kullanılarak bir çözüm prosedürü önermişlerdir.

Klasik hat dengeleme problemlerinde amaç genellikle ya bilinen çevrim süresi için açılan iş istasyonu sayısı minimizasyonu ya da verilen iş istasyonu sayısına göre

çevrim süresi minimizasyonu olmuştur. Ancak demontaj sistemlerinde demontaj hattı dengeleme prosedürüne entegre olan parça talep seviyesi ve ulaşılabilirlik, tehlikeli içerik, demontaj hattı yönünde değişiklik gibi çok sayıda önemli faktör vardır (Güngör ve Gupta, 2002).

McGovern ve Gupta (2003a), aç gözlü sezgisel algoritma çok amaçlı DHDP'nin çözümü için geliştirmiştir. İlk aşamada istasyon sayısını en azlayan uygun bir çözüm elde etmiş, sonraki aşamada ise açgözlü algoritmanın iş istasyonlarını dengelemedeki eksikliğini gidermek için optimale yakın ve uygun sıralar elde etmişlerdir.

McGovern ve Gupta (2006), karınca kolonisi algoritması sezgisel yöntemi ile DHDP'nin optimal ya da optimale yakın çözümleri elde etmektedir. Ele alınan çok amaçlı demontaj hattı dengeleme, öncelik ilişkileri dikkate alınarak açılan istasyon sayısının en azlanmasını ve parçaların demontaj sırasının dengelenmesini amaçlamaktadır. Ayrıca, zararlı ve talebi yüksek bileşenleri mümkün olduğunca öncelikli demonte etmeye ve aynı demontaj akış yönüne sahip parçaları da birlikte sökmeye çalışmaktadır.

Yüksek talep nedeniyle kapasite yetersizliği durumunda, bazı çalışmalarda paralel iş istasyonları olan demontaj hatları ele alınmıştır (Aydemir-Karadağ ve Türkbey, 2013; Hezer ve Kara, 2015).

Aydemir-Karadağ ve Türkbey (2013), paralel istasyona izin vererek çok amaçlı DHDP optimizasyonu için genetik algoritma geliştirmiştir. Çalışmada, demontaj sürecinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlayan hat dengeleme optimizasyonu ve istasyon boş kalma zamanı ile işçilik ve ekipman gereksinim maliyetlerini minimize eden iki amaç dikkate alınmıştır.

Hezer ve Kara (2015), DHDP için ağ tabanlı en kısa yol modelini önermişlerdir. Çalışmanın özgünlüğü, en kısa rota modeline dayanan bir ağ modeli aracılığıyla DHDP için paralel iş istasyonlarını dikkate almasıdır.

DHDP, çeşitli çalışmalarda matematiksel programlama kullanılarak formüle edilmiştir (Altekin ve diğ., 2008; Bentaha ve diğ., 2014b; Mete ve diğ., 2016a; Kannan ve diğ., 2017).

Altekin ve diğ. (2008), kâr maksimizasyonu amaçlı DHDP çözümü için karmaşık bir tamsayı programlama modeli önermişler ve problemi tanımlamak için ise *VE/VEYA* (*AND/OR*) öncelik ilişkisini gösteren grafiği kullanmışlardır. *AND/OR* grafiği (*AOG*), sökme alternatiflerini modellemek ve iş öğeleri ve alt montaj öğeleri arasındaki öncelik ilişkileri için kullanılır.

Koç ve diğ. (2009), açılan istasyon sayısını en aza indirmek için AOG ve parça öncelik diyagramı (PÖD) yerine tamsayı programlama fomülasyonunu daha etkin yapan dönüştürülmüş AND/OR grafiğini (DAOG) kullanan iki kesin formülasyon, tam sayılı programlama ve dinamik programlama formülasyonu önermiştir ve AOG'nin MHDP'de klasik öncelik ilişkisi diyagramına göre üstünlüğünü göstermiştir.

Bentaha ve diğ. (2014d), iş istasyonları boş zamanlarını minimize etmeyi amaçlayan belirli sayıdaki iş istasyonu ve belirsiz öncelik ilişkili ve çevrim süreli demontaj hattı tasarım problemi ile AOG kullanmıştır.

Bentaha ve diğ., (2015) tarafından yayınlanan DHDP'deki belirsizlikleri dikkate alan çalışmadaki formülasyonlar stokastik programlama (Bentaha ve diğ., 2014a), parçalı doğrusal programlama (Altekin, 2017), Lagrange gevşetmesi (Bentaha ve diğ., 2014b) ve Monte Carlo örnekleme ile geliştirilmiştir. Ayrıca, karar vericilerin belirsiz isteklerini ele alan Paksoy ve diğ. (2013), ikili bulanık hedef programlama ve karma çok amaçlı DHDP için bulanık çok amaçlı programlama modellerini önermektedir. Yazarlar, iki endüstriyel ürünün (el feneri ve radyo) sökülmesine ilişkin modelleri doğrulamaktadır. Bulanık analitik hiyerarşi süreci ve PROMETHEE (Avikal ve diğ., 2013), analitik hiyerarşi süreci ve M-TOPSIS (Avikal ve diğ., 2014) ve Choquet bulanık integrali (Ren ve diğ. 2018) gibi çok kriterli karar verme yöntemlerini içeren bulanık teknikler kullanılmıştır.

Amaç fonksiyonu yönünden, DHDP çalışmalarının çoğunun açılan istasyon sayısı minimizasyonuna odaklı olduğu söylenebilir (Güngör ve Gupta, 2002; Koç ve diğ., 2009; Hezer ve Kara, 2015). Ayrıca maliyet minimizasyonu (Bentaha, ve diğ., 2014a; Bentaha, ve diğ., 2014b) ve kâr maksimizasyonu (Altekin ve diğ., 2008; Özceylan ve diğ., 2014) gibi parasal konular da ele alınmıştır. Amaçlar, Ding ve diğ. (2010), Paksoy ve diğ. (2003), Zhang ve diğ. (2017), Aydemir-Karadağ ve Türkbey (2013), Kalaycı ve diğ. (2015) ve Tuncel ve diğ. (2014) tarafından çok amaçlı DHDP çalışmalara entegre edilmiştir.

Bazı araştırmacılar DHDP'yi matematiksel programlama teknikleri ile formüle etmesine rağmen problemleri pratik olarak çözümleyememiştir. DHDP'nin NP-tam yapısının ispatlanması (McGovern ve Gupta, 2007a) nedeniyle hesaplama verimliliğini sağlamak için çeşitli sezgisel yöntemler geliştirilmiştir (Lambert, 2007; Kalaycılar ve diğ., 2016; Mete ve diğ., 2016b). Stokastik iş süreleri, farklı hat

tasarımları ve eşzamanlı dikkate alınan çelişkili amaç fonksiyonları karmaşıklığı artırmaktadır (McGovern ve Gupta, 2007a).

Kalaycılar ve diğ. (2016), toplam net kazancı maksimize etmeyi amaçlamıştır.

Buna ek olarak, meta sezgisel yöntemler, DHDP'nin çözümü için tatmin edici çözüm kalitesi sağlayabilmiştir; genetik algoritma (Kalaycı ve Gupta, 2011; McGovern ve Gupta, 2007b; Kalaycı ve Gupta, 2013a; Kalaycı ve Gupta, 2013b; Kalaycı ve diğ., 2016), karınca kolonisi optimizasyonu (Kalaycı ve Gupta, 2012; Agrawal ve Tiwari, 2008; Kalaycı ve Gupta, 2013b), yerçekimi araştırma algoritması (Ren ve diğ., 2018), benzetimli tavlama (Kalaycı ve Gupta, 2013c), yapay arı kolonisi (Kalaycı ve Gupta, 2013d), tabu arama (Kalaycı ve Gupta, 2014) ve parçacık sürü optimizasyonu (Kalaycı ve Gupta, 2013e) gibi meta sezgisel yöntemler DHDP'yi çözmek için kullanılmıştır. NP-tam, çok terimli zamanda (deterministik olmayan) çözülmesi mümkün olmayan her adımda bir önceki çözümleme zamanından daha fazla zaman alan problem tipidir. NP-complete problemler büyük ölçekli örnekleri dikkate aldığımızda çözümlenmesi oldukça zor olmaktadır. NP-hard ise karar problemlerinin karmaşıklık sınıfı olan polinomsal zamanda bir çözümü olduğu ispatlanamayan problem tipidir (Tovey, 2002).

Bununla birlikte, işyerindeki esneklik ve operatörlerin gereksiz hareketleri göz önüne alındığında, U-tipi düzen; Agrawal ve Tiwari (2008), Avikal ve Mishra (2012) ve Avikal ve diğ. (2013) tarafından ele alınmıştır.

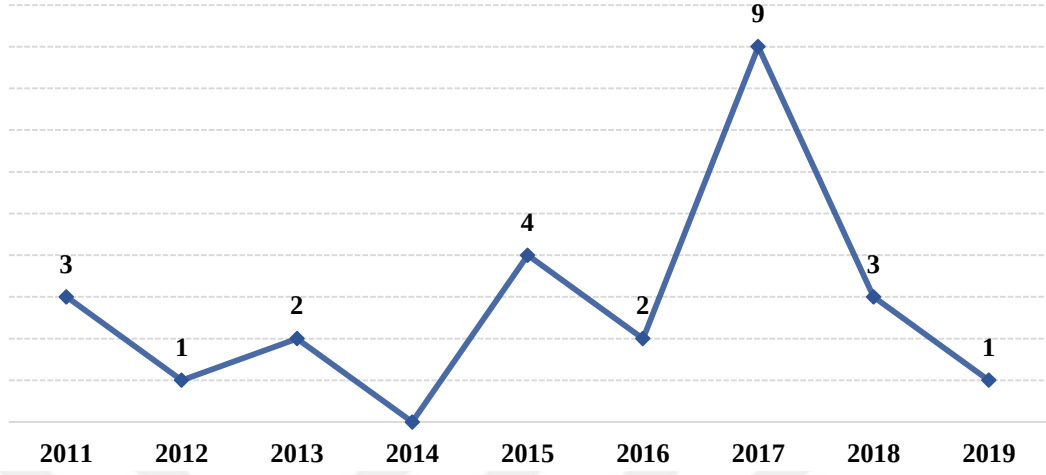
Agrawal ve Tiwari (2008), işbirlikçi karınca kolonisi optimizasyon algoritması ile stokastik iş süreli karmaşık modellenmiş DHDP'yi çözümlenmiştir.

Avikal ve diğ. (2013), çok amaçlı U-tipi DHDP geliştiren bir çalışma olarak iş istasyonları boş zamanları minimizasyonu, yüksek talepli ve tehlikeli parçaların sökölme önceliği maksimizasyonu performans kriterlerini dikkate almıştır.

### **3.2 Takım Esaslı Çalışma ile İlgili Literatür Araştırması**

Tezin çalışma alanını oluşturan anahtar kelimeler kullanılarak yıllara göre yapılan yayın sayısı araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Scopus veri tabanı kullanılarak yapılan aramalarda, “takım esaslı çalışma” anahtar kelimesi ile arama yapıldığında 2011’li yıllardan itibaren çalışma sayılarında artış olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan mevcut çalışmalarda ise Türkiye’nin en fazla yayın yayınlayan ülkelerden biri olduğu ayrıca gözlenmiştir.

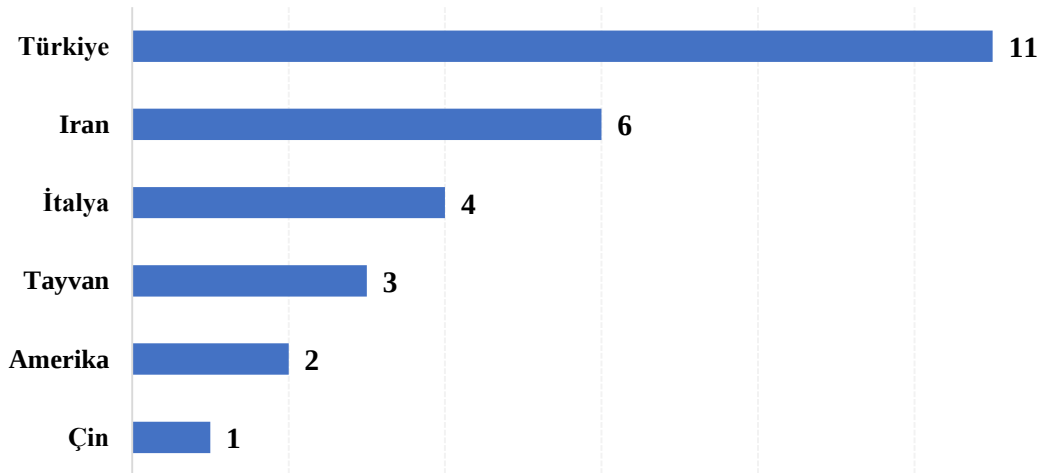
“Takım esaslı çalışma” ile ilgili Scopus veri tabanında 2019 Mart ayında alınan verilere göre literatürde yer alan yayınların yıllara göre dağılımı Şekil 3.2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.1 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayın sayısı (Scopus, 2019).

2011 yılına kadar literatürde takım esaslı çalışma konusunda herhangi bir literatür çalışmasının olmadığı görülmektedir.

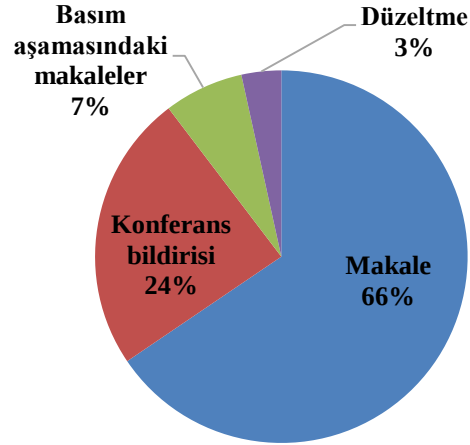
2011-2018 yılları arasında “Takım esaslı çalışma” ile ilgili ülke bazında yayınlanan çalışmaların sayısı da Şekil 3.2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.2 : “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayınların ülke sıralaması (Scopus, 2019).

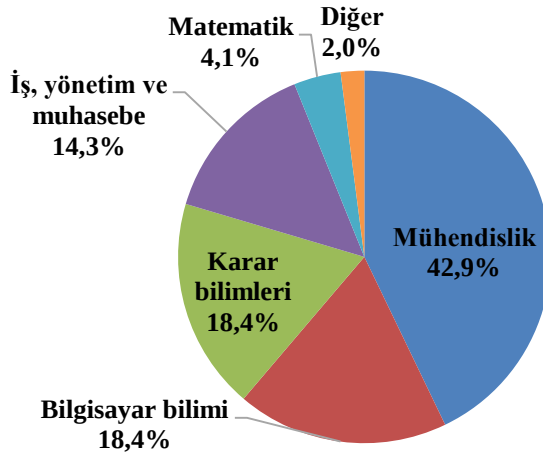
Bu kapsamda, Şekil 3.2.2’de görüldüğü gibi en çok yayın yayımlayan ülke Türkiye olmuştur.

Şekil 3.2.3’te “Takım esaslı çalışma” ile ilgili yayınların doküman tipi bilgisi yer almaktadır. Çalışmaların yarısından fazlası makale olarak yayınlanmıştır.



**Şekil 3.2.3 :** ‘‘Takım esaslı çalışma’’ ile ilgili yayınların dokuman tipi (Scopus, 2019).

Şekil 3.2.4’de ‘‘Takım esaslı çalışma’’ ile ilgili yayınların hangi alanlarda yer aldığı bilgisi yer almaktadır. Şekilden görüldüğü gibi bu konu daha çok mühendislik alanındaki çalışmalarda yer almıştır.



**Şekil 3.2.4 :** ‘‘Takım esaslı çalışma’’ ile ilgili yayınların kullanım alanı (Scopus, 2019).

Klasik montaj hattı, ürün bir istasyondan diğer istasyona hareket ederken her bir işçi bir istasyonda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Takım alışması esaslı iş istasyonları çok olmasa da çeşitli araştırma çalışmalarında ve artan trend ile ele alınmıştır.

Burbidge (1996), takım çalışması ve montaj hattı ile ilgili farklı grup çalışmalarını a) rn monte eden tek bir grup b) birden fazla aynı tipte paralel çalışan gruplar c) sınıflandırılmış gruplar d) montaj hattında her bir istasyonda bir grup olarak ifade etmiş; ancak hat tasarımı konusunda herhangi bir bilgi vermemiştir. Ayrıca bu çalışmada, montaj takımı tanımını bir grup işçi, ancak aynı bölgede çalışırken, sadece sürekli akış üretim sistemi içinde montajları tamamlayan bir organizasyon

birimi olarak yapmıştır. Takımın küçük ve uyumlu olması, kendi iş emirlerini belirlemesi ve ekip tarafından toplanan ürünlerin kalitesinden sorumlu olması gerekir.

Bir takım esaslı çalışma sisteminin uygulanması, geleneksel montaj hatları ile bağlantılı yüksek verimliliği korurken, montaj sisteminin esnekliğinin ve ürünün kalitesinin iyileştirilmesine yol açabilir.

Takım esaslı çalışmanın montaj sistemleri için oluşturduğu avantajlar, demontaj sistemleri için de geçerli olmaktadır.

Bukchin ve Masin (2004), literatürdeki ilk yayınlardan biri olan bu çalışmada, malzeme listesi parametresini kullanarak çok amaçlı dal ve sınır algoritması ve sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Bu çalışma, takım çalışması esaslı iş istasyonları tasarımı süreci ile birlikte gerekli olan takım sayısı ile takım içerisinde çalışan sayısına karar verir.

Dimitriadis (2006), iki aşamalı bir sezgisel yaklaşım geliştirmiş ve çeşitli ampirik problemleri çözdükten sonra gerçek hayattaki bir montaj hattı dengeleme problemine uygulamışlardır. Pratik hayatta takım çalışması esaslı montaj hatları kullanımının geniş çapta olduğundan ancak literatürdeki çalışmaların bu denli yaygın olmadığından bahsetmiştir. Burada amaç, hattaki toplam çalışan sayısını ve boş zamanların optimize edilmesini sağlayarak montaj hattı etkinliğini artırırken montaj hattı uzunluğunu azaltmaktır.

Amen (2006), zaman odaklı takım çalışması esaslı montaj hatları dengeleme problemlerinde, klasik hedef olarak, belli bir çevrim süresinde hat uzunluğunu minimize etmek için operatör *VE/VEYA (AND/OR)* iş istasyonu sayısını azaltarak bir ürünün montajı için gerekli insan gücünü en aza indirmeyi amaçlamıştır. Problemin zaman odaklı bakış açısında, sadece insan gücü hesaba katılırken, ücret oranları veya makineler gibi diğer maliyetler ihmal edilmiştir.

Çevikcan ve diğ. (2009), karma modellenli takım çalışması esaslı montaj hatlarına odaklanmış ve hem işçi transfer sistemlerine hem de model sıralamalarına çözüm oluşturmak için bir matematiksel programlama modeli ve sezgisel algoritma geliştirmiştir. Önerilen yöntem, alan kısıtlama ve iş yükü dengeleme gibi gerçek dünya karma modellenli montaj hatlarının çalışma koşullarını yansıtır ve karar vericinin takım çalışması esaslı iş istasyonlarının boyutunu kontrol etmesini sağlar. Metodoloji adımları arasında yoğun girdi-çıkı ilişkileri var. Metodolojinin ilk iki aşaması, yatay ve dikey dengeleme, fiziksel istasyonları oluşturmak için yapılan üçüncü adımı

gerçekleştirmek için gereklidir. Takımlar, ilk iki adımda iş yükleri dengelenen asgari sayıda işçiden oluşur. Üçüncü adım, ekiplerin oluşturulması sırasında sınırlı kaynaklar altında bir atama algoritması kullanır. Çalışan memnuniyeti sağlarken ürün kalitesi, sistem esnekliği, teslim süresi, maliyet ve avantajlarından klasik montaj hattına üstünlükler sağlaması nedeniyle montaj sistemlerinin tasarımında takım esaslı çalışma uygulanmıştır. Ancak, bir takım içinde montaj ekipleri ve görev atamaları oluşturulması montaj hattı dengeleme problemini daha karmaşık hale getirmiştir. Fattahi ve diğ. (2011), hem takım çalışması esaslı iş istasyonlarının sayısını hem de toplam işçi sayısını en aza indirmek için karma bir tamsayı programlama (KTP) modeli ve bir meta-sezgisel optimizasyon yaklaşımı önermiştir.

Kellegöz ve Toklu (2012), paralel karma modellenli montaj hattı dengeleme problemi (KMHD) için bir dal ve sınır algoritması sunmuş ve ayrıca sezgisel bazlı bir rehber geliştirmiştir.

Kazemi ve Sedighi (2013), üretim birimi başına toplam maliyeti en aza indirerek problemin çözümünü bulmak için parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasını ve genetik algoritmayı önermiştir.

Roshani ve diğ. (2013), düzgünlük indeksi, hat etkinliği ve hat uzunluğunu hesaplayan KMHD için simüle edilmiş bir tavlama algoritması sağlamıştır.

Roshani ve Giglio (2015a), karmaşık tamsayı programlama yoluyla maliyet odaklı amaç fonksiyonunu en aza indirmeye çalışmıştır. Önerilen modelde, şu varsayımlar dikkate alınmıştır: Bir seri takım çalışması esaslı montaj hattında bir homojen ürünün seri üretimi düşünülmekte ve çevrim süresi sabit kabul edilmektedir. Taşıma tesisi kurulum maliyeti her bir takım esaslı çalışılan iş istasyonu için sabittir. Her bir iş ögesi deterministik ve birbirinden bağımsız işlem süresi ve maaş oranına sahiptir. Bu tip amaç fonksiyonlarının olduğu problem tipleri çalışan yoğun üretim sistemlerinde görülmektedir. Bir benzetmeli tavlama temelli yaklaşım çalışmasında, Roshani ve Giglio (2015b) tip II KMHD'yi ele almıştır.

Yılmaz ve Yılmaz (2015) ve Fattahi ve diğ. (2011), takım çalışması esaslı iş istasyonlarında çalışanların görev yükü üzerindeki farklılığın en aza indirgenmesini amaçlamıştır.

Roshani ve Nezami (2017), eş zamanlı olarak işçi sayısını ve iş istasyonlarını en aza indirmek için yeni bir matematiksel programlama modeli ve benzetimli tavlama yaklaşımı önermişlerdir.

Chen (2017), simülasyon işlemleri için gerekli çalışma alanını en aza indirmek amacıyla simüle edilmiş tavlama algoritmasını uygun dengeleme çözümleri oluşturma prosedürü ile birleştiren bir karma sezgisel yaklaşım geliştirmiştir. Montaj hattı en büyük emeğe sahip üretim verimliliğini artırmak ve işgücü gereksinimlerini azaltmak için düzenlenmeli ve dengelenmelidir. MHDP ile ilgili geleneksel çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma diğer çalışmalardan farklı olarak, takım çalışması esaslı iş istasyonları, modern üretim için gerekli operatör ve iş istasyonu sayısı minimizasyonu, bütçe kısıtlamaları, iş istasyonları arasında hem görev hem de operatör tahsisinin optimizasyonu ve her bir görevin farklı iş istasyonlarında başlangıç/bitiş işlem süresinin belirlenmesi gibi otomotiv endüstrisinin özelliklerini dikkate almıştır. Giglio ve diğ. (2017), yetenekli çalışanlar ile KMHDP için yeni bir matematiksel model önermiştir. Model, işçilere, her bir iş istasyonunda aynı üretimden farklı montaj görevlerini eşzamanlı olarak gerçekleştirmelerine izin vermiştir. Chen ve diğ. (2018), kaynakların makine ve araçlara atıfta bulunduğu kaynak kısıtlı takım çalışması esaslı hat dengeleme problemini ortaya koymaktadır. Çok amaçlı bir KTDP formülasyonun yanı sıra genetik algoritma hibrit sezgisel buluşu gerçek bir otomotiv fabrikasında sunulmuş ve gösterilmiştir. Yazarlar, kaynak kısıtlamalarının göz ardı edilmesinin sorunun karmaşıklığını azaltabileceği sonucuna varmıştır; ancak sonuçta ortaya çıkan yapılandırma kaynakların ayarlanması maliyetinin yüksek olmasına yol açmıştır.

### **3.3 Çalışmanın Literatüre Katkısı**

Literatürde yer alan çalışmalarda genellikle küçük veri setleri ve tek modelli hatlar dikkate alınarak optimum sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Gerçek veri setlerinin büyük olması nedeniyle çözümü oldukça zordur ve bu alanda yapılan çalışma sayısı oldukça azdır. Demontaj hattı dengeleme problemi literatürde genellikle tek modelli ve deterministik olarak ele alınmıştır. Demontaj hattı dengeleme problemlerinde genel olarak ya önceden bilinen çevrim süresine göre iş istasyonu sayısı minimizasyonu ya da önceden bilinen istasyon sayısına göre çevrim süresi minimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Literatürde demontaj hattı dengelemeyi konu alan ve modelleme yöntemi olarak matematiksel programlama tekniklerini kullanan yayınlar model, parametre tipi, takım çalışması esaslı ve uygulamalı olup olmama özellikleri kapsamında yayınlar incelenmiştir. Literatürde, demontaj hattı dengeleme

konusunda takım esaslı çalışmasının dahil edildiği bir çalışma gözlenmemiştir. Demontaj hattı dengeleme çalışması konusunda literatür araştırmasına ilişkin sonuçlar Çizelge 3.3’de yer almaktadır.

**Çizelge 3.3 : Literatür araştırması sonuçları.**

| Referans                             | Model                        | Parametre Tipi | Takım Çalışması | Uygulama |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|----------|
| Mete, S. ve diğ., 2016               | Kavramsal                    | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Karadağ, A. A. ve Türkbey, O., 2013  | Genetik Algoritma            | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Kalaycılar, E. G., ve diğ., 2016     | Sezgisel                     | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Bentaha, M. L. ve diğ., 2014d        | Kavramsal                    | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Bentaha, M. L. ve diğ., 2014c        | Kavramsal                    | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Altekin, T.F. ve diğ., 2008          | KTDP                         | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Özceylan, E. ve Paksoy, T., 2013     | MOLP                         | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Kalaycı, C. B. ve diğ., 2015         | Yapay Arı Algoritması        | Bulanık        | Yok             | Var      |
| Avikal, S. ve diğ., 2014             | Sezgisel                     | Bulanık        | Yok             | Var      |
| Kalaycı, C. B. ve Gupta, S. M., 2013 | Tavlama Algoritması          | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Bentaha, M. L. ve diğ., 2013         | KTDP                         | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Özceylan, E. ve diğ., 2014           | MOLP                         | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Güngör, A. ve Gupta, S. M., 2002     | Sezgisel                     | Deterministik  | Yok             | Var      |
| McGovern, S.M. ve Gupta, S.M., 2007a | Genetik Algoritma            | Deterministik  | Yok             | Var      |
| McGovern, S.M. ve Gupta, S.M., 2007b | Genetik Algoritma            | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Agrawal, S. ve Tiwari, M.K., 2008    | Karınca Kolonisi Algoritması | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Koç, A. ve diğ., 2009                | IP                           | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Ding, L.-P. ve diğ., 2010            | Karınca Kolonisi Algoritması | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Altekin, F.T. ve Akkan, C., 2012     | KTDP                         | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Paksoy ve diğ., 2013                 | IP                           | Bulanık        | Yok             | Var      |
| Kalaycı, C. B. ve Gupta, S. M., 2013 | Yapay Arı Algoritması        | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Mete, S. ve diğ., 2016               | Işın Araması                 | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Kalaycı, C. B. Ve diğ., 2012         | Tavlama Algoritması          | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Avikal, S. Ve Mishra, P. K., 2012    | Sezgisel                     | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Avikal, S., ve diğ., 2013            | Sezgisel                     | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Tuncel, E. Ve diğ., 2012             | Pekiştirmeli Öğrenme         | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Kalaycı ve diğ., 2014                | Genetik Algoritma            | Stokastik      | Yok             | Var      |
| Kalaycı, C. B. Ve Gupta S. M., 2013  | Tabu Algoritması             | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Avikal ve diğ., 2013                 | Sezgisel                     | Deterministik  | Yok             | Var      |
| Bentaha, M.L. ve diğ., 2014e         | Kavramsal                    | Deterministik  | Yok             | Var      |

|                               |      |               |     |     |
|-------------------------------|------|---------------|-----|-----|
| Hezer, S. ve Kara, Y., 2015   | IP   | Stokastik     | Yok | Var |
| Bentaha, M. L., ve diğ., 2015 | KTDP | Deterministik | Yok | Var |
| Riggs, R. J. ve diğ., 2015    | KTDP | Stokastik     | Yok | Var |
| Altekin, F.T., 2016           | IP   | Stokastik     | Yok | Var |
| Duta, L., ve diğ., 2016       | KTDP | Deterministik | Yok | Var |

Genellikle literatürde yer alan çalışmalarda yalnızca hat dengeleme problemi çözümüne yönelik çözüm bulunmak amaçlanmış ve problem deterministik parametreler ile ele alınmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların genellikle küçük veri setleri ile çözümlenmesi sağlanmıştır. Ancak gerçek problemler oldukça karmaşık, büyük ve bütünsel olmakta ve bu problemleri de doğrusal programlama ile çözümlmek mümkün olmamıştır. Küçük ölçekli problemlerin çözülmesi için matematiksel modellerin geliştirildiği; ancak orta ve büyük ölçekli problemler için ise sezgisel yöntemlerin geliştirildiği ve uygulandığı gözlenmiştir. Bu problemlerin de çözülmesine yönelik de alternatif yöntemler bulunmuştur.

Demontaj hattı dengeleme probleminde kullanılan modelleme yaklaşımları başlıca şu başlıklar altında toplanabilir:

- Kavramsal ve betimsel modelleme,
- Doğrusal ve karma tamsayılı programlama,
- Doğrusal olmayan programlama,
- Bulanık mantık.

Demontaj hattı dengeleme probleminde çözüm yöntemleri ise analitik veya kesin çözüm yöntemleri, meta sezgisel yöntemler, benzetim yöntemleri, çok ölçütlü karar verme yöntemleri, sezgisel tekniklerdir.

Bazı araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda analitik veya kesin çözüm veren yöntemleri kullanmışlardır. Ancak bu yöntemler büyük ölçekli problemleri çözme konusunda yeterli olamamıştır. Stokastik problemleri çözmek için ise örneklem ortalaması yaklaşımı ve diğer yakınsama yöntemleri kullanılmıştır. Büyük ölçekli problemler için ise sezgisel yöntemler veya Genetik Algoritma, Tabu Araması, Benzetim Tavlaması, Yapay Arı Koloni, Karınca Kolonisi gibi meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Gerçek hayattaki belirsizlikleri dikkate alan ve birden fazla faktörü aynı anda inceleyen çalışmalarda benzetim yöntemleri ve çok ölçütlü karar verme yöntemleri (AHP, ANP, TOPSIS) tercih edilmiştir.

Gerçek üretim hatlarında demontaj hatlarında takım esaslı çalışma uzun yıllardır benimsenmesine rağmen tezin ana kapsamına giren “takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme” konusunda literatürde herhangi bir çalışma olmaması, tez

çalışmasının özgün ve nitelikli olacağını göstermektedir. Ayrıca tez çalışmamızın literatürde yer alacak sonraki çalışmalar için ise yol gösterici nitelikte olacağı öngörülmektedir.

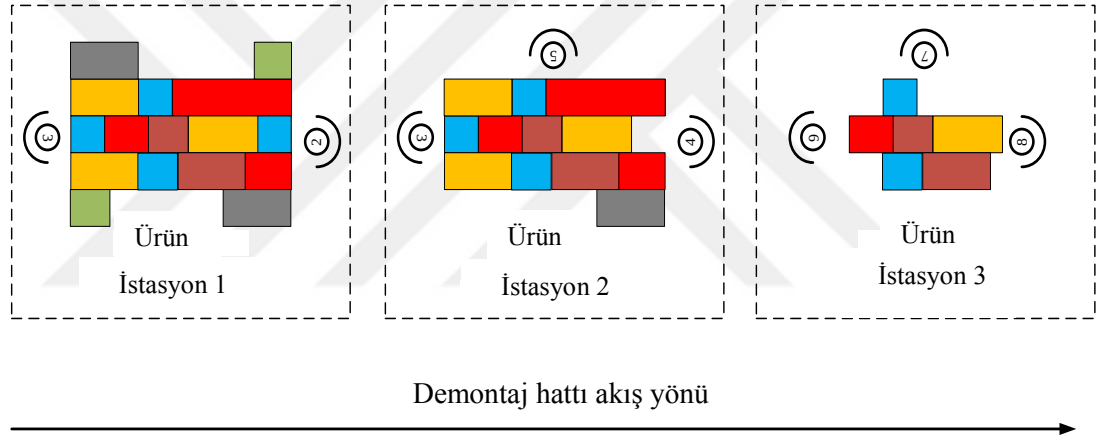
Literatürdeki çalışmaların büyük bir bölümü göz önüne alındığında, tez çalışmasının katkısı ilgili bakış açılarına göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Odaklanılan sistematik kapsamında, çalışma, literatürde ilk defa takım çalışması esaslı istasyonların, hat performansını iyileştirmek ve alan gereksinimini azaltmak için DHDP literatüründeki demontaj hatlarına entegrasyonunu sağlamaktadır.
- Metot perspektifinden bakıldığında, özellikle öncelik ve ardıl ilişkilere sahip olan iş öğelerinin belirli kısıtlamalar altında atanması için klasik (tek çalışan) DHDP'den oldukça farklı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli takım çalışması esaslı DHDP'nin formülasyonu için önerilmiştir. Ayrıca, takım çalışması esaslı DHDP için hesaplamalı olarak verimli çözümler sağlamak üzere iki yeni yapıcı sezgisel yöntem geliştirilmiştir.
- Araştırma verileri söz konusu olduğunda, montaj hattı dengeleme test problemlerini demontaj hattı dengelemeye dönüştürmek için bir sistematik geliştirilmiştir, böylece demontaj iş öğeleri özelindeki karakteristikler montaj hattı dengeleme test örneklerine adapte edilebilmiştir. Ayrıca, gerçek hayattaki çamaşır ve bulaşık makinesi demontaj hattı dengeleme problemi geliştirilen metodoloji kapsamında test edilebilmiştir.

DHDP verileri hakkında yukarıda belirtilen katkılar, DHDP ile ilgili çalışmalar ile tutarlı olurken araştırmacılara ve üreticilere de kolaylık sağlayacağı ve yol gösterici nitelikte olacağı düşünülmektedir.

#### 4. PROBLEM TANIMI

Takım çalışması esaslı demontaj hatlarını dengeleme problemi tez çalışması kapsamında ele alınmıştır. Takım çalışması esaslı demontaj hattı, bir grup işçinin aynı ürün üzerinde demontaj işlerini paralel bir şekilde yürütebileceği istasyonları içerir. Üç istasyonlu takım çalışması esaslı bir demontaj hattı Şekil 4.1'de gösterilmiştir, burada işçiler ve ürün alt montajları sırasıyla numaralı daireler ve renkli şekiller ile sembolize edilmiştir. Örneğin; istasyon 2 de 3, 4 ve 5 numaralı çalışanlar bir takım oluşturarak belirli bir ürün üzerinde işlem gerçekleştirmektedir.



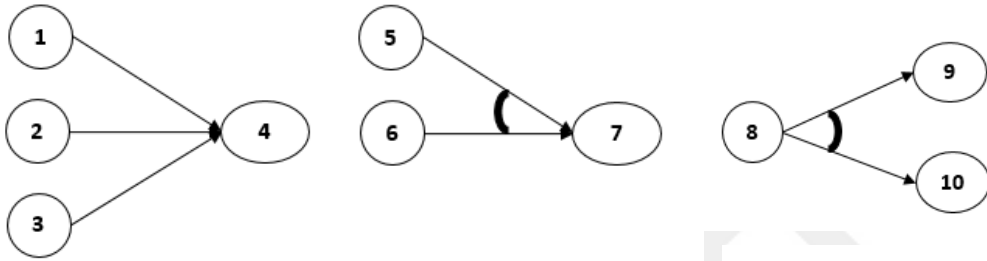
**Şekil 4.1 :** Takım çalışması esaslı demontaj hattı (Fattahi, 2011).

Demontaj hatlarında, mevcut işlerin istasyonlara atanma problemi çalışan sayısı ve iş istasyonu sayısına göre optimize edilmeye çalışılmaktadır. Her istasyonun demontajı, önceden belirlenmiş bir çevrim süresinde (CT) tamamlanmıştır. Bir iş istasyonundaki maksimum çalışan sayısı (KMAX) ile sınırlandırılmıştır. Her bir istasyonda çalıştırılacak maksimum çalışan sayısı, takım esnekliği ve istasyonlardaki ekip üyeleri arasındaki yakınlık göz önüne alınarak ürünün büyüklüğüne bağlı olarak belirlenmiştir (Bukchin and Masin, 2004; Fattahi ve diğ., 2011).

Altekin, Kandiller ve Özdemirel (2008)'de belirtildiği gibi demontaj hattındaki işler arasında VE önceliği (AND-precedence), VEYA önceliği (OR-precedence) ve VEYA ardıları (OR-successor) da olabilir. VE önceliği ile birbirine bağlı olan işler için öncülleri *i* işi başlamadan önce bitirilmek zorundadır. Öncül işler bitirilmeden

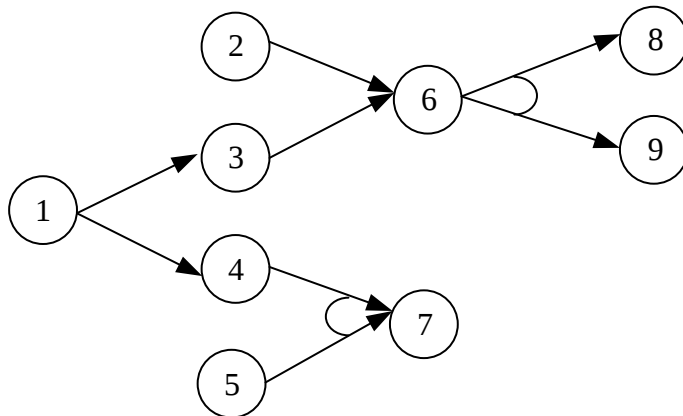
sonraki iş(ler) yapılamaz. Buna ek olarak, eğer işler birbirine *VEYA* koşulu ile bağlı ise *i* işine başlamadan öncüllerinden en az birinin yapılması yeterlidir. Son olarak, birbirine *VEYA* ile bağlı işlerden öncül olan işin yapılması durumundan ardıl işlerden herhangi biri yapılabilir.

Şekil 4.2’de sırasıyla *VE*, *VEYA* öncelik ve *VEYA* ardıl koşulları ile birbirine bağlı işler gösterilmiştir. (1)’de yer alan işler birbirlerine *VE* koşulu ile bağlanmıştır. 4. işin yapılabilmesi için 1, 2 ve 3. işlerin yapılması gerekli ve zorunludur. (2)’de yer alan işler birbirlerine *VEYA* koşulu ile bağlanmıştır. 7. işin yapılması için 5. veya 6. işlerin yapılması gerekli ve yeterlidir. (3)’de yer alan işler *VEYA* ardıl koşulu ile birbirlerine bağlanmıştır. 8. işin yapılması durumunda 9. veya 10. iş gerçekleştirilir.



**Şekil 4.2 :** Ve, veya koşulu ile birbirine bağlı işler.

Şekil 4.3’de gösterilen örnek bir teknolojik öncelik diyagramı referans alındığında; ilk işin 1 numaralı olduğu görülmektedir. 1 numaralı işin yapılması ile süreç başlar. 6. işin yapılabilmesi için 1., 2., ve (2) 3. işin yapılması gerekir (3) 7. işin yapılabilmesi için ise 1. işin yapılması gerekli ve 4. veya 5. işlerden herhangi birinin yapılması yeterlidir. 6. işin yapılması ile 8. ve 9. işlerden biri ya da ikisi de yapılabilir.



**Şekil 4.3 :** Teknolojik öncelik diyagramı.

9. işin öncelik kümesinde {1, 2, 3, 6} işleri ve 7. işin öncelik kümesinde ise {1, 4, 5} işleri bulunmaktadır.

Çalışma aşağıdaki varsayımlar altında yürütülmüştür:

- Demontaj hattındaki iş süreleri sabit ve deterministiktir.
- Malzeme ve ekipmanlar ile ilgili duraklamalar ihmal edilmiştir.
- Tüm çalışanlar aynı özelliklere ve kapasiteye sahiptir.
- Çalışanlar demontaj hattındaki tüm işleri yerine getirebilir.
- Tekrarlayan sürece izin verilmez.
- Çevrim süresi sabit ve deterministiktir.
- Tüm iş istasyonlarının kapasiteleri aynıdır.
- Tek tip ürün demonte edilmektedir.
- Paralel iş ve paralel istasyona izin verilmemektedir.
- Her bir iş süresi birbirinden bağımsız ve deterministiktir.



## 5. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi çözümü için geliştirilen matematiksel programlama modeli notasyonları aşağıda yer almaktadır.

### 5.1 İndisler

- $i$  : demontaj iş indeksi  
 $s$  : iş indeksi (VE öncül ilişkisi olan işler)  
 $b$  : iş indeksi (VEYA öncül ilişkisi olan işler)  
 $c$  : iş indeksi (VEYA ardıl ilişkisi olan işler)  
 $h$  : iş indeksi (ilişkisi olmayan işler)  
 $j$  : istasyon indeksi  
 $k$  : çalışan indeksi

### 5.2 Parametreler

- $TAD$  : iş kümesi  
 $NTAD$  : işlerin sayısı  
 $KMAX$  : bir istasyonda çalışacak maksimum çalışan sayısı  
 $SW$  : bir istasyonda çalışabilecek çalışanların kümesi

$$SW = \{1, \dots, KMAX\} \quad (1)$$

- $ST$  : istasyonların kümesi

$$ST = \{1, \dots, NTAD\} \quad (2)$$

- $CT$  : çevrim süresi  
 $t_i$  :  $i$ . işin süresi  
 $P_i$  :  $i$ . işe “ve” şartı ile bağlı öncül iş(ler) kümesi  
 $POR_i$  :  $i$ . işe “veya” şartı ile bağlı öncül iş(ler) kümesi  
 $SOR_i$  :  $i$ . işe “veya” şartı ile bağlı ardıl iş(ler) kümesi  
 $M_1$  : pozitif çok büyük sayı

$$M_1 = CT + 1 \quad (3)$$

$M_2$  : pozitif çok büyük sayı

$$M_2 = NTAD \quad (4)$$

### 5.3 Değişkenler

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1; \text{eğer } i. \text{ iş } j. \text{ istasyonda } k. \text{ çalışana atanıyorsa} \\ 0; \text{diğer} \end{cases}$$

$$\forall i \in TAD, \forall j \in ST, \forall k \in SW$$

$$c_j = \begin{cases} 1; \text{eğer } j. \text{ istasyon açık ise} \\ 0; \text{diğer} \end{cases} \quad \forall j \in ST$$

$$w_{jk} = \begin{cases} 1; \text{eğer } j. \text{ istasyona } k. \text{ çalışan atanıyorsa} \\ 0; \text{diğer} \end{cases} \quad \forall j \in ST, \forall k \in SW$$

$$ws_{jk} = \begin{cases} 1; \text{eğer } k \text{ çalışan } j. \text{ istasyona atanıyorsa} \\ 0; \text{diğer} \end{cases} \quad \forall j \in ST, \forall k \in SW$$

$$st_i : i. \text{ iş ögesinin başlangıç zamanı} \quad \forall i \in TAD$$

$$y_{ih} = \begin{cases} 1; \text{aynı çalışana atanmış } i. \text{ iş } h. \text{ işten önce geliyorsa} \\ 0; \text{diğer} \end{cases}$$

$$\forall i \in TAD, \forall h \in \{r : r \in TAD \wedge i < r\}$$

$epor_{ibj}$  = j. istasyona atanmış i. işin veya öncülleri için ikili değişken değeri

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall b \in POR_i, \forall j \in ST$$

$esor_{icj}$  = j. istasyona atanmış i. işin veya ardılları için ikili değişken değeri

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall c \in SOR_i, \forall j \in ST$$

$spor_{ib}$  = istasyona atanmış i. işin veya öncülleri için ikili değişken değeri

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall b \in POR_i$$

$ssor_{ic}$  = istasyona atanmış i. işin veya ardılları için ikili değişken değeri

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall c \in SOR_i$$

Matematiksel programlama aşağıdaki gibi formülze edilmiştir.

## Amaç fonksiyonları

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} w_{jk} \quad (5)$$

$$\text{Minimize } f_2 = \sum_{j \in ST} c_j \quad (6)$$

Öyle ki

$$\sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in TAD \quad (7)$$

$$st_i + t_i \leq CT \quad \forall i \in TAD \quad (8)$$

$$\sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{sjk} - \sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{ijk} \leq 0$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge P_g \neq \emptyset\}, \forall s \in P_i \quad (9a)$$

$$st_i - st_s + M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{sjk}\right) + M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{ijk}\right) \geq t_s$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge P_g \neq \emptyset\}, \forall s \in P_i, \forall j \in ST \quad (9b)$$

$$\sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{bjk} - \sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{ijk} \leq M_2 * (1 - spor_{ib})$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall b \in POR_i \quad (10a)$$

$$\sum_{b \in POR_i} spor_{ib} \geq 1 \quad \forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\} \quad (10b)$$

$$-st_i + st_b - M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{bjk}\right) - M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{ijk}\right) \leq -t_b + M_1 * (1 - epor_{ibj})$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall b \in POR_i, \forall j \in ST \quad (10c)$$

$$\sum_{b \in POR_i} epor_{ibj} \geq 1 \quad \forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall j \in ST \quad (10d)$$

$$NTAD * spor_{ib} - \sum_{j \in ST} epor_{ibj} = 0$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge POR_g \neq \emptyset\}, \forall b \in POR_i \quad (10e)$$

$$\sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{ijk} - \sum_{j \in ST} \sum_{k \in SW} j^* x_{cjk} \leq M_2 * (1 - ssor_{ic})$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall c \in SOR_i \quad (11a)$$

$$\sum_{c \in SOR_i} ssor_{ic} \leq 1 \quad \forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\} \quad (11b)$$

$$-st_c + st_i - M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{ijk}\right) - M_1 * \left(1 - \sum_{k \in SW} x_{cjk}\right) \leq -t_i + M_1 * (1 - esor_{icj})$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall c \in SOR_i, \forall j \in ST \quad (11c)$$

$$\sum_{c \in SOR_i} esor_{icj} \leq 1 \quad \forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall j \in ST \quad (11d)$$

$$NTAD * ssor_{ic} - \sum_{j \in ST} esor_{icj} = 0$$

$$\forall i \in \{g : g \in TAD \wedge SOR_g \neq \emptyset\}, \forall c \in SOR_i \quad (11e)$$

$$st_h - st_i + M_1 * (1 - x_{hjk}) + M_1 * (1 - x_{ijk}) + M_1 * (1 - y_{ih}) \geq t_i$$

$$\forall i \in TAD, \forall h \in \{r \in TAD \wedge i < r\}, \forall j \in ST, \forall k \in SW \quad (12a)$$

$$st_i - st_h + M_1 * (1 - x_{hjk}) + M_1 * (1 - x_{ijk}) + M_1 * (y_{ih}) \geq t_h$$

$$\forall i \in TAD, \forall h \in \{r \in TAD \wedge i < r\}, \forall j \in ST, \forall k \in SW \quad (12b)$$

$$\sum_{i \in TAD} x_{ijk} - M_2 * w_{jk} \leq 0 \quad \forall j \in ST, k \in SW \quad (13)$$

$$\sum_{k \in SW} k * ws_{jk} - \sum_{k \in SW} w_{jk} = 0 \quad \forall j \in ST \quad (14)$$

$$w_{j(k+1)} - w_{jk} \leq 0 \quad \forall j \in ST, \forall k \in SW - \{KMAX\} \quad (15)$$

$$\sum_{k \in SW} ws_{jk} - c_j = 0 \quad \forall j \in ST \quad (16)$$

$$c_{j+1} - c_j \leq 0 \quad \forall j \in ST - \{NTAD\} \quad (17)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, c_j \in \{0,1\}, w_{jk} \in \{0,1\}, ws_{jk} \in \{0,1\}, y_{ih} \in \{0,1\}, epor_{ibj} \in \{0,1\}$$

$$esor_{icj} \in \{0,1\}, spor_{ib} \in \{0,1\}, ssor_{ic} \in \{0,1\}, st_i \geq 0 \quad (18)$$

$f_1$  (5) ve  $f_2$  (6), sırasıyla işçi ve istasyon sayısının en aza indirilmesini ele almaktadır. Kısıt (7) her bir işin bir istasyonda bir çalışana atanıyor olmasını ifade eder. Kısıt (8) her bir işin (başlangıç zamanı + işlem zamanı) çevrim süresi ya da daha öncesinde tamamlanmasını garanti eder. Kısıt (9) seti, her bir iş ve onun ve öncülleri ile ilişkilerini sağlar. Demontaj hattındaki işler arasındaki veya öncül ve ardıl ilişkileri Kısıt (10) ve Kısıt (11) setleri ile sağlanır. Kısıt (12) seti, birbirinden bağımsız işlerin atanması ile ilgilidir. Kısıt (13) iş atanması ve istasyon kullanımı kararları arasındaki ilişkiyi kurar. Kısıt (14)  $ws_{jk}$  and  $w_{jk}$  arasındaki tutarlılığı sağlar. Kısıt (15) yeni istasyonun açılmasına ancak bir önceki istasyon kullanılması durumunda izin verir.

Yani istasyon atamalarının indis olarak sırayla yapılmasını sağlar. Kısıt (16) işçi atamasının olduğu istasyonun aktif olduğunu gösterir. Kısıt (17) bir istasyona atama yapılırken çalışan indislerinin ardışık olarak ilerlemesine karşılık gelir. Kısıt (18) seti ise değişkenlerin işaret kısıtlamalarını gösterir.

Problem için iki aşamalı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. İlk olarak model, ilk hedefe göre çözülür. İlk hedef, çalışan sayısının minimizasyonudur. Daha sonra, elde edilen sonuç, modele ikinci amaç için çözüm araştırılırken bir kısıt olarak modele entegre edilmiştir. İlk amaç fonksiyonuna göre yani çalışan sayısını minimize etmek amacıyla çözülen modelde elde edilen çalışan sayısı, ikinci model için bir girdi oluşturmuştur. Böylelikle istasyon sayısı optimize edilirken, çalışan sayısı açısından çözüm kalitesi ihlal edilmemiştir.



## 6. GELİŞTİRİLEN SEZGİSELLER

McGovern ve Gupta (2007a), klasik DHDP'nin güçlü bir şekilde NP-tam olduğunu göstermiştir. Takım çalışması esaslı iş istasyonları, her istasyona demontaj iş öğelerinin atanmasını gerektirdiğinden, klasik demontaj hattına kıyasla takım çalışması esaslı DHDP'ler, problemin değişken sayısı ve değişkenler açısından daha yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Bu nedenle, takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme (MMDLB) problemi için hesaplama kalitesinin etkin ve hızlı bir şekilde elde edilebilmesi için iki sezgisel yöntem (MMDLBH-I ve MMDLBH-II) geliştirilmiştir.

Tez kapsamında demontaj iş ögesi seçimi/öncelik kuralı, -diğer kurallara göre üstünlükleri doğrulandığından- (Scholl ve VoB, 1996; Kellegöz ve Toklu, 2015), konum ağırlığı (*positional weight*) ve takip eden iş ögesi sayısı (*number of followers*) kuralları çalışma kapsamında geliştirilen sezgisel yöntemlerde kullanılmıştır. Konum ağırlığı yönteminde her bir iş ögesi için konum ağırlığı hesaplanır. Bir işin konum ağırlığı, ilgili iş ögesi ve ardıl iş öğelerinin sürelerinin toplamına eşittir. En yüksek konum ağırlığına sahip iş ögesi öncelik kısıtlarını sağlaması durumunda ilk olarak atanır. Takip eden iş ögesi sayısı yönteminde ise kendisinden sonra gelen iş ögesi sayısı hesaplanır ve en yüksek değere sahip iş öncelik kısıtlarını sağlaması durumunda ilk olarak atanır.

### 6.1 Sezgisel Yöntem-1: MMDLBH-I

MMDLBH-I yöntemi adımları bu kısımda açıklanmıştır.

MMDLBH-I yöntemi bir önceliklendirme kuralı seçerek başlar. Konum ağırlığı ya da takip eden iş ögesi sayısı yöntemlerine göre her bir iş ögesinin sahip olduğu değer hesaplanır. Hesaplanan konum ağırlığı veya takip eden iş ögesi sayısı maksimum değerine göre öncelik kısıtları da dikkate alınarak atanabilecek uygun iş öğeleri kümesi belirlenir. Demontaj hattındaki işler, seçilen kurallara göre değerlendirilip önceliklendirilir.

Ardından, algoritma atama yapılacak ilk iş istasyonunu açılır. Her bir takım boyutu alternatifi için  $(1, \dots, KMAX)$  çevrim süresi kısıtlaması altında demontaj hattındaki işlerin ataması planlanır. Yani her bir istasyonda çalışabilecek maksimum işçi sayısına göre iş atamaları gerçekleştirilir.

Atama sistematigi, henüz daha ataması gerçekleşmemiş öncelik ilişkilerini sağlayan ve yüksek öncelik değerine sahip atamayı gerçekleştirir.

Her bir istasyon boyutu alternatifi için bir atama yapıldıktan sonra ilgili boyutun verimliliği  $(DTE_{jk})$  hesaplanır. Yani istasyonda çalışabilecek maksimum çalışan sayısına göre her bir çalışan sayısı için bir verimlilik değeri hesaplanır.

$$DTE_{jk}(\%) = \frac{k \text{ çalışanlı j. istasyona atanan tüm işlerin toplam süresi}}{CT \times k} \times 100 \quad (19)$$

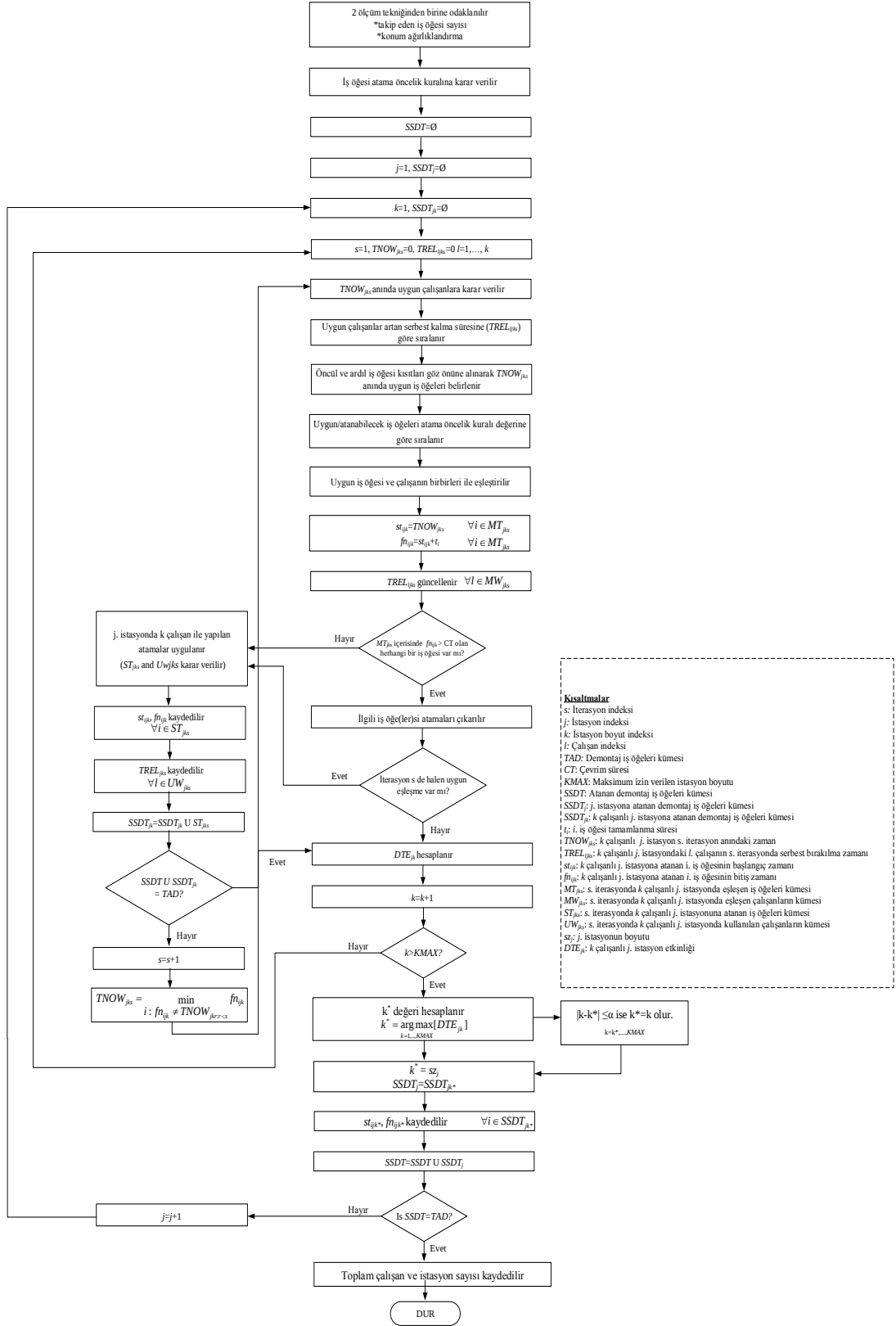
İstasyonda çalışabilecek maksimum sayıdaki çalışan alternatifine göre yapılan atamalar neticesinde en yüksek verimlilik değeri ilk istasyonun boyutunu belirler. Örneğin,  $KMAX$ 'ın dörde eşit olduğu ve bir, iki, üç ve dört için istasyon büyüklüğü alternatiflerinin verimlerinin sırasıyla %83, %94, %92 ve %87 olduğu varsayalım. Eşik değeri %5 olduğunda, algoritma önce ikiyi en yüksek verime sahip alternatif olarak bulur (yani %94), ardından istasyonun boyutunu üç olarak belirler, çünkü verimlilik açısından en yüksek boyutta alternatif tatmin edici eşiktir ( $\geq (= \% (94-5))$ ).

İlk istasyonu oluşturduktan ve planlanan görevleri güncelledikten sonra bir sonraki istasyon açılır ve boyutu aynı sistematik ile belirlenir.

İstasyon açılma süreci, her bir demontaj işi kesinlikle bir istasyonda atanıncaya kadar ardışık olarak devam eder.

Atama işlemleri her aşamada algoritmanın başında seçilen önceliklendirme kuralına göre yapılır. Bu işlemler bütün işlerin atanması durumuna kadar devam eder ve tüm işlerin atanmasının ardından süreç son bulur.

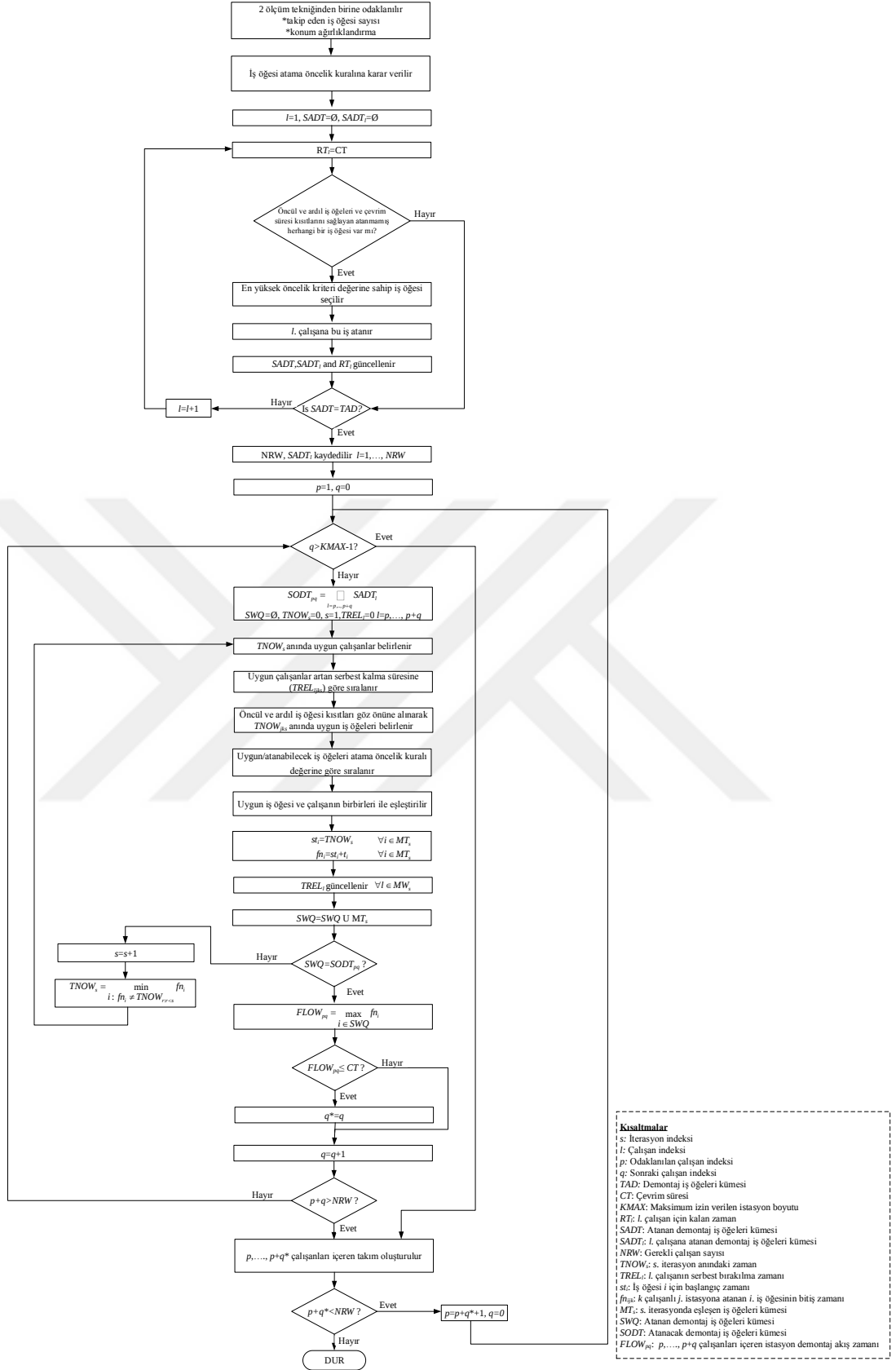
MMDLBH-I için algoritma akış diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : MMDLBH-I akış diyagramı.

## 6.2 Sezgisel Yöntem-2: MMDLBH-II

MMDLBH-II yöntemi adımları bu kısımda açıklanmıştır. MMDLBH-II yöntemi ise her bir istasyona bir çalışanın atanması durumu ile başlar. Konum ağırlığı ya da takip eden iş ögesi sayısı yöntemlerine göre her bir iş ögesinin sahip olduğu değer hesaplanır. Hesaplanan konum ağırlığı veya takip eden iş ögesi sayısı maksimum değerine göre öncelik kısıtları da dikkate alınarak atanabilecek uygun iş ögeleri kümesi belirlenir. Demontaj hattındaki işler, seçilen kurallara göre değerlendirilip önceliklendirilir. Demontaj hattındaki işler, seçilen kurallara ve öncelik kısıtlarına göre değerlendirilip önceliklendirilir. Önceliklendirilen işler klasik demontaj hattı dengeleme probleminde olduğu gibi her bir istasyonda bir çalışan olacak şekilde birer birer istasyonlara atanır. Daha sonra, ilk çalışandan başlayarak, sezgisel model ilk istasyona odaklanır ve maksimum istasyon büyüklüğüne (*KMAX*) ulaşmaya kadar işçileri bir araya getirerek konfigürasyon alternatifleri üretir. Örneğin, *KMAX* üçe eşit olduğunda, ilk istasyonun konfigürasyon alternatifleri (işçi 1), (işçi 1-işçi 2) ve (işçi 1-işçi 2-işçi 3)'dir. Bir istasyon konfigürasyon alternatifi oluşturulduktan sonra, ilk olarak tahsis edilen demontaj işleri, takım haline getirilen bu işçiler için atanır. Sonrasında, bu atamalar için demontaj işlemi toplam süresi ve çevrim süresini karşılaştırarak kontrol edilir. Mümkün olan alternatifler arasında, maksimum büyüklüğe sahip olan takım, çevrim süresi kısıtı altında belirlenir. Örneğin, üç çalışana sahip takımda yapılan atama işlerinin işlem süreleri toplamı çevrim süresini geçiyorsa ve iki çalışanlı atamaların toplam süresi çevrim süresini geçmiyorsa o istasyona iki çalışan atanır ve o çalışanlara atanan işler açılan bu istasyonda gerçekleştirilir. Ardından, bir sonraki istasyon açılarak kalan işler, yine aynı şekilde öncelik kısıtları ve çevrim süresi kısıtı altında atamalar yapılarak gerçekleştirilir. Bu arada algoritma, önceki istasyondaki son çalışana göre bir sonraki çalışandan başlayarak istasyon konfigürasyon alternatifleri oluşturmaya başlar. İkinci istasyonun son elemanının işçi 6 olduğunu varsayarsak, üçüncü istasyonun ilk elemanı işçi 7'dir. Son olarak, algoritma son çalışanın bir istasyona dahil edilmesi koşuluyla sona erdirilir. Atama işlemleri her aşamada algoritmanın başında seçilen önceliklendirme kuralına göre yapılır. Bu işlemler bütün işlerin atanması durumuna kadar devam eder ve tüm işlerin atanmasının ardından süreç son bulur. MMDLBH-II için algoritma, Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Ayrıca süreç içinde kullanılan parametre kısaltmaları aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.2 : MMDLBH-II akış diyagramı.



## **7. UYGULAMA**

Tez çalışması kapsamında önerilen karma tamsayılı programlama modeli, Türkiye'nin önde gelen dayanıklı ev aletleri üreticisi bünyesinde yer alan AEEE tesislerinde çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi ürünleri demontaj hattı üzerinde uygulanmıştır.

### **7.1 Uygulamanın Yapıldığı Firmanın Tanıtımı**

Tez kapsamında uygulamanın yapıldığı şirket, yaklaşık 65 yıllık ticari geçmişe sahip ekonomik ve teknolojik anlamda birçok ilke imza atmış dayanıklı ev aletleri üretimi yapan Türkiye'nin lider şirketlerinden biridir. Şirket, dünya çapında on binlerce çalışanı, 7 ülkede 20'ye yakın üretim tesisi ve 10'un üzerinde markasıyla dünyada çok sayıda ülkede faaliyette bulunmaktadır. Türkiye'de beyaz eşya alanında Türkiye pazarının yarısından fazla pazar payına sahip sektöründe lider ve en fazla büyüyen şirket konumundadır. Şirket hedeflediği “Dünyaya Saygılı, Dünyada Saygın” vizyonu ile ekonomik, çevresel ve sosyal alanlardaki sürdürülebilirliği yansıtmaktadır. Bu vizyon kapsamında üretmiş oldukları ürünlerin enerji, su tüketimi, ihtiva ettiği zararlı materyaller gibi çevresel etkilerini azaltmaya yönelik yapılan çalışmalar çok önemli bir paya sahip olmuştur. Bu kapsamda üretilen ürünlerin çevreye olan zararlı etkilerin azaltılması amacıyla markasına bakılmaksızın kullanılmayacak durumda olan ikinci el elektrikli ürünleri alarak şirket bünyesinde yer alan iki geri dönüşüm tesisinde geri dönüşümü sağlanmaktadır.

### **7.2 Uygulamanın Yapıldığı Kısım**

Beşinci bölümde anlatılan metodoloji, şirket AEEE tesislerinde çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi ürünleri demontaj hattı üzerinde uygulanmıştır. Şirketin hurda elektrikli ürünleri geri dönüştürdüğü iki tesisi bulunmaktadır. Kurulan bir tesisi buzdolabı ve klima ürünlerinin geri dönüşümü için tasarlanmışken; diğer tesis ise buzdolabı dışındaki beyaz eşyalar ve küçük ev aletleri için tasarlanmıştır. Elektronik

ürünler için ise tasarlanmış geri dönüşüm tesisi şu an için hizmet vermemektedir. Bu iki tesis de yarı otomatize olarak çalışmakta olup demontaj süreci adımları 7.3 ve 7.4 bölümlerinde açıklanacaktır. Bu tesislere gelen ve kabul edilen tüm ürünler hurda olarak nitelendirilmektedir. Gelen ürünlerde herhangi bir eliminasyon yapılmadan sürece dahil edilir. Büyük beyaz eşyalar için 3 (üç) tip ürün gamı vardır: Yeniden değerlendirme merkezinden (YDM) gelen ürünler, Kampanya kapsamında gelen ürünler, Üretim gövde kapı ürünleridir. YDM'den şirkete ait markalı hurda ürünler gelirken kampanya kapsamında her marka ürün AEEE tesisine gelmektedir. Hatalı üretilen ürünler ise gövde halindeyken bu tesise getirilir.

### 7.3 Çamaşır Makinesi Ürünü İçin Geliştirilen Modelin Uygulanması

Uygulama kapsamında şirket AEEE tesislerinde çamaşır makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi için çözüm geliştirilmiştir. Çamaşır makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi için GAMS-CPLEX programı geliştirilmiştir. Beşinci bölümde yer alan matematiksel model bu yazılım programında kodlanmıştır. Hesaplamalar Intel(R) Core(TM) i7 CPU (3.20 GHz/8 GB RAM) işlemcisine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Hesaplama süresi 86400 sn olarak sınırlandırılmıştır. Bu yazılımda, çevrim süresi, bir istasyonda çalışabilecek maksimum işgören sayısı, iş sayısı, işlerin tamamlanma süresi, işlerin öncelikleri gibi parametreleri için kullanıcı tarafından bilgiler girilmekte ve değiştirilebilmektedir. Çamaşır makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı tasarımı probleminin çözümü için çalışan sayısını ve ardından bulunan optimum çalışan sayısına göre açılan istasyon sayısını minimize eden GAMS yazılım programında geliştirilen matematiksel model Ek A'da yer almaktadır. Ayrıca, önerilen takım çalışması esaslı yaklaşım ile her bir istasyona bir çalışanın atandığı klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü karşılaştırılmıştır. Klasik demontaj hattı dengeleme problemini elde etmek için KTDP modele 20 no'lu kısıt eklemiştir. (20)

$$c_j = ws_{j1} \quad \forall j \in ST$$

Eklenen bu kısıt ile klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü için geliştirilen matematiksel modelde ve GAMS yazılım programında değişikliğin yer aldığı kısım Ek A'da yer almaktadır. Demontaj işlemi sürecinde 41 iş ögesi

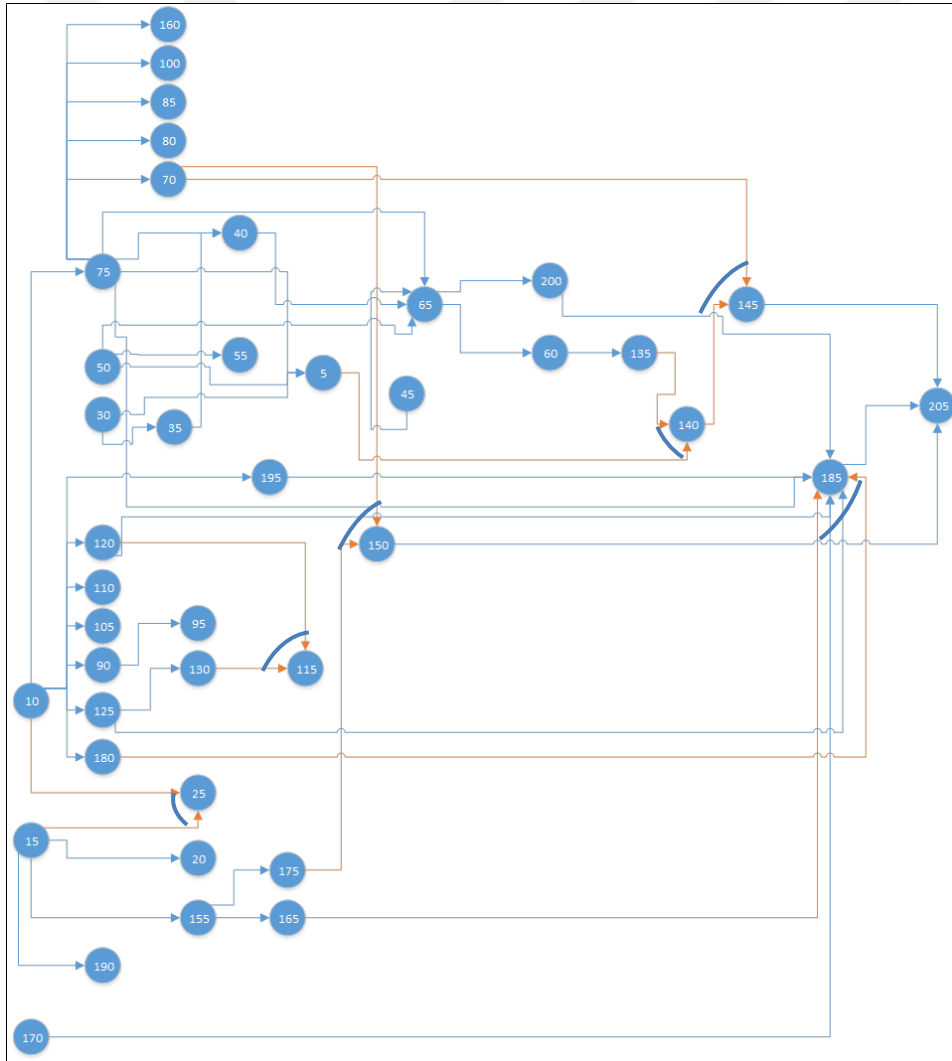
bulunmaktadır. Çamaşır makinesi özelinde demontaj iş öğeleri, süreleri ve öncelikli iş(ler) bilgisi Çizelge 7.3.1’de yer almaktadır.

**Çizelge 7.3.1 : Çamaşır makinesi demontaj işlemleri.**

| No  | Demontaj İş Öğesi                             | Süre (sn.) | Öncelik iş öğesi (leri) | No  | Demontaj İş Öğesi                                           | Süre (sn.) | Öncelik iş öğesi (leri)                            |
|-----|-----------------------------------------------|------------|-------------------------|-----|-------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|
| 5   | Tahliye Hortumların sökülmesi                 | 83         | AND (75,50,30)          | 110 | Kondansatörün sökülmesi                                     | 60         | 10                                                 |
| 10  | Üst tablanın sökülmesi                        | 18         | -                       | 115 | Deterjan ünitesinin sökülmesi                               | 45         | OR (120, 130)                                      |
| 15  | Arka panelin sökülmesi                        | 12         | -                       | 120 | Kazan ara hortumunun sökülmesi                              | 28         | 10                                                 |
| 20  | Rezistansın sökülmesi                         | 22         | 15                      | 125 | Ventil hortumunun sökülmesi                                 | 34         | 10                                                 |
| 25  | Gövdenin sökülmesi                            | 24         | OR (10, 15)             | 130 | Su giriş ventilinin sökülmesi                               | 30         | 125                                                |
| 30  | Körük telinin sökülmesi                       | 28         | -                       | 135 | Filtrenin sökülmesi                                         | 22         | 60                                                 |
| 35  | Kazanı körüğe bağlayan sarmal yayın sökülmesi | 35         | 30                      | 140 | Pompanın sökülmesi                                          | 34         | OR (5, 135)                                        |
| 40  | Önkörüğün sökülmesi                           | 72         | OR (35, 75)             | 145 | Pompa motorunun sökülmesi                                   | 75         | OR (70, 140)                                       |
| 45  | Emniyet kilidinin sökülmesi                   | 16         | -                       | 150 | Yıkama motorunun sökülmesi                                  | 60         | OR (70, 175)                                       |
| 50  | Kapak menteşesinin sökülmesi                  | 22         | -                       | 155 | Kayışın sökülmesi                                           | 15         | 15                                                 |
| 55  | Kapağın cam kısmının ayrılması                | 18         | 50                      | 160 | Motor kontrol ünitesinin sökülmesi                          | 45         | 75                                                 |
| 60  | Ön alt muhafazanın sökülmesi                  | 68         | 65                      | 165 | Motor kasnağının sökülmesi                                  | 26         | 155                                                |
| 65  | Ön panelin sökülmesi                          | 62         | AND (40, 45, 50, 75)    | 170 | Kazan kasnağının sökülmesi                                  | 20         | 15                                                 |
| 70  | Kabloların sökülmesi                          | 71         | 75                      | 175 | Kazan ile motor arasında alüminyum döner elemanın sökülmesi | 15         | 155                                                |
| 75  | Kontrol panelinin sökülmesi                   | 30         | 10                      | 180 | Kazanın üstündeki yayların sökülmesi                        | 15         | 10                                                 |
| 80  | Kontrol paneli sacının sökülmesi              | 42         | 75                      | 185 | Kazanın sökülmesi                                           | 93         | (AND (75, 120, 125, 170, 195, 200), OR (180, 190)) |
| 85  | Merkezi Kontrol ünitesinin sökülmesi          | 35         | 75                      | 190 | Amortisörlerin alınması                                     | 75         | 15                                                 |
| 90  | Su seviyesi hortumunun sökülmesi              | 36         | 10                      | 195 | Üst Beton denge ağırlığının sökülmesi                       | 48         | 10                                                 |
| 95  | Su seviyesi sensörünün sökülmesi              | 30         | 90                      | 200 | Ön eton denge ağırlığının sökülmesi                         | 54         | 65                                                 |
| 100 | Işık taşıyıcının sökülmesi                    | 30         | 75                      | 205 | Alt panelin ayaklardan ayrılması                            | 20         | AND (145, 150, 185)                                |
| 105 | Prosesfanın sökülmesi                         | 60         | 10                      |     |                                                             |            |                                                    |

5 numaralı iş olan “Tahliye hortumlarının sökülmesi” 83 sn sürmekte ve 75-“Kontrol panelinin sökülmesi”, 50-“Kapak menteşesinin sökülmesi”ve 30-“Körük telinin sökülmesi” numaralı işler bu işin öncül işleridir. 5 numaralı işin yapılabilmesi için öncül işlerin yapılması gerekli ve zorunludur. 18 sn süren 10 numaralı iş olan “Üst tablanın sökülmesi” işin öncül bir işi yoktur yani bu işin yapılması için herhangi bir işin yapılması/tamamlanması gerekmemektedir. 25 numaralı “Gövdenin sökülmesi” işi için ise 10-“Üst tablanın sökülmesi” veya 15-“Arka panelin sökülmesi” numaralı işlerden en az birinin yapılması yeterlidir.

Çamaşır makinesi demontaj hattında 41 iş ögesi bulunmaktadır. Bu iş ögeleri arasındaki öncelik ilişkisini gösterir teknolojik öncelik diyagramı Şekil 7.3.1’da gösterilmiştir.

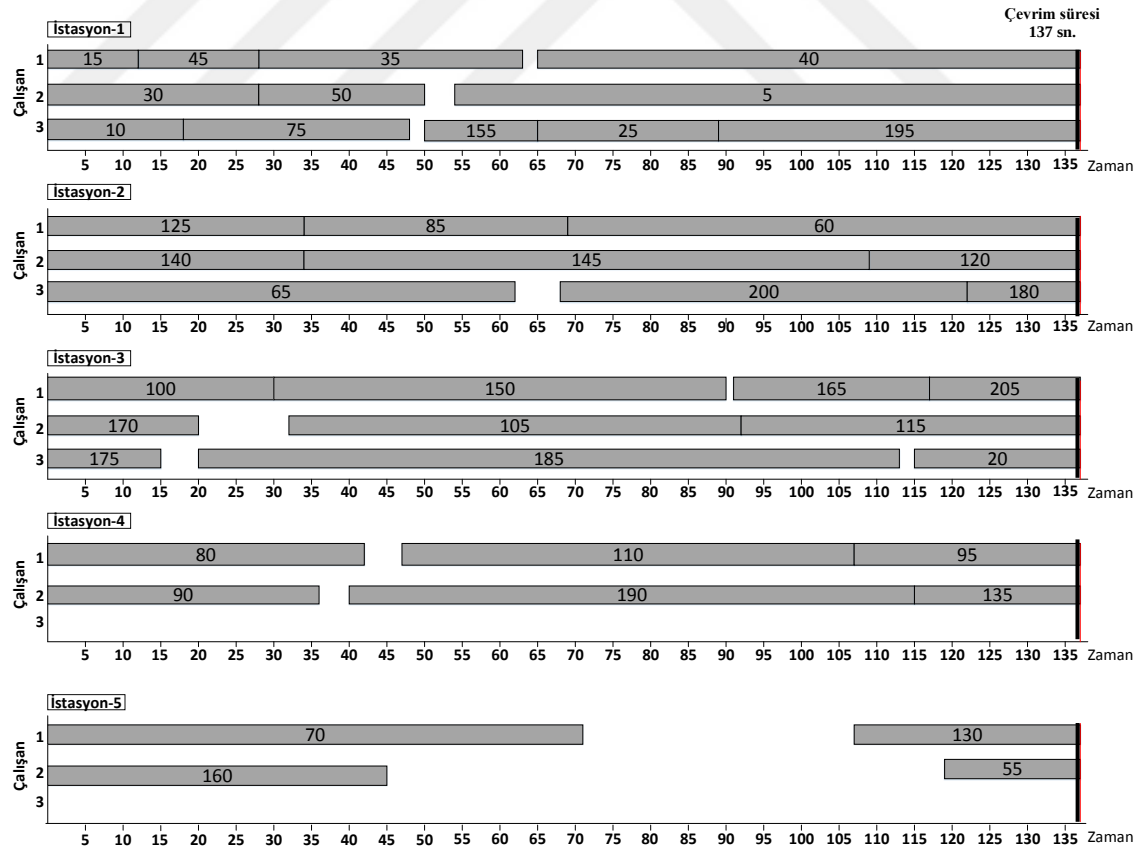


Şekil 7.3.1 : Çamaşır makinesi demontaj hattı teknolojik öncelik diyagramı.

Örneğin; 15 numaralı iş {20, 25, 155, 190} işlerinin öncelik kümesini oluşturur. Bu küme içerisinde herhangi bir işin yapılabilmesi için 15 numaralı işin yapılması yeterli ve/ya gereklidir. 65 numaralı işin yapılabilmesi için öncelik kümesini oluşturan 40, 45, 50 ve 75 numaralı işlerin tümünün yapılması gereklidir. 115 numaralı işin yapılabilmesi için 120. veya 130. işlerden herhangi birinin yapılması yeterlidir.

Modelde çevrim süresi (CT) 137 sn olarak kabul edilmiştir. Bu durumda açılacak istasyona atanan işlerin süreleri toplamı çevrim süresi olan 137 saniyeye eşit ya da daha az olmalıdır. Ürün büyüklüğü ve taşıma aktivitelerine göre her bir istasyonda çalışacak maksimum çalışan sayısı (KMAX) ise 3 olarak belirlenmiştir.

Karmaşık tamsayılı doğrusal programlama modeli sonuçlarına göre 13 çalışan 5 istasyonda -ilk 3 istasyonda 3 kişilik ve diğer istasyonlarda ise 2 kişilik olacak şekilde- takım oluşturularak tüm işleri gerçekleştirmişlerdir. Açılan her bir istasyon için hazırlanan ve her bir istasyonda çalışanlara atanan iş öğelerini gösterir gantt şemaları Şekil 7.3.2’de gösterilmiştir. Klasik demontaj hattı tasarımına kıyasla birden fazla çalışanın takım içerisinde çalışıyor ve işleri yapıyor olması sayesinde süre, alan ve kalite yönünden avantajlar sağlanmıştır.



Şekil 7.3.2 : Önerilen yaklaşım sonuçlarına ilişkin gantt şeması.

1. istasyonda 3 çalışan bulunmakla birlikte 1 no'lu çalışana sırasıyla 15, 45, 35, ve 40 numaralı işler atanmıştır. 1. istasyondaki her bir çalışana ilk olarak atanan 15, 30 ve 10 numaralı işlerin öncelik iş öğeleri bulunmadığından başlangıç anında atanabilmiştir. 1. istasyonda çevrim süresi ve öncelik kısıtı dahilinde atanabilecek başka iş öğesi kalmadığından 2. istasyon açılmıştır. Bu süreç tüm iş öğelerinin atanmasına kadar bu şekilde devam etmiştir.

Ayrıca, önerilen takım çalışması esaslı yaklaşım ile her bir istasyona bir çalışanın atandığı klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü karşılaştırılmıştır.

Klasik demontaj hattı dengeleme probleminde 13 çalışan için 13 istasyon açılmıştır ve her bir istasyona atanan işler Çizelge 7.3.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.3.2 : Klasik demontaj hattı dengeleme problemi atamaları.**

| Çalışan | Demontaj iş öğeleri      | Toplam Süre (sn.) |
|---------|--------------------------|-------------------|
| 1       | 10, 25, 45, 75, 100, 180 | 133               |
| 2       | 5, 30, 50                | 133               |
| 3       | 15, 35, 55, 140, 170     | 119               |
| 4       | 40, 90, 120              | 136               |
| 5       | 60, 65                   | 130               |
| 6       | 160, 190                 | 120               |
| 7       | 20, 105, 155, 165        | 123               |
| 8       | 85, 115, 125, 135        | 136               |
| 9       | 70, 200                  | 125               |
| 10      | 80, 95, 175, 195         | 135               |
| 11      | 130, 185                 | 123               |
| 12      | 110, 150                 | 120               |
| 13      | 145, 205                 | 95                |

Takım çalışması esaslı demontaj hattı ile klasik demontaj hattı tasarımı kapsamında çalışan sayısı ve istasyon sayısı bakımından aşağıdaki kriterler ile karşılaştırılmıştır.

Bu kavramlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

*Alan kullanım faktörü (Space utilization factor - SUF):* Klasik istasyonlara göre takım çalışması esaslı istasyonlar ile göreceli alan tasarrufu değerlendirmesinin göstergesidir. (Dimitriadis, 2006) ve formülü aşağıda yer almaktadır.

$$SUF(\%) = \frac{\text{istasyon sayısı}}{\text{çalışan sayısı}} * 100 \quad (21)$$

*Demontaj teslim süresi:* İlk istasyona giriş süresi ile son istasyondan çıkış süresi arasındaki zaman aralığıdır. Bir başka ifade ile ilk işlemin başlangıç süresi ile son işlemin bitiş zamanı arasında geçen zamanı veren süredir.

*Kullanım oranı:* Bu ölçü, bir istasyonun demontaj yaptığı zamanın toplam süreye oranıdır. Bir başka ifade ile istasyonda toplam sürenin ne kadarının işlem ile geçtiğini gösteren bir orandır.

Ardından bu iki model sonuçları karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonuçları Çizelge 7.3.3’de gösterilmiştir.

Arena 11.0’de hem önerilen yaklaşım hem de klasik hat tasarımı için demontaj teslim süresi ve kullanım oranı değerlerini elde etmek için bir simülasyon yapılmıştır. Demontaj hattı dengelemesi ile belirlenen her istasyon süresi ( $0.9 \times$  istasyon süresi; istasyon süresi;  $1.1 \times$  istasyon süresi) parametreleriyle üçgen dağılımına dönüştürülmüştür. Örneğin bir istasyonda iş sürelerinin toplamı 100 sn. ise bu süre üçgen dağılıma dönüştürülerek 90 ve 110 sn. ile simüle edilmiştir. Çoğaltma uzunluğu ve çoğaltma sayısı sırasıyla 250 gün (8 saat/gün) ve 300’dir. Kümülatif-Ortalama Kuralı (Banks ve diğ., 2001; Bause ve Eickhoff, 2003) ortalama sökme süresine göre 1,4 saat olarak tespit edilen ısınma süresi belirlenmiştir.

**Çizelge 7.3.3 : Çamaşır makinesi demontajı sonuçlarının karşılaştırılması.**

| <b>Performans Ölçümü</b>            | <b>Önerilen Yaklaşım</b> | <b>Klasik Hat Tasarımı</b> | <b>Mevcut Durum Demontaj Hattı</b> |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Çalışan sayısı                      | 13                       | 13                         | 13                                 |
| İstasyon sayısı                     | 5                        | 13                         | 8                                  |
| İstasyondaki çalışan sayısı         | 3-3-3-2-2                | Her istasyonda 1           | 3-2-2-1                            |
| Alan kullanım faktörü               | %39                      | %100                       | %61,5                              |
| Ortalama demontaj temin süresi (sn) | 922                      | 1768                       | 1250                               |
| Çevrim süresi (sn)                  | 137                      | 137                        | 125                                |
| Ortalama kullanım oranı (%)         | 94                       | 93                         | 93                                 |

Her iki yöntemde de 13 çalışan ile tüm işler tamamlanmıştır. Mevcut durumda da demontaj hattında 13 çalışan ile işler gerçekleştirilmektedir. Takım çalışması esaslı demontaj hattında 5 istasyon açılmasına gerek duyulmuş iken klasik hat dengeleme için 13 istasyon açılmıştır. Gerçek demontaj hattında ise 8 istasyonda işler yerine getirilmektedir.

Önerilen yaklaşım, klasik hat tasarımına kıyasla %47,9 daha kısa ortalama demontaj temin süresi vermiştir. %26 oranında ise gerçek demontaj hatlarına göre daha kısa süreli demontaj işlemi gerçekleşmiştir. Çünkü ürünler, önerilen sökme yaklaşımında istasyonlar arasında daha az tıkanma süresine maruz kalmaktadır. Ayrıca, çok sayıda işçilik, büyük ölçüde azaltılmış iş istasyonları nedeniyle önerilen yöntem ile klasik

hat tasarımına göre %61 oranında, mevcut duruma göre ise %22,5 oranında alan kullanım tasarrufu sağlanabilmektedir. Ortalama kullanım oranı faktörüne bakıldığında ise tüm durumlarda yüksek kullanım oranı sağlandığı gözlenmiştir.

#### **7.4 Bulaşık Makinesi Ürünü İçin Geliştirilen Modelin Uygulanması**

Uygulama kapsamında şirket AEEE tesislerinde bulaşık makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi için çözüm geliştirilmiştir.

Bulaşık makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme problemi için GAMS-CPLEX programı geliştirilmiştir. Beşinci bölümde yer alan matematiksel model bu yazılım programında kodlanmıştır. Hesaplamalar Intel(R) Core(TM) i7 CPU (3.20 GHz/8 GB RAM) işlemcisine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Hesaplama süresi 86400 sn olarak sınırlandırılmıştır.

Bu yazılımda, çevrim süresi, bir istasyonda çalışabilecek maksimum işgören sayısı, iş sayısı, işlerin tamamlanma süresi, işlerin öncelikleri gibi parametreleri için kullanıcı tarafından bilgiler girilmekte ve değiştirilebilmektedir. Bulaşık makinesi takım çalışması esaslı demontaj hattı tasarımı probleminin çözümü için çalışan sayısını ve ardından bulunan optimum çalışan sayısına göre açılan istasyon sayısını minimize eden GAMS yazılım programında geliştirilen matematiksel model Ek B’de yer almaktadır. Ayrıca, önerilen takım çalışması esaslı yaklaşım ile her bir istasyona bir çalışanın atandığı klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü ve gerçek üretim tesisi mevcut durum ile karşılaştırılmıştır.

Klasik demontaj hattı dengeleme problemini elde etmek için KTDP modele çamaşır makinesi modelinde olduğu gibi 20 no’lu kısıt eklemiştir. Eklenen bu kısıt ile klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü için geliştirilen matematiksel modelde ve GAMS yazılım programında değişikliğin yer aldığı kısım Ek B’de yer almaktadır. Bulaşık makinesi demontaj sürecinde 44 iş ögesi bulunmaktadır. Bulaşık makinesi demontaj hattı için de çamaşır makinesinde olduğu gibi aynı model çalıştırılarak yalnızca iş öğeleri, işlem süreleri ve öncelik ilişkileri değiştirilmiştir. Model hem önerilen yaklaşım hem de klasik hat dengeleme modeli olarak çözümlenmiştir.

Bulaşık makinesi özelinde demontaj iş öğeleri, süreleri ve öncelikli iş(ler) bilgisi Çizelge 7.4.1’de yer almaktadır.

**Çizelge 7.4.1 : Bulaşık makinesi demontaj işlemleri.**

| No | Demontaj İş Ögesi                                   | Süre (sn.) | Öncelik iş ögesi (leri) | No | Demontaj İş Ögesi                                                                       | Süre (sn.) | Öncelik iş ögesi (leri)                           |
|----|-----------------------------------------------------|------------|-------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------|
| 1  | Üst kapağın sökülmesi ve ana gövdeden yalıtımı      | 12         | -                       | 23 | Kontrol panelin sökülmesi                                                               | 9          | 21                                                |
| 2  | Sağ panelin sökülmesi ve yalıtımı                   | 19         | And (1, 4)              | 24 | Kontrol ünitesinin sökülmesi                                                            | 12         | 23                                                |
| 3  | Sol panelin sökülmesi ve yalıtımı                   | 19         | And (1, 4)              | 25 | Deterjan ve durulama yardımcı dağıtıcısının sökülmesi                                   | 22         | 21                                                |
| 4  | Ön-alt erişim panelinin çıkarılması                 | 23         | -                       | 26 | Yaylar ve menteşe kolları arasında kapı yayı ve halat kasnak mekanizmasının çıkarılması | 22         | And (2, 3)                                        |
| 5  | Arka alt panelin çıkarılması                        | 11         | And (2, 3)              | 27 | İç kapı panelinin kasadan sökülmesi                                                     | 22         | And (21, 26)                                      |
| 6  | Gümüş sepetlerin çıkarılması                        | 5          | -                       | 28 | Küvet sökülmesi                                                                         | 39         | And (2, 3, 27, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18) |
| 7  | Alt raf ve alt kaydırma kolu kapağının çıkarılması  | 9          | 6                       | 29 | Kablo demetinin çıkarılması                                                             | 33         | And (24, 28)                                      |
| 8  | Üst raf ve üst kaydırma kolu kapağının çıkarılması  | 8          | -                       | 30 | Üfleyicinin sökülmesi                                                                   | 27         | 4                                                 |
| 9  | Üst raf kızağının sökülmesi                         | 7          | 8                       | 31 | Isıtma elemanının çıkarılması                                                           | 29         | 28                                                |
| 10 | Alt raf kızağının sökülmesi                         | 7          | 7                       | 32 | Boşaltma hortumunun çıkarılması                                                         | 6          | And (3, 4)                                        |
| 11 | Sürgü destek tekerleklerinin sökülmesi              | 18         | And (2, 3)              | 33 | Boşaltma pompasının karterden ayrılması                                                 | 18         | 4                                                 |
| 12 | Orta raf kolunun üst raftan ayrılması               | 6          | 8                       | 34 | Isıtma elemanından motor ve sirkülasyon pompasının sökülmesi                            | 16         | 28                                                |
| 13 | Üst sprej kolu ve su giriş yeri kapağını çıkarma    | 16         | And (15, 8)             | 35 | Buğu sensörünün çıkarılması                                                             | 14         | 4                                                 |
| 14 | Alt sprej kolunun sökülmesi                         | 7          | 7                       | 36 | Karter mühürünün sökülmesi                                                              | 6          | 28                                                |
| 15 | Filtrelerin ayrılması                               | 14         | 7                       | 37 | Karterin çıkarılması                                                                    | 34         | 36                                                |
| 16 | Tuz kutusu kapağının çıkarılması                    | 6          | 7                       | 38 | Giriş hattından valfin ayrılması                                                        | 7          | Or (39, 41)                                       |
| 17 | Rejenerasyon rezervuar kapağının küvetten ayrılması | 7          | 8                       | 39 | Giriş valfinin ayrılması                                                                | 10         | Or (5, 28)                                        |

|    |                            |   |   |    |                             |   |   |
|----|----------------------------|---|---|----|-----------------------------|---|---|
| 18 | Şamandıra valfin sökülmesi | 8 | 7 | 40 | Su debimetresinin ayrılması | 8 | 3 |
|----|----------------------------|---|---|----|-----------------------------|---|---|

**Çizelge 7.4.1 (devam) : Bulaşık makinesi demontaj işlemleri.**

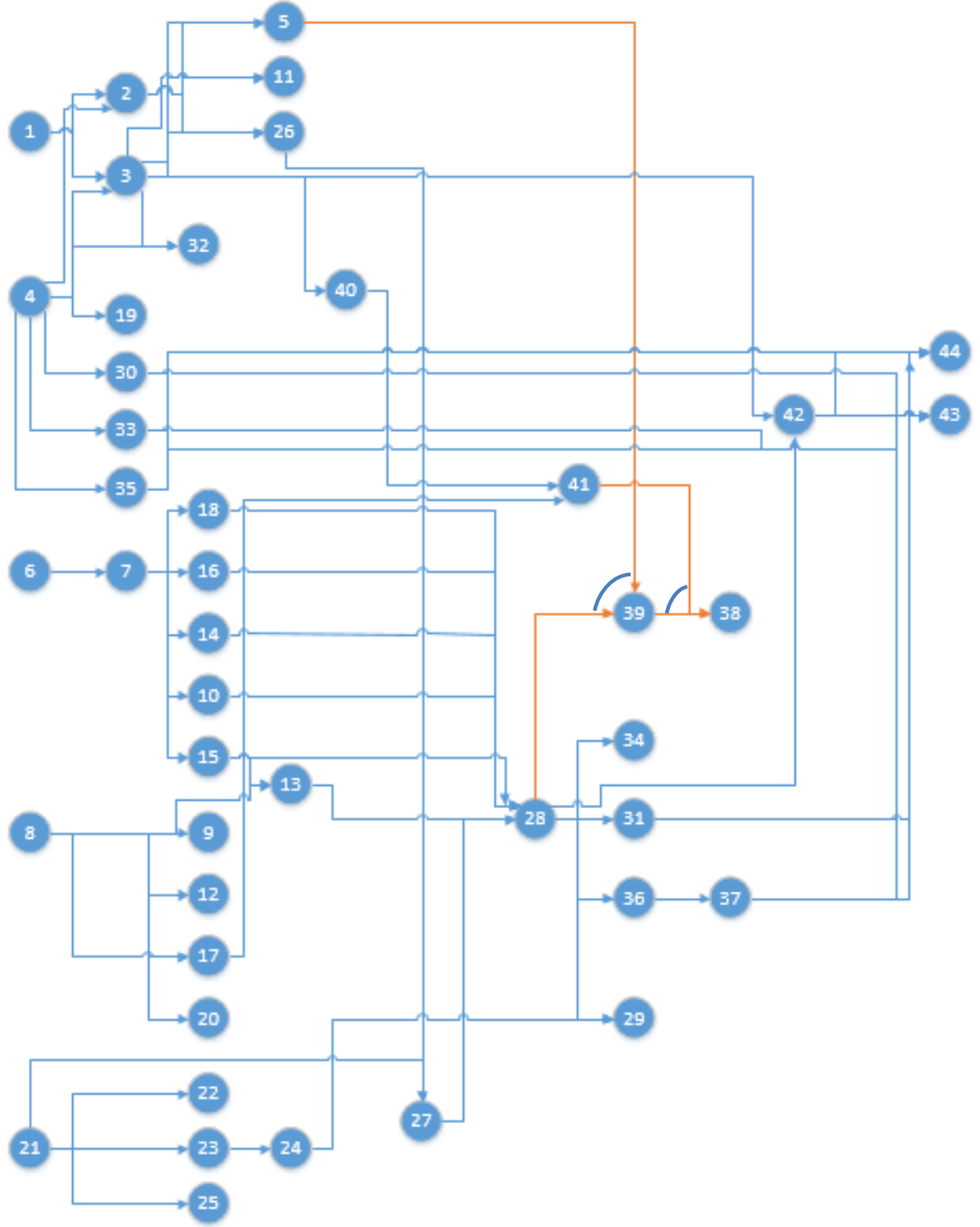
| No | Demontaj İş Ögesi              | Süre (sn.) | Öncelik iş ögesi (leri) | No | Demontaj İş Ögesi                                        | Süre (sn.) | Öncelik iş ögesi (leri)      |
|----|--------------------------------|------------|-------------------------|----|----------------------------------------------------------|------------|------------------------------|
| 19 | Şamandıra şalterinin sökülmesi | 14         | 4                       | 41 | Rejenerasyon haznesinin sökülmesi (su cebi ve hava cebi) | 12         | And (17, 40)                 |
| 20 | Kapı contasının çıkarılması    | 13         | 8                       | 42 | Tuz kutusunun çıkarılması                                | 14         | And (3, 28)                  |
| 21 | Dış kapının sökülmesi          | 30         | -                       | 43 | Ana plastik panelin sökülmesi                            | 11         | And (30, 31, 33, 35, 37, 42) |
| 22 | Kapı mandalının sökülmesi      | 12         | 21                      | 44 | Tesviye ayaklarının çıkarılması                          | 12         | And (30, 31, 33, 35, 37, 42) |

1 numaralı “Üst kapağın sökülmesi ve ana gövdeden yalıtımı” iş ögesinin öncelikli iş ögesi bulunmamaktadır; yani bu işin yapılması için herhangi bir işin yapılması/tamamlanması gerekmemektedir. 11 numaralı iş ögesi olan “Sürgü destek tekerleklerinin sökülmesi”nin yapılabilmesi için öncelikli işleri olan “Sağ panelin sökülmesi ve yalıtımı” ile “Sol panelin sökülmesi ve yalıtımı”nın yapılması gerekli ve zorunludur. 39 numaralı “Giriş valfinin ayrılması” iş ögesinin yapılabilmesi için “Arka alt panelin çıkarılması” ve “Küvet sökülmesi” iş ögelerinden en az birinin yapılmış olması yeterlidir. Bulaşık makinesi demontaj süreci 43 numaralı iş ögesi olan “Ana plastik panelin sökülmesi” ile 44 numaralı “Tesviye ayaklarının çıkarılması” iş ögelerinin yapılması ardından süreç tamamlanır. Bulaşık makinesi demontaj hattında 44 iş ögesi bulunmaktadır.

Örneğin; 5 numaralı iş {1, 4, 2, 3} işlerinin öncelik kümesini oluşturur. 5 numaralı işin yapılabilmesi için 1, 4, 2 ve 3 numaralı işlerin tümünün yapılması gereklidir. 38 numaralı işin yapılabilmesi için 39. veya 41. işlerden birinin yapılması yeterlidir. Modelde çevrim süresi (CT) 80 sn. olarak kabul edilmiştir. Bu durumda açılacak istasyona atanan işlerin süreleri toplamı çevrim süresi olan 80 saniyeye eşit ya da daha az olmalıdır. Ürün büyüklüğü ve taşıma aktivitelerine göre her bir istasyonda çalışacak maksimum çalışan sayısı (KMAX) ise 3 olarak belirlenmiştir.

Karmaşık tamsayılı doğrusal programlama modeli sonuçlarına göre 9 çalışan 3 istasyonda –tüm istasyonlarda 3’er çalışan olacak şekilde- takım oluşturarak tüm işleri gerçekleştirmişlerdir.

Bu iş öğeleri arasındaki öncelik ilişkisini gösterir teknolojik öncelik diyagramı Şekil 7.4.1’de gösterilmiştir.

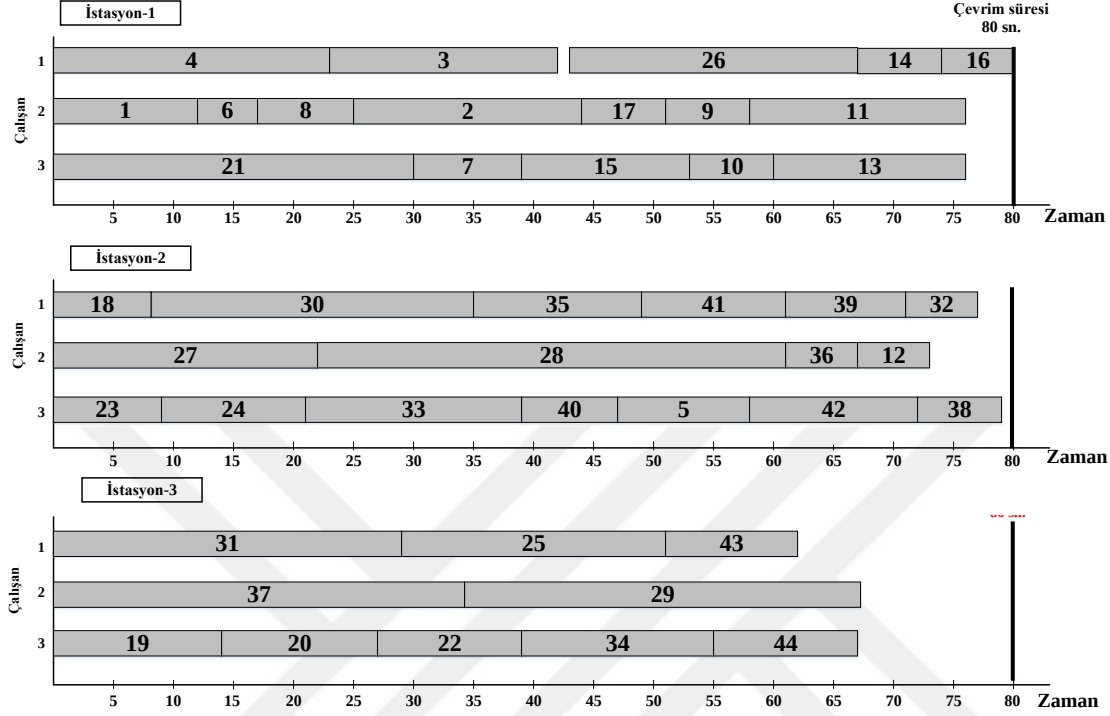


**Şekil 7.4.1 :** Bulaşık makinesi demontaj hattı teknolojik öncelik diyagramı.

Şekil 7.4.1’de yer alan teknolojik öncelik diyagramında yer aldığı gibi 1., 4., 6., 8. ve 21. iş öğelerinin öncesinde herhangi bir iş öğesi bulunmamaktadır. O halde bu iş öğelerinin atanması konusunda öncelik ilişkileri bakımından öncesinde herhangi bir iş öğesinin yapılması gerekli değildir. Bu iş öğeleri açılan istasyona ilk atanacak iş öğelerinden biri olacaktır. Son olarak da 43. ve 44. iş öğelerinin yapılması ile süreç

tamamlanmış olur ve bulaşık makinesi ürünü için demontaj işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Açılan her bir istasyon için hazırlanan gantt şemaları Şekil 7.4.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 7.4.2 : Önerilen yaklaşım sonuçlarına ilişkin gantt şeması.**

1. istasyonda 3 çalışan bulunmakla birlikte 1 no’lu çalışana sırasıyla 4, 3, 26, 14 ve 16 numaralı işler atanmıştır. 1. istasyondaki her bir çalışana ilk olarak atanan 4, 1, 21 numaralı işlerin öncelik iş öğeleri bulunmadığından başlangıç anında atanabilmektedir.

1. istasyonda çevrim süresi ve öncelik kısıtı dahilinde atanabilecek başka uygun iş öğesi kalmadığından 2. istasyon açılmıştır. *KMAX* değeri üçe eşit olduğundan her bir istasyonda maksimum çalışan sayısı kadar çalışana öncelik ve çevrim süresi kısıtlarını sağlayan iş öğelerinin ataması gerçekleştirilir. Bu süreç tüm iş öğelerinin atanmasına kadar bu şekilde devam etmiştir.

Ayrıca, önerilen takım çalışması esaslı yaklaşım ile her bir istasyona bir çalışanın atandığı klasik demontaj hattı dengeleme problemi çözümü ve mevcut durum demontaj hattı ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın klasik hat yapısı ile mevcut hat yapısının karşılaştırılması başarılı sonuçların alındığını göstermesi bakımından faydalı olmuştur.

Klasik demontaj hattı dengeleme probleminde 9 çalışana ve açılan 9 istasyona iş öğeleri atanmıştır ve atanan demontaj iş öğeleri ve her bir istasyondaki toplam süre (saniye) Çizelge 7.4.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.4.2 : Klasik demontaj hattı dengeleme problemi atamaları.**

| Çalışan | Demontaj iş öğeleri       | Toplam süre (sn) |
|---------|---------------------------|------------------|
| 1       | 4, 6, 7, 8, 10, 35        | 66               |
| 2       | 1, 2, 3, 15, 40           | 72               |
| 3       | 5, 12, 14, 26, 33, 39     | 74               |
| 4       | 9, 11, 13, 17, 20, 38, 41 | 80               |
| 5       | 18, 21, 23, 27            | 69               |
| 6       | 16, 19, 22, 24, 30        | 71               |
| 7       | 28, 34, 36, 42            | 75               |
| 8       | 29, 37                    | 67               |
| 9       | 25, 31, 32, 43, 44        | 80               |

Bu iki model sonuçları karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonuçları Çizelge 7.4.3’de gösterilmiştir. Arena 11.0’de hem önerilen yaklaşım hem de klasik hat tasarımı için demontaj teslim süresi ve kullanım oranı değerlerini elde etmek için bir simülasyon yapılmıştır. Demontaj hattı dengelemesi ile belirlenen her istasyon süresi ( $0.9 \times \text{istasyon süresi}$ ; istasyon süresi;  $1.1 \times \text{istasyon süresi}$ ) parametreleriyle üçgen dağılımına dönüştürülmüştür. Örneğin bir istasyonda iş sürelerinin toplamı 100 sn ise bu süre üçgen dağılıma dönüştürülerek 90 ve 110 sn ile simüle edilmiştir. Çoğaltma uzunluğu ve çoğaltma sayısı sırasıyla 250 gün (8 saat/gün) ve 300’dir. Kümülatif-Ortalama Kuralı (Banks ve diğ., 2001; Bause ve Eickhoff, 2003) ortalama sökme süresine göre 1,4 saat olarak tespit edilen ısınma süresi belirlenmiştir.

**Çizelge 7.4.3 : Bulaşık makinesi demontajı sonuçlarının karşılaştırılması.**

| Performans Ölçümü                    | Önerilen Yaklaşım | Klasik Hat Tasarımı | Mevcut Durum Demontaj Hattı |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| Çalışan sayısı                       | 9                 | 9                   | 9                           |
| İstasyon sayısı                      | 3                 | 9                   | 6                           |
| İstasyondaki çalışan sayısı          | 3-3-3             | Her istasyonda 1    | 2-2-2-1-1-1                 |
| Alan kullanım faktörü                | %33,3             | %100                | %66,7                       |
| Ortalama demontaj temin süresi (sn.) | 249               | 1263                | 453                         |
| Hat uzunluğu (m)                     | 11,1              | 27,9                | 22,2                        |
| Alan gereksinimi (m <sup>2</sup> )   | 41,1              | 86,5                | 58,7                        |
| Çevrim süresi (sn.)                  | 80                | 80                  | 75                          |
| Ortalama kullanım oranı (%)          | 94                | 95                  | 94                          |

Klasik demontaj hattı tasarımına kıyasla birden fazla çalışanın takım içerisinde çalışıyor ve işleri yapıyor olması sayesinde süre, alan ve kalite yönünden avantajlar sağlanmıştır. Her iki yöntemde de 9 çalışan ile tüm işler tamamlanmıştır. Mevcut durum demontaj hattında da 9 çalışan bulunmaktadır. Takım çalışması esaslı demontaj hattında 3 istasyon açılmasına gerek duyulmuş iken klasik hat dengeleme için her çalışan bir istasyona atanacak şekilde 9 istasyon açılmış, mevcut durumda ise 6 istasyon açılarak işler tamamlanabilmektedir. Ortalama demontaj temin süresinin takım esaslı çalışmada klasik hat tasarımına göre %80,9 mevcut duruma göre ise %55 oranında kısaldığı görülmektedir. Ayrıca, çok sayıda işçilik, büyük ölçüde azaltılmış iş istasyonları nedeniyle önerilen yöntem ile %66,7 oranında alan kullanım tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu oran mevcut durum hat tasarımına göre ise %33,4 daha iyidir. Mevcut durumda olduğu gibi her iki yöntemde de yüksek kullanım oranı sağlanmıştır. Bununla birlikte, takım çalışması esaslı istasyonların kullanılmasıyla hat uzunluğundaki (%60,2) ve alan gereksinimindeki (%52,5) azalma için düşük oranlar gözlenmiştir. Bu sonucun altında yatan sebep olarak, takım çalışması esaslı iş istasyonlarının, birden fazla işçinin aynı istasyonda çalışıyor olması nedeniyle %30,2 daha büyük alan (takım çalışması esaslı istasyon: 13,7 m<sup>2</sup>, tek çalışanlı istasyon: 9,6 m<sup>2</sup>) ihtiyaç duyması gösterilebilir.

Takım çalışması esaslı ve klasik istasyonların her ikisi de yüksek düzeyde ortalama kullanım oranları vermiştir. Tek çalışan istasyon konfigürasyonu için, ilk dört ardışık istasyon (istasyon 1, 2, 3, 4) için sökme görev zamanlarının toplamında artış eğilimi vardır. Ardından, 5-6-7 istasyonlarında aynı eğilim görülmektedir. Bu nedenle, çalışanların çoğunda bekleme süreleri yoktur (istasyonlar 1-2-3-4-9) veya nominaldir (istasyonlar 6-7). Tersine, ardışık takım çalışması esaslı istasyonlardaki iş yükleri azalan bir eğilimdedir. Bu nedenle, çok istasyonlu sökme hattında, özellikle istasyon 3'te dikkate alınacak bekleme süreleri gözlemlendi. Sonuç olarak, tek çalışan istasyon tasarımı, çok insanlı istasyon tasarımına kıyasla biraz daha yüksek kullanım oranı vermiştir.

Modelin sağlamlığını test etmek için, sökme görevlerindeki varyasyonlar farklı seviyelerde göz önünde bulundurulmuştur. Test aşamasında en başarılı bulunan sezgisel yöntem olan MMDLBH-I ile konum ağırlıklandırmanın entegre edildiği yöntem kullanılmıştır.

Her bir  $\beta$  değeri için otuz görev zamanı üretilmiştir. Görev zamanları aşağıdaki formülle değiştirilmiştir.

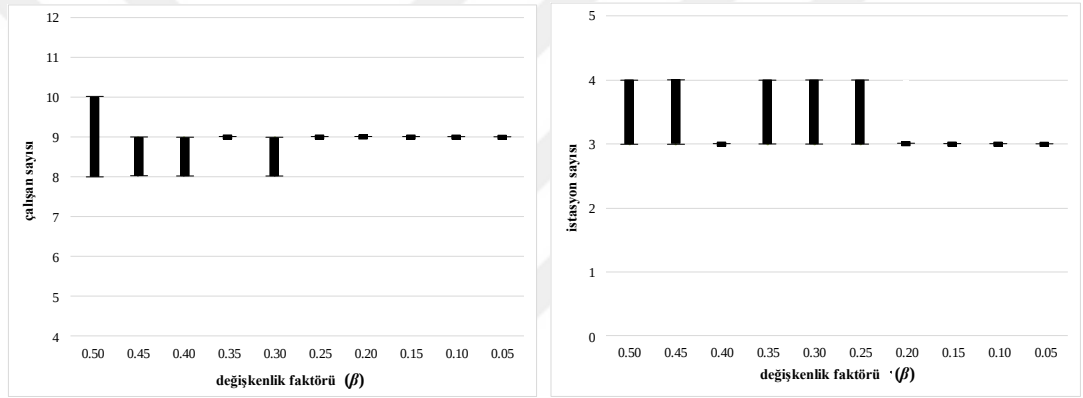
$$t'_{i\beta} = t_i * RN_{i\beta} \quad (1-\beta) \leq RN_{i\beta} \leq (1+\beta) \quad i=1, \dots, NTAD \quad (22)$$

$\beta$ : değişkenlik faktörü

$t'_{i\beta}$ : değişkenlik faktörü  $\beta$  için sökme görevinin değiştirilme zamanı

$RN_{i\beta}$ : değişkenlik faktörü  $\beta$  ile iş ögesi  $i$  süresi için rasgele sayı

Örneğin, değişkenlik faktörünün 0,3 olduğu varsayıldığında, Çizelge 7.4.1'de verilen sökme süreleri [0,7; 1,3] aralığında yer alan rasgele sayılar ile çarpılmıştır. Şekil 7.4.3, her bir  $\beta$  değeri için çözüm aralığını göstermektedir.



**Şekil 7.4.3 :** Farklı zaman değişkenlik faktörü değerlerinin sonuçları.

Hem işçi hem de istasyon sayısı için sıkı aralıklar gözlenmiştir. Bununla birlikte, zaman değişkenliğinin kötüleşen etkisi, en yüksek değişkenlik faktörü değeri hariç, çalışanların sayısına yansımamıştır. Bu sayı, istasyon sayısı için biraz farklı olmuştur. Bunun yanında, aralık sayısı, çalışan sayısı için istasyon sayısına kıyasla daha erken sabit değerler haline gelmiştir. Sonuç olarak, yukarıda bahsedilen sonuçlar, modelin sağlamlığını göstermektedir.



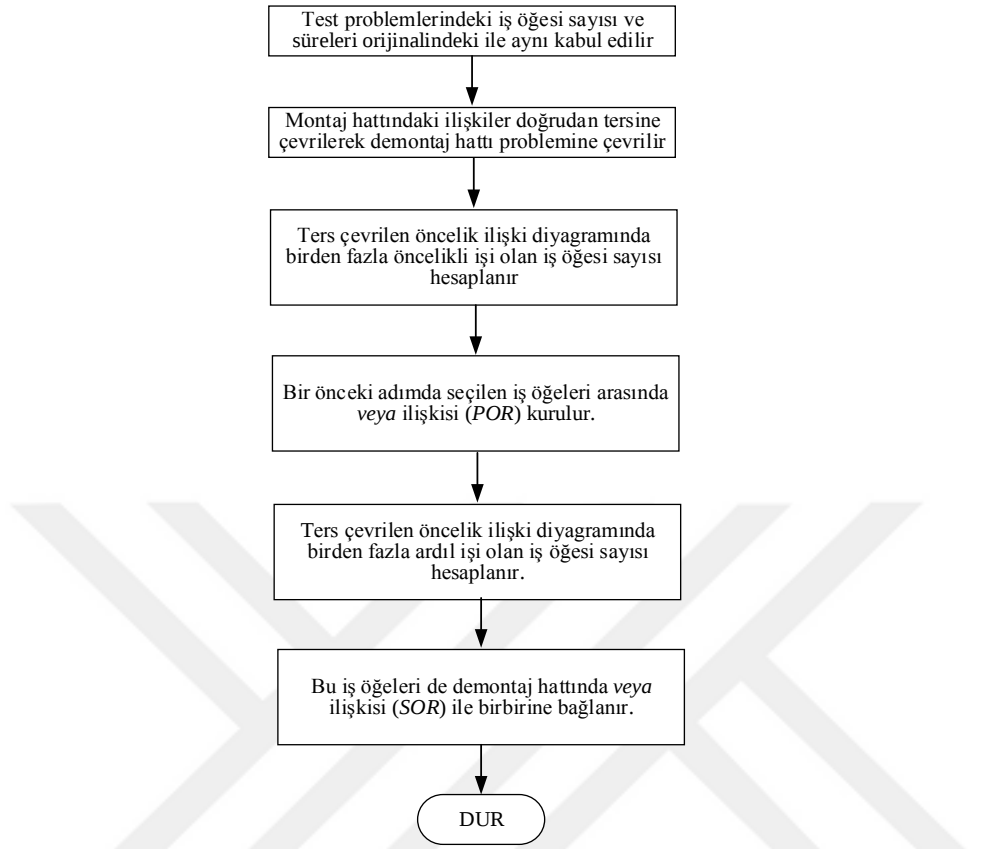
## 8. HESAPLAMA ANALİZİ

Tez kapsamında geliştirilen KTDP yaklaşımı ve sezgiseller ayrıca Otto ve Scholl (2013) tarafından yayınlanan karşılaştırmalı problem veri seti üzerinde test edilmiştir. Test problemi datalarına URL-2'deki linkten ulaşılabilir. Test datadan, küçük (iş ögesi sayısı=20), orta (iş ögesi sayısı=50) ve büyük (iş ögesi sayısı=100) ölçekli problem tipleri için 50'şer problem rastgele seçilmiştir. Toplamda 150 test problemi üzerinde modelin performansı analiz edilebilmiştir. Bahsi geçen veri, montaj hattı dengeleme problemi test dataları olduğundan öncelikle yapı demontaj hattı dengeleme problemine dönüştürülmüştür.

Montaj hattındaki iş öğelerini demontaj hattı sürecine çevirirken iş öğeleri ve işlem sürelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Doğrudan montaj hattı iş öğelerini tersine çevirerek işlem başlatılmıştır.

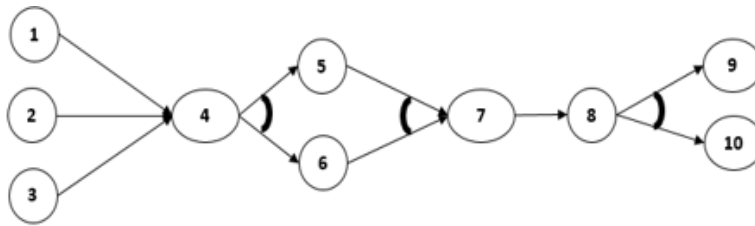
Test problemlerindeki iş ögesi sayısı ve süreleri orijinalindeki ile aynı alınmıştır. Montaj hattındaki ilişkiler doğrudan tersine çevrilerek demontaj hattı problemine çevrilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle ters çevrilen öncelik ilişki diyagramında birden fazla öncelikli işi olan iş ögesi sayısı hesaplanır. Bir önceki adımda seçilen iş öğeleri arasında veya ilişkisi (*POR*) kurulur. Ardından ters çevrilen öncelik ilişki diyagramında birden fazla ardıl işi olan iş ögesi sayısı hesaplanır. Bu iş öğeleri de demontaj hattında veya ilişkisi (*SOR*) ile birbirine bağlanır. Böylelikle, süreç tamamlanmış olur.

Montaj hattı dengeleme probleminin demontaj hattı problemine dönüştürülme sistematığıne ilişkin algoritma adımları Şekil 8.1’de gösterilmiştir.

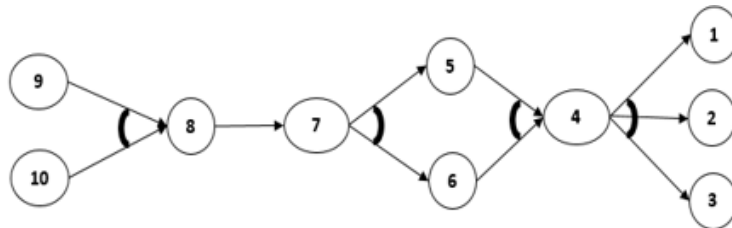


**Şekil 8.1 :** Önerilen montaj-demontaj sistemi dönüştürme algoritması.

Örneğin; montaj hattı dengeleme problemi iş ögeleri öncelik ilişkilerinin Şekil 8.2’deki gibi olduğunu varsayalım. Bu ilişkinin demontaj hattı dengeleme problemine dönüştürülmüş öncelik ilişkileri de Şekil 8.3’de yer almaktadır.



**Şekil 8.2 :** Montaj hattı dengeleme problemi teknolojik öncelik diyagramı.



**Şekil 8.3 :** Demontaj hattı dengeleme problemi öncelik teknolojik diyagramı.

Şekil 8.2’den görüldüğü gibi 4 numaralı işin kendinden önce üç iş ögesi bulunmaktadır ve demontaj hattına çevrildiğinde ise bu iş ögeleri arasında SOR ilişkisi kurulmuştur. 4. iş ögesi ile 5. ve 6. iş ögeleri arasındaki montaj hattındaki SOR ilişkisi demontaj hattında POR ilişkisine çevrilmiştir.

Tez çalışması kapsamında MMDLBH-I ve MMDLBH-II olarak iki farklı sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntemler için değişik kombinasyonlar üretilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki sezgisel yöntem de maksimum konum ağırlığı ve maksimum takip eden iş ögesi sayısı seçim kriterlerine göre yazılım programında test edilmiş ve sonuçları analiz edilmiştir. Geliştirilen bu sezgisel yöntemler Çizelge 8.1’de yer almaktadır.

**Çizelge 8.1 : Sezgisel yöntemlerin karşılaştırılması.**

| Sezgisel Yöntem | Algoritma | İş Ögesi Seçim Kuralı             |
|-----------------|-----------|-----------------------------------|
| MMDLBH-I_pos    | MMDLBH-I  | Maksimum konum ağırlığı           |
| MMDLBH-I_suc    | MMDLBH-I  | Maksimum takip eden iş öge sayısı |
| MMDLBH-II_pos   | MMDLBH-II | Maksimum konum ağırlığı           |
| MMDLBH-II_suc   | MMDLBH-II | Maksimum takip eden iş öge sayısı |

Test dataların çözümü için geliştirilen sezgisel yöntemler MATLAB yazılım programında kodlanmıştır. Tez kapsamında geliştirilen MATLAB kodu Ek C’de yer almaktadır. Hesaplamalar Intel(R) Core(TM) i7 CPU (3.20 GHz/8 GB RAM) işlemcisine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. 150 test datasına ait analiz sonuçları Ek D’de yer almaktadır. Hesaplama süresi 7200 sn olarak sınırlandırılmıştır. Her bir istasyonda çalışacak maksimum işçi sayısı (*KMAX*) değeri ve  $\alpha$  eşik değeri 3 ve %5 olarak belirlenmiştir. Tablodaki “test problemi” sütunundaki “dis-X” ifadesi X montaj probleminin demontaj problemine dönüştürülmüş olduğunu ifade etmektedir. Tabloda yer alan çalışan sayısı alt sınır değeri (*LBW*) ile istasyon sayısı alt sınır değeri (*LBS*) ve bunların alt sınırdan sapmaları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır. *LBW*, (23). formülde yer aldığı gibi iş süreleri toplamının çevrim süresine oranı ile elde edilen en yakın pozitif sayı değerine eşit olur. (24). formülde yer aldığı gibi, *LBS* ise *LBW* değerinin *KMAX* değerine oranı ile elde edilen en yakın pozitif değere eşit olur.

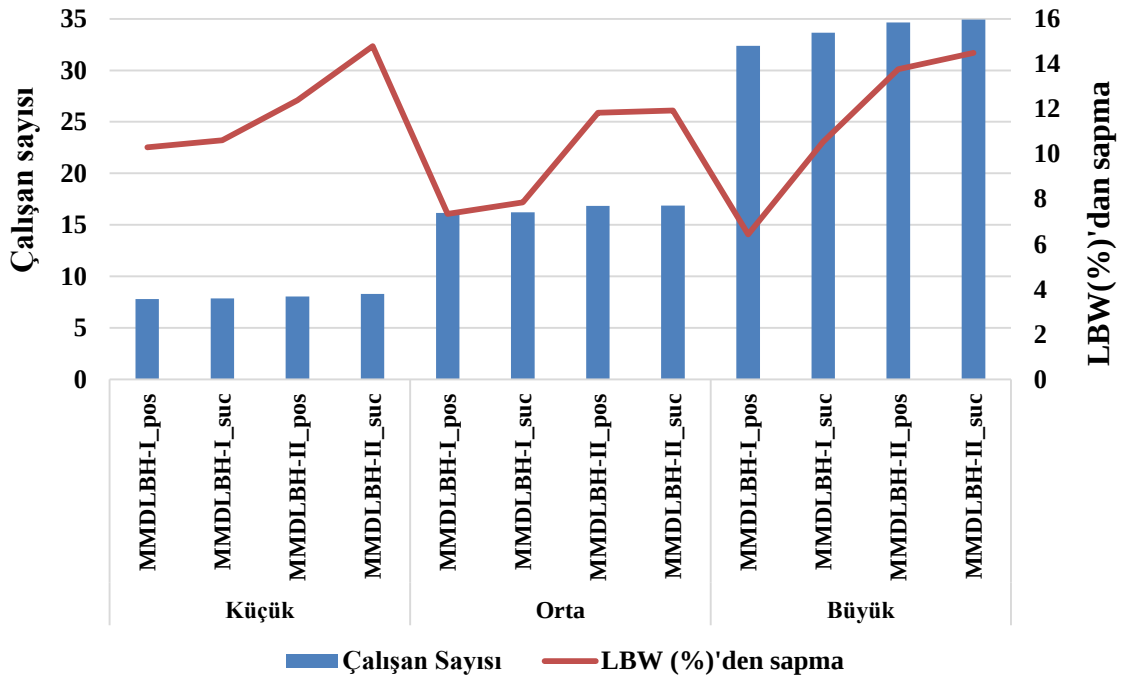
$$LBW = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^{NTAD} t_i}{CT} \right\rceil \quad (23)$$

$$LBS = \left[ \frac{LBW}{KMAX} \right]^+ \quad (24)$$

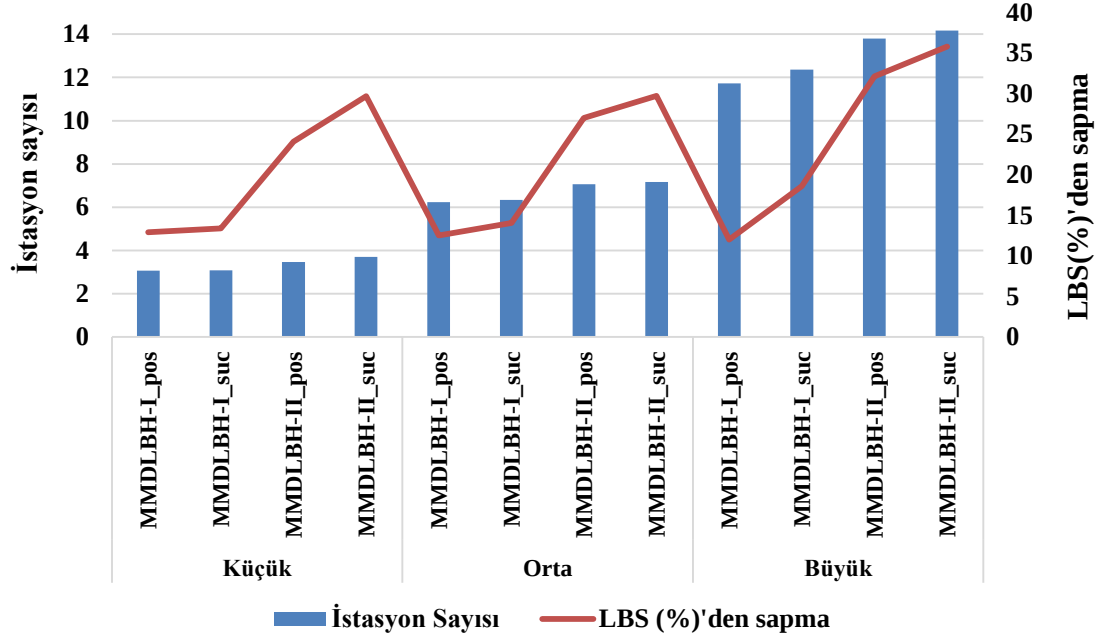
$$LBW(\%)\text{'den sapma} = \frac{(\text{modelde sonucu bulunan çalışan sayısı}) - LBW}{LBW} \times 100 \quad (25)$$

$$LBS(\%)\text{'den sapma} = \frac{(\text{model sonucu bulunan istasyon sayısı}) - SBS}{SBS} \times 100 \quad (26)$$

Önerilen KTDP yaklaşımı küçük ölçekli problemler için [754,8 ; 7108,6] aralığında ortalama 2579,9 saniyede tamamlanarak %72 sinde sonuç elde edilmiştir. KTDP yöntemi ile orta ve büyük ölçekli problemler çözümlenememiştir. Bu yaklaşım ile alınan sonuçlara göre atanan toplam çalışan sayısının teorik olarak hesaplanan alt sınıra eşit olduğu; yaklaşımın özelliği gereği istasyon sayısı için ise teorik alt sınır değerinden %5,09 saptığı görülmüştür. Yani takım çalışması esaslı yaklaşım sayesinde aynı çalışan sayısı ile işler daha az istasyon açılarak tamamlanabilmektedir. Sezgisel yöntemlerin performans karşılaştırması Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’de gösterilmiştir.



Şekil 8.4 : Çalışan sayısı için sezgisel yöntemlerin performans karşılaştırması.



**Şekil 8.5 :** İstasyon sayısı için sezgisel yöntemlerin performans karşılaştırması.

Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’den anlaşılabileceği gibi MMDLBH-I\_pos sezgiseli çalışan sayısı ve açılan istasyon sayısı bakımından diğer yöntemlere göre en iyi sonucu vermiştir. MMDLBH-I\_pos sezgiselinde daha optimum takım oluşturularak işlerin tamamlanabildiği söylenebilir. Diğer yöntemlerde ise çalışan sayısı ve açılan istasyon sayısının belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Bu sonuç göstermiştir ki iş ögesi seçim kriterinin performans açısından oldukça önemli etkisi bulunmaktadır. Çalışan sayısında daha düşük sapmanın ise KTDP yaklaşımdan elde edildiği gözlenmiştir. Büyük ölçekli problemlerde performansın belirgin bir şekilde düştüğü görülmüştür.

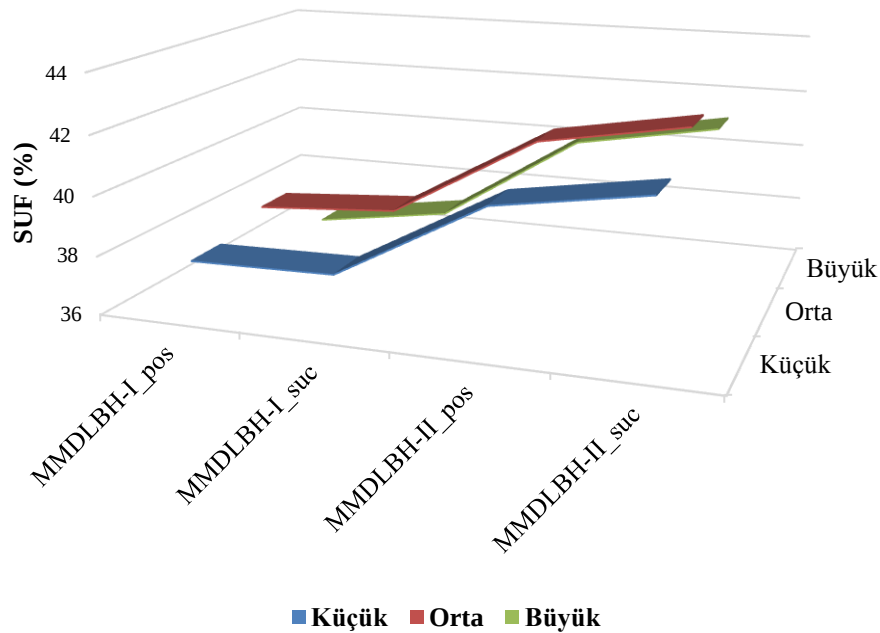
Sezgisel yöntemler arasında performans farklılıklarını analiz etmek için %5 önem seviyesinde bağımlı t-testi uygulanmıştır. Test problemlerin %91,33 (%89,33)’inde MMDLBH-I’nin MMDLBH-II’ye göre -iş ögesi seçim kuralından bağımsız olarak- çalışan sayısı (açılan istasyon sayısı) bakımından daha fazla üstünlük sağladığını göstermiştir. Buna ek olarak, test problemlerin %83,33 (%84,67)’inde geliştirilen algoritmadan bağımsız olarak “maksimum konu ağırlığı” seçim yönteminin “maksimum takip eden iş ögesi sayısı” yöntemine göre çalışan sayısı (açılan istasyon sayısı) bakımından daha iyi sonuçlar elde edildiği saptanmıştır.

Çizelge 8.2’de her bir yöntemin birbiri ile istatistiksel olarak karşılaştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

**Çizelge 8.2 : Sezgisel yöntemlerin karşılaştırılması.**

| Karşılaştırma   |                               | Karşılaştırma Farkları |            |                |               |        |                 |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|------------|----------------|---------------|--------|-----------------|
|                 |                               | Ort.                   | Std. Sapma | Std. Hata Ort. | Güven Aralığı |        | Sig. (2-tailed) |
|                 |                               |                        |            |                | Düşük         | Yüksek |                 |
| Çalışan sayısı  | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-I_suc   | -0.460                 | 1.162      | 0.095          | -0.648        | -0.272 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-II_pos  | -1.073                 | 1.602      | 0.131          | -1.332        | -0.815 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-II_suc  | -1.267                 | 1.805      | 0.147          | -1.558        | -0.975 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_suc - MMDLBH-II_pos  | -0.613                 | 1.169      | 0.095          | -0.802        | -0.425 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_suc - MMDLBH-II_suc  | -0.807                 | 1.289      | 0.105          | -1.015        | -0.599 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-II_pos - MMDLBH-II_suc | -0.193                 | 0.673      | 0.055          | -0.302        | -0.085 | 0.001           |
| İstasyon Sayısı | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-I_suc   | -0.253                 | 0.744      | 0.061          | -0.373        | -0.133 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-II_pos  | -1.100                 | 1.518      | 0.124          | -1.345        | -0.855 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_pos - MMDLBH-II_suc  | -1.333                 | 1.670      | 0.136          | -1.603        | -1.064 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_suc - MMDLBH-II_pos  | -0.847                 | 1.252      | 0.102          | -1.049        | -0.645 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-I_suc - MMDLBH-II_suc  | -1.080                 | 1.383      | 0.113          | -1.303        | -0.857 | 0.000           |
|                 | MMDLBH-II_pos - MMDLBH-II_suc | -0.233                 | 0.607      | 0.050          | -0.331        | -0.135 | 0.000           |

Alan kullanım durumu bakımından farklı problem setleri için benzer trende sahip olduğu görülmektedir. SUF (%) değerleri daha sınırlı bir aralıkta [%36,39 ; %42,23] kalmıştır. Bunun nedeni Şekil 8.6’da görüldüğü gibi sezgisel sonuçlarının çalışan sayısı ve açılan istasyon sayısına göre senkronize bir şekilde değişiyor olmasıdır.



**Şekil 8.6 : Farklı problem büyüklükleri için SUF (%) değerleri.**

Daha büyük problem veri setlerinde dahil hesaplama verimliliğinin yüksek olduğu; aynı zamanda MMDLBH-II sezgiseller için daha fazla zaman ve iterasyon gerektiği Çizelge 8.3'de gösterilmiştir. Çizelge 8.3'e göre, önerilen sezgisel tarama büyük boyutlu problemler için bile hesaplama verimliliği sağlamaktadır (maksimum CPU süresi: 68,15 saniye).

**Çizelge 8.3 : Sezgiseller için ortalama işlem süresi (saniye).**

|               | Problem boyutları |       |       |
|---------------|-------------------|-------|-------|
|               | Küçük             | Orta  | Büyük |
| MMDLBH-I_pos  | 2,64              | 6,72  | 48,73 |
| MMDLBH-I_suc  | 2,58              | 6,44  | 48,14 |
| MMDLBH-II_pos | 5,43              | 11,12 | 33,89 |
| MMDLBH-II_suc | 5,27              | 10,77 | 32,91 |

Ek olarak, MMDLBH-II odaklı sezgisel taramaların, MMDLBH-II'nin daha fazla yineleme gerektirdiğinden, MMDLBH-I'ye dayalı sezgisel taramalardan daha uzun hesaplama sürelerine yol açtığı tespit edilmiştir. Sezgiselerin performanslarının çözümlerinin kaydedildiği zamana göre karşılaştırılması için farklı problem boyutları için üç CPU zaman sınırı belirlenmiştir. CPU zaman karşılaştırması sonuçları Ek E'de verilmiştir. Görev seçim kuralının, CPU zamanına etkileri bakımından sezgisel yöntemler ele alındığı söylenebilmektedir. Görev seçim kuralına gelince, takip eden iş öge sayısı, özellikle orta ve büyük test problemleri için, konum ağırlığına kıyasla kısmen bir hesaplama kolaylığı sağlamaktadır (Çizelge 8.4).

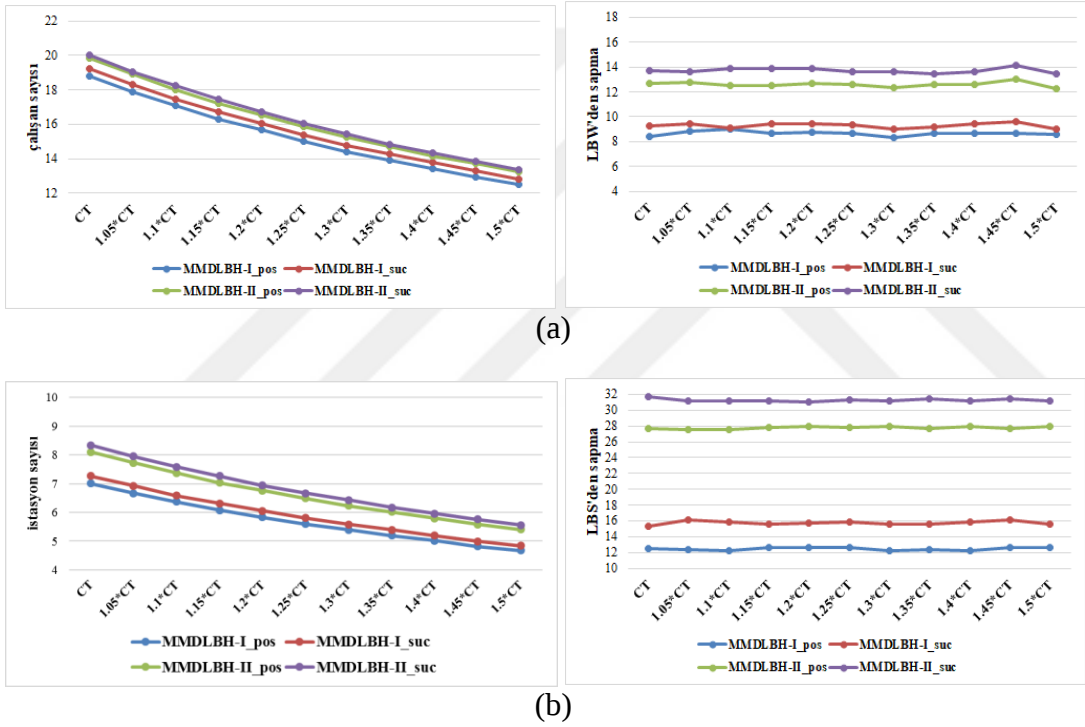
**Çizelge 8.4 : Farklı zaman limitleri için elde edilen sonuç oranları (%).**

|               | Problem Büyüklüğü: Küçük |       |       | Problem Büyüklüğü: Orta |        |        | Problem Büyüklüğü: Büyük |        |        |
|---------------|--------------------------|-------|-------|-------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
|               | CPU Zaman Limiti         |       |       | CPU Zaman Limiti        |        |        | CPU Zaman Limiti         |        |        |
|               | 3 sn.                    | 5 sn. | 7 sn. | 5 sn.                   | 10 sn. | 15 sn. | 30 sn.                   | 50 sn. | 70 sn. |
| MMDLBH-I_pos  | 72                       | 100   | 100   | 0                       | 100    | 100    | 32                       | 100    | 100    |
| MMDLBH-I_suc  | 76                       | 100   | 100   | 8                       | 100    | 100    | 34                       | 100    | 100    |
| MMDLBH-II_pos | 0                        | 38    | 100   | 0                       | 38     | 100    | 0                        | 58     | 100    |
| MMDLBH-II_suc | 0                        | 44    | 100   | 0                       | 40     | 100    | 0                        | 62     | 100    |

## 8.1 Duyarlılık Analizi

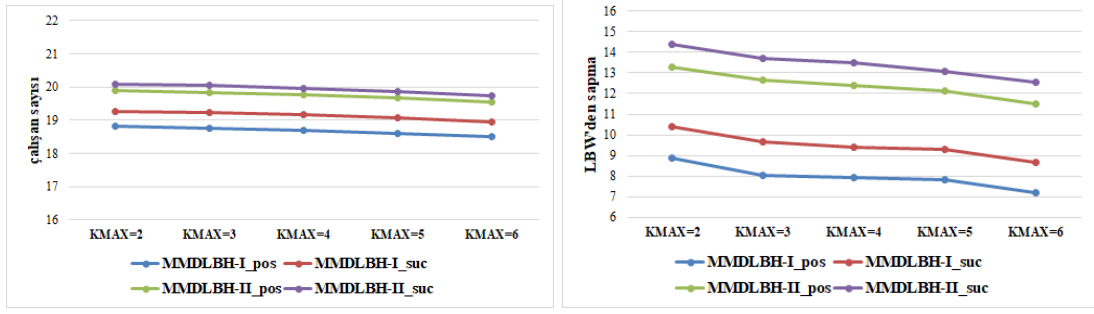
Geliştirmiş olduğumuz ve öncelik seçim kriterleri ile entegre ettiğimiz sezgisel yöntemlerin çevrim süresi (CT) ve istasyonda çalışacak maksimum çalışan sayısı (KMAX) değerlerine göre etkileri görmek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır.

Şekil 8.7'den, işçi sayısı ve iş istasyonlarında farklı çevrim sürelerine sahip farklılıklar olduğu görülmektedir; çünkü işçi sayısı ve çevrim süresi arasında doğrudan ve ters orantılı bir ilişki vardır. Çevrim süresinin işçi sayısı ve iş istasyonu sayısı üzerindeki etkisinin, hesaplanan sapmalara yönelik formülasyonlar içinde LBW ve LBS yoluyla ortadan kaldırılması nedeniyle alt sınır değerlerde bu sapma gözlenmemiştir.

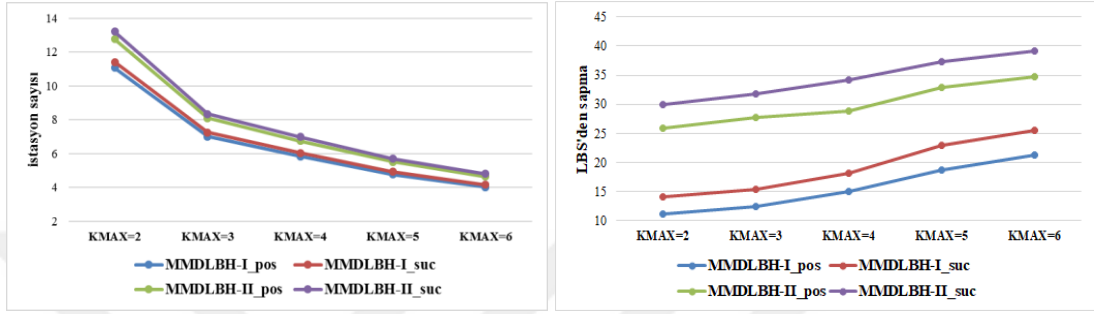


Şekil 8.7 : Çevrim süresine göre çalışan sayısı ve LBW(a) ve LBS(b) duyarlılığı.

Çevrim süresi artış gösterirken çalışan sayısı ve açılan istasyon sayısı ters orantılı olarak azalış göstermektedir. Çevrim süresinin 1,5 kat değişmesi durumunda çalışan sayısı ve istasyon sayısı bakımından mevcut değerlerin yarıya düştüğü gözlenmiştir. Çevrim süresi artış gösterirken çalışan sayısı ve istasyon sayılarındaki beklenen azalış gerçekleşmiştir. En iyi sezgisel yöntem olarak bulunan MMDLBH-1\_pos sezgiselinde daha en az sayıda çalışan ve istasyon ile demontaj hattı dengelenmiştir. Yine MMDLBH-1\_pos sezgisel yöntemin alt sınır değerlerinden daha az sapma gösterdiği gözlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8.8 : KMAX'a göre çalışan sayısı ve LBW(a) ve LBS(b) duyarlılığı.

KMAX'ın etkisi göz önüne alındığında Şekil 8.8'de yer aldığı gibi, daha büyük istasyon boyutları, çalışan sayısında bir değişiklik oluşturmamıştır. Bir diğer ifade ile KMAX değerindeki değişiklik çalışan sayısına göre duyarlı değildir ve bundan etkilenmemektedir. KMAX ikiden altıya çıkarıldığında, çalışan sayısında %6,7 değişim meydana getirmektedir. Özellikle bu değer ikiden üçe yükseldiğinde açılan istasyon sayısında oldukça belirgin azaldığı gözlenmiştir. Öte yandan, istasyonların sayısı KMAX'tan önemli ölçüde etkilenmektedir, çünkü bir sökme istasyonunda daha fazla sayıda işçi tahsis etme potansiyeli KMAX yükseldiğinde mümkün olabilmektedir. Bu sonuç, ürün boyutuna ve çalışma ortamına göre uygun KMAX değerinin belirlenmesini vurgulamaktadır. Bu arada, sezgisel tarama ile görev önceliklendirme kuralları arasındaki performans farklılıklarının, farklı çevrim süresi ve KMAX değerleri üzerinde geçerli olduğu söylenebilir.



## 9. SONUÇLAR

Günümüzde değişen yaşam şekilleri ve nüfusun hızlı artışı ile atıklarda da hızlı bir şekilde artış görülmektedir. Oluşan atıkların doğru bir şekilde değerlendirilmesi de çevresel ve ekonomik açıdan getiri sağlarken yanlış değerlendirilmesi durumunda ise hem çevresel ve sağlık açısından ciddi sorunlar oluşturmakta hem de maddi kayıplara yol açabilmektedir. Atıkların toplanması, bertaraf edilmesi ve en önemlisi geri dönüşümü oldukça önem arz etmektedir. Ürün geri kazanımı, yeniden üretim, yenileme ve geri dönüşüm yoluyla atılan ürünlerden bileşenleri ve malzemeleri çıkartarak atık miktarını en aza indirmeye odaklanır. Çevre yasaları ve yönetmelikleri, doğal kaynakların tükenmesi, artan atık depolama maliyetleri ve artan tüketici bilinci ve sosyal sorumluluklar gibi farklı faktörler, üreticileri atık tüketimi konusunda tüketilen ürünleri geri kazanmaya zorlamıştır.

Son yıllarda hızlı artışın olduğu ve oldukça ciddi sonuçlara yol açabilecek atık grubunu elektrikli ve elektronik ekipmanlar oluşturmaktadır. Çağımızın en önemli ihtiyaçları olan ve en yaygın kullanılan elektrikli ve elektronik aletlerin eskiden kullanım sonrası tamir edilmesi eğilimi var iken; şimdilerde tamir olmaksızın kullanılmamaya başlamıştır. Bu kapsamda atık elektrikli ve elektronik ürünler tarafından çevreye ve sağlığa verilecek zararları önlemek amacıyla Avrupa Birliği tarafından oluşturulan yönetmelikte hem üreticilere hem de tüketicilere belirli sorumluluklar verilmiştir. Bu kapsamda üreticiler üretmiş oldukları ürünlerin tüketiciler de kullandıkları ürünlerden sorumlu tutulmaktadır. Ayrıca yürürlüğe alınan yasal düzenlemeler ve tüketicilerin sorumluluk bilincinin artması ile ürün geri kazanımı ve insan sağlığına ve çevreye olan etkilerin azaltılması konusu önem kazanmıştır.

Atık ürünlerin geri kazanılması konusunda en yaygın yöntem demontaj sistemleridir. Bu kapsamda atık elektrikli ve elektronik atıkların da geri kazanımı konusunda kurulan tesislerde sökme işlemi yapılarak ekonomik olarak fayda sağlayacak parçalar ayrıştırılmakta ve çevreye, sağlığa zarar verecek malzemeler/parçalar ise bertaraf

edilmektedir. Atıkların geri kazanımı konusunda demontaj hatlarının da verimli bir şekilde tasarımı ve kullanılması gerekmektedir.

Bu nedenle tez çalışması kapsamında demontaj hatların daha etkin ve verimli kullanılabilmesi için klasik çalışma yöntemine karşın takım esaslı çalışma önerilmiştir. Takım esaslı çalışmada her bir iş istasyonuna birden fazla işçi atanarak takım oluşturulabilmekte; böylelikle süre, alan, maliyet tasarrufu ile kalite ve çalışan memnuniyeti sağlanmaktadır.

Literatürdeki önceki çalışmalar incelenmiş ve demontaj hattı dengeleme probleminde her bir istasyonun yalnızca bir işçi içerdiği geleneksel sökme hatlarının dengelenmesine odaklanıldığı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmanın demontaj hattı tasarım faaliyetleri sırasında etkin bir şekilde kolaylık sağlama açısından sektöre değer kattığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu çalışma, sökme işlemleri için tek parça akış sağlayarak kesin kapasitenin belirlenmesini mümkün kıldığından üretim planlama faaliyetlerini destekleme potansiyeline sahip olmuştur.

Çalışma kapsamında, takım çalışması esaslı istasyonlara sahip demontaj hatları için işçi ve istasyon sayısını en aza indirmek amacıyla bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve iki sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

Karma tamsayılı doğrusal programlama modelinin gerçek hayattaki çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi demontaj sistemine uygulanması, takım çalışması esaslı istasyonların demontaj hatları için teslim süresi ve alan kullanımı için kolaylık sağladığını göstermiştir. Uygulama, takım esaslı çalışma demontaj hattı tasarımının, geleneksel sökme hattı tasarımına kıyasla alan kullanımı ve sökme ön süresi için performans iyileştirmeleri sağladığını göstermiştir. Uygulama, çamaşır ve bulaşık makinesi demontaj hattı sistemlerinde, klasik bir demontaj sistemi tasarımına kıyasla daha kısa demontaj teslim süresi (sırasıyla %47,9 ve %80,9) ve daha düşük alan gereksinimi (sırasıyla %61 ve %60,2) ile sonuçlanmıştır.

Bununla birlikte, matematiksel model ve sezgisel algoritmaların performansı yeni oluşturulan test problemlerinde doğrulanmıştır. Sonuçlar, sezgisel algoritmaların kabul edilebilir zaman sınırları içerisinde tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermiştir. Karşılaştırma sonuçları, algoritma ve çizelgeleme metodu için sırasıyla takım çalışması esaslı demontaj hattı dengeleme sezgisel yöntemi-1 (MMDLBH-I) ve “maksimum konum ağırlığı” seçim kriterinin üstünlüğünü göstermiştir.

Demontaj sistemlerindeki yöneticiler ve mühendisler için yönetsel görüşler aşağıdaki gibidir:

- Önerilen çalışma, özellikle büyük ölçekli ürünler için takım çalışması esaslı sökme hattı uygulamalarından elde edilen boş alan için ilave yeniden imalat / sökme bölümlerini bulma imkânı sunmaktadır.
- Çok kanallı istasyonların demonte sistemlerde kullanılmasıyla, önemli teslim zamanı performansına sahip tek parça akış sağlanabilmektedir. Bu nedenle, çalışan sayısını değiştirerek kapasiteyi değerlendirme ve kapasiteyi ayarlama açısından planlama kabiliyeti geliştirilmiştir. Bu konu planlama departmanlarında teslim tarihi tayininde kolaylık sağlamaktadır.
- Takım çalışması esaslı istasyonlarda demonte görevlerinin senkronize olarak yürütülmesi, çalışanlar arasında daha yakın bir ilişki sağlamaktadır. Her çalışan, diğer çalışanların sökme görevlerini nasıl gerçekleştirdiğini gözlemleyebildiğinden, çok insanlı istasyonlar, hataların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesini, iş tatmini ve sökme sırasında öğrenme potansiyelini teşvik etmektedir.
- Takım çalışması esaslı istasyonların avantajları, daha fazla sökme görevi gerektiren daha büyük ölçekli ürünler için daha önemli hale geldiğinden, bu çalışmada geliştirilen yenilikler, sökme işlemlerinin işçilere tahsisi sırasında hat tasarımcıları için mühendislik kontrolünü artıracaktır.
- Az sayıda takım çalışması esaslı istasyona sahip iyi yapılandırılmış demontaj hattı tasarımı yalnızca toplam sabit (otomasyon vb.) maliyetleri (Altekin, Kandiller ve Özdemirel 2008; Roshani ve Giglio, 2015a) ve dahili lojistiği azaltmakla kalmaz; daha etkili dahili lojistik sağlamaktadır.

Çalışmanın avantajlarını tetikleyen ilgili bazı konulara değinilmek istenirse; ilk olarak, demontaj hattı tasarımının dikkate alınması ürün için daha esnek ve kolay sökme sağlayacaktır. Bu sorun, ürünün sökme hattından akışını sağlayacak ve takım çalışması esaslı istasyonların üretilmesi için kolaylık sağlayacaktır. İkincisi, çalışmanın performansı işçilerin becerisine karşı hassastır, çünkü takım çalışması esaslı istasyonların kullanımı düşük vasıflı işçilerle mümkün değildir. Bu nedenle, işçilerin becerileri, eğitimler ve rotasyonlar yoluyla izlenmeli ve geliştirilmeye çalışılmalıdır. Son olarak, en önemlisi de takım çalışmasını sürdürebilen bir iş disiplini, tek çalışan istasyonlardan demontaj hatlarındaki çok insanlı istasyonlara dönüşüm için kritik bir başarı faktörü olarak görülebilir. Bu nedenle, görsel kontrol, iş standardizasyonu ve sürekli iyileştirme ile Yalın Yönetim bu disiplini yerine getirmek için etkili bir sistem olarak kabul edilebilir.

Tez çalışması kapsamındaki sınırlamalar bazı çalışmaların uzantısı niteliğinde olmuştur. Çalışanların en aza indirgenmesi (Kellegöz ve Toklu, 2015; Roshani ve Giglio, 2015b; Chen, 2017; Giglio ve diğ., 2017) ve istasyonlar (Bukchin ve diğ., 1997; Bukchin ve Masin, 2004; Dimitriadis, 2006; Yılmaz ve Yılmaz, 2016), bu çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca, her istasyondaki işçiler için iş yükü dengelemesi (yük yoğunluğu) bazı takım çalışması esaslı montaj hattı dengeleme çalışmalarında (Fattahi ve diğ., 2011; Roshani ve diğ., 2013; Yılmaz ve Yılmaz, 2015) benimsenmiştir. Önerilen sezgisel taramadaki programlama sistematigi bu hedefi dolaylı olarak desteklese de en erken bitirme süresine sahip bir işçiye bir sökme görevi atadığı için, yük yoğunluğu ek bir hedef olarak odaklanabilir.

Tez çalışması kapsamında konu ile ilgili geliştirmeye açık alanlar aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

- Çoklu/paralel takım çalışması esaslı sökme hatları (tekli sökme hatları ile karşılaştırıldığında) için avantajlar / dezavantajlar tartışılabilir.
- Robot ve otomasyondaki ilerlemelerin, tekli / çoklu robot / paralel robot veya hibrit (insan ve robotik) demontaj hatları üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Çok şekilli DHDP için U-şekilli düzen kullanılabilir ve seri hat düzeniyle karşılaştırılabilir.
- Yukarıda belirtilen sezgisel taramalarla meta sezgisel yaklaşımlar geliştirilebilir ve karşılaştırılabilir.
- Bu çalışmada çalışanlar arasındaki performans farklılıkları dikkate alınmadığından, KTDP modeli, çalışma zamanının çalışanların becerilerine göre değişebileceği şekilde revize edilebilir.
- İmalat sistemlerinin doğası gereği, bu çalışmada belirleyici sayılan sökme işlem süresi gibi parametreler için rastlantısallık veya belirsizlik dahil edilebilir.
- Konumsal ağırlık ve ardıl iş ögesi sayısına ek olarak, sökme işlemlerine öncelik vermek için alt montaj özellikleri (maddi değer, tehlike durumu vb.) kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- Agrawal, S. & Tiwari, M.K.** (2008). A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 46 (6), 1405-1429.
- Altekin, T.F. ve diğ.** (2008). Profit-oriented disassembly-line balancing. *International Journal of Production Research*, 46 (10), 2675-2693.
- Altekin, F.T. & Akkan, C.** (2012). Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines. *International Journal of Production Research*, 50 (18), 4955-4976.
- Altekin, F.T.** (2016). A Piecewise Linear Model for Stochastic Disassembly Line Balancing. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 932-937.
- Altekin, F.T.** (2017). A comparison of piecewise linear programming formulations for stochastic disassembly line balancing, *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2017.1351639.
- Amen, M.** (2006). Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research*, 168 (3), 747–770.
- Avikal, S. ve diğ.** (2014). A Kano model, AHP and M-TOPSIS method-based technique for disassembly line balancing under fuzzy environment. *Applied Soft Computing*, 25, 519-529.
- Avikal, S. & Mishra P.K.** (2012). “A New U-Shaped Heuristic for Disassembly Line Balancing Problems, Pratibha: International Journal of Science. Spirituality, Business and Technology, 1 (1), 21–27.
- Avikal, S. ve diğ.** (2013). A PROMETHEE Method Based Heuristic for Disassembly Line Balancing Problem. *Industrial Engineering & Management Systems*, 12 (3), 254-263.
- Avikal, S. ve diğ.** (2013). A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems. *International Journal of Production Research*, 52 (5), 1306-1317.
- Avikal, S. ve diğ.** (2013). “A Heuristic for U-Shaped Disassembly Line Balancing Problems.” *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 3 (1), 51–56.
- Aydemir-Karadağ, A. & Türkbey, O.** (2011). XI. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 775-784.
- Aydemir-Karadağ, A. & Türkbey O.** (2013). Multi-Objective Optimization of Stochastic Disassembly Line Balancing with Station Parallelizing. *Computers and Industrial Engineering*, 65 (3), 413–425.

- Aydoğdu, A.** (2005). *Takım Esaslı Montaj Hattı Dengeleme* (Bitirme Tezi), İ.T.Ü. Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Banks, J. ve diğ.,** (2001). *Discrete-event System Simulation*, 3rd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Baskak, M. & Tanyaş, M.** (2013). *Üretim Planlama & Kontrol*. İrfan Yayıncılık, 3. yayın.
- Bause, F. & M. Eickhoff,** (2003). Truncation point estimation using multiple replications in parallel, *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 414-421.
- Bentaha, M.L. ve diğ.** (2014a). Disassembly line balancing and sequencing under uncertainty. *Procedia CIRP*, 15, 239–244.
- Bentaha, M.L. ve diğ.** (2014b). Lagrangian relaxation for stochastic disassembly line balancing problem. *Procedia CIRP*, 17, 56–60.
- Bentaha, M. L. ve diğ.** (2014c). An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times. *International Journal of Production Research*, 53 (6), 1807-1818.
- Bentaha, M.L. ve diğ.** (2014d). Disassembly Line Balancing Problem with Fixed Number of Workstations under Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 3522-3526.
- Bentaha, M.L. ve diğ.** (2014e). A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 51, 111-122.
- Bentaha, M. L. ve diğ.** (2013). L-shaped Algorithm for Stochastic Disassembly Line Balancing Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 407-411.
- Bentaha, M. L. ve diğ.** (2015). Second order conic approximation for disassembly line design with joint probabilistic constraints. *European Journal of Operational Research*, 247, 957-967.
- Bukchin, J. ve diğ.** (1997). “Team-oriented assembly system design: a new approach.” *International Journal of Production Economics*, 51 (1-2), 47-57.
- Bukchin, J. & Masin M.** (2004). “Multi-Objecti& design of team-oriented assembly systems.” *European Journal of Operational Research*, 156, 326-352.
- Burbidge, J.L.** (1996). *Production Flow Analysis for Planning Group Technology*. Clarendon Press, Oxford.
- Chen, Y.Y.** (2017). A hybrid algorithm for allocating tasks, operators, and workstations in multi-manned assembly lines. *Journal of manufacturing systems*, 42, 196-209.
- Chen, Y.Y ve diğ.** (2018). Resource-constrained assembly line balancing problems with multi-manned workstations. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 107-119.
- Çevikcan, E.** (2006). *Takım çalışması esaslı karma modellenli montaj hatlarının tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çevikcan, E. ve diğ.** (2009). A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems. *Computers & Industrial Engineering*, 56 (2), 576-599.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı AEEE Kontrolü Yönetmeliği.** (2012). Erişim adresi [webdosya.csb.gov.tr/db/turkce/mevzuat/mevzuat605.doc](http://webdosya.csb.gov.tr/db/turkce/mevzuat/mevzuat605.doc)
- Dimitriadis, S.G.** (2006). Assembly line balancing and group working: a heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research*, 33 (9), 2757-2774.
- Ding, L. P. ve diğ.** (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 48, 761-771.
- Duta, L. ve diğ.** (2016). Column generation approach for disassembly line balancing. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 916-920.
- Fattahi, P. ve diğ.** (2011). A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (1-4), 363-378.
- Giglio, D. ve diğ.** (2017). Multi-manned Assembly Line Balancing Problem with Skilled Workers: A New Mathematical Formulation. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 1211-1216.
- Gupta, S. M. & Taleb, K. N.** (1994). Scheduling disassembly, *International Journal of Production Research*, 32 (8), 1857- 1866.
- Gupta, S.M., & McLean, C.R.** (1996). "Disassembly of products." *Computers & Industrial Engineering*, 31(1-2), 225-228.
- Güngör, A. & Gupta, S.M.** (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers and Industrial Engineering*, 36 (4), 811-853.
- Güngör, A. & Gupta S.M.** (2001). A Solution Approach to the Disassembly Line Balancing Problem in the Presence of Task Failures. *International Journal of Production Research*, 39 (7), 142-1467.
- Güngör, A. & Gupta, S. M.** (2002). Disassembly line in product recovery. *International Journal of Production Research*, 40 (11), 2569-2589.
- Hezer, S. & Kara, Y.** (2015). A network-based shortest route model for parallel disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 53 (6), 1849-1865.
- Jafari, H. ve diğ.** (2017) Sustainable development by waste recycling under a three-echelon supply chain: A game-theoretic approach, *Journal of Cleaner Production*, 142, 2252-2261.
- Kalayci, C. B. & Gupta, S. M.** (2011). A hybrid genetic algorithm approach for disassembly line balancing. *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of Decision Science Institute (DSI 2011). Boston, MA, USA.*
- Kalayci, C. B. & Gupta, S. M.** (2012). Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Technology Management*, In press.

- Kalaycılar, E. G. ve diğ.** (2016). A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations. *European Journal of Operational Research*, 249, 592-604.
- Kalaycı, C. B. ve diğ.** (2015). Multi-objective fuzzy disassembly line balancing using a hybrid discrete artificial bee colony algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 672-682.
- Kalaycı, C. B. & Gupta, S. M.** (2013a). Simulated Annealing Algorithm for Solving Sequence-Dependent Disassembly Line Balancing Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 93-98.
- Kalaycı, C. B. & Gupta, S. M.** (2013). Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 40, 7231-7241.
- Kalaycı, C. B. ve diğ.** (2012). A Simulated Annealing Algorithm for Balancing a Disassembly Line. *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*, 714-718.
- Kalaycı ve diğ.** (2014). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 242, 321-354.
- Kalaycı, C. B. & Gupta S. M.** (2013). A tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line. *Production Planning & Control*, 25 (2), 149-160.
- Kalaycı, C.B. & Gupta S.M.** (2013b). Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24 (3), 413-427.
- Kalaycı, C.B. & Gupta S.M.** (2013c). Balancing a sequence dependent disassembly line using simulated annealing algorithm. *Applications of Management Science*, 16, 81-103.
- Kalaycı, C.B. & Gupta S.M.** (2013d). Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 40 (18), 7231-7241.
- Kalaycı, C.B. & Gupta S.M.** (2014). A Tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line. *Production Planning and Control*, 25 (2), 149-160.
- Kalaycı, C.B. ve diğ.** (2016). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 242, 321-354.
- Kannan, D. ve diğ.** (2017). Integrating Disassembly Line Balancing in the Planning of a Reverse Logistics Network from the Perspective of a Third-Party Provider. *Annals of Operations Research*, 253 (1), 353-376.
- Karadağ, A. A. & Turkbey, O.** (2013). Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering*, 65, 413-425.

- Kazemi, A. & Sedighi, A.** (2013). A cost-oriented model for balancing mixed-model assembly lines with multi-manned workstations. *International Journal of Services and Operations Management*, 16 (3), 289-309.
- Kellegöz, T. & Toklu, B.** (2012). A priority rule-based constructive heuristic and an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations. *Computers & Operations Research*, 39 (12), 3344-3360.
- Kellegöz, T. & Toklu, B.** (2015). An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *International Journal of Production Research*, 53 (3), 736-756.
- Koç, A. ve diğ.** (2009). Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph. *IEEE Transactions*, 41, 866-881.
- Lambert, A.J.D.** (2007). A Heuristic for Assembly and Disassembly Line Balancing. *IFAC Proceedings Volumes*, 40 (2), 69-74.
- Lee, Y. H. & Kim, S. H.** (2002). Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 43 (1-2), 169-190.
- McGovern, S. & Gupta, S.M.** (2003a). Greedy algorithm for disassembly line scheduling, *IEEE International Conference*. 2.
- McGovern, S.M., and Gupta S.M.** (2003b). "2-Opt Heuristic for the Disassembly Line Balancing Problem." In *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing III*, 71-84, Providence, RI.
- McGovern, S. & Gupta, S. M.** (2006). Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives, *Int J. Adv. Manuf. Technol.* 30, 481496 DOI 10.1007/s00170-005-0037-6.
- McGovern, S.M. & Gupta, S.M.** (2007a). Combinatorial optimization analyses of the unary NP-complete disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 45 (18-19), 4485-4511.
- McGovern, S.M. & Gupta, S.M.** (2007b). A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 179, 692-708.
- Mete, S. & diğ.** (2016). Resource Constrained Disassembly Line Balancing Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 921-925.
- Mete, S. & diğ.** (2016). A solution approach based on beam search algorithm for disassemblyline balancing problem. *Journal of Manufacturing Ssytems*, 41, 188-200.
- Özceylan, E. & diğ.** (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E*, 61, 142-164.

- Özceylan, E. & Paksoy, T.** (2013). Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 51 (20), 5985-6001.
- Özceylan, E. ve diğ.** (2018). Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research*, 1-23.
- Paksoy ve diğ.** (2013). Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals. *International Journal of Production Research*, 51 (20), 6082-6096.
- Ren, Y. ve diğ.** (2018). Disassembly line balancing problem using interdependent weights-based multi-criteria decision making and 2-Optimal algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1475-1486.
- Riggs, R. J. ve diğ.** (2015). Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 638-648.
- Roshani, A. & Ghazi-Nezami, F.** (2017). Mixed-model multi-manned assembly line balancing problem: a mathematical model and a simulated annealing approach. *Assembly Automation*, 37 (1), 34-50.
- Roshani, A. & Giglio, D.** (2015a). A Mathematical Programming Formulation for Cost-oriented Multi-manned Assembly Line Balancing Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (3), 2293-2298.
- Roshani, A. & Giglio, D.** (2015b). A simulated annealing approach for multi-manned assembly line balancing problem type II. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (3), 2299-2304.
- Roshani, A. ve diğ.** (2013). A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 32 (1), 238-247.
- Tovey, C. A.** (2002). Tutorial on Computational Complexity. *Interfaces*, 32, 30–61.
- Scholl, A. ve Vob, S.** (1996). Simple Assembly Line Balancing – Heuristic Approaches. *Journal of Heuristic*, 2, 217-244.
- Simchi-Levi, D. ve diğ.** (2008). Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies. McGraw Hill Professional.
- Şengül, Ü.** (2011). Tersine Lojistik Kavramı & Tersine Lojistik Ağı Tasarımı. *Atatürk Üniversitesi İİBF Dergisi*, 10.
- Tuncel E. ve diğ.** (2014). Solving large scale disassembly line balancing problem with uncertainty using reinforcement learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, 647–659.
- TÜBİSAD**, (2018). < <http://www.tyk.org.tr/tr/>> , erişim tarihi 16 Kasım 2018.
- Yi, P. ve diğ.** (2016) Dual recycling channel decision in retailer oriented closed-loop supply chain for construction machinery remanufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 137, 1393-1405.
- Yilmaz, H. & Yilmaz M.** (2015). Multi-manned assembly line balancing problem with balanced load density. *Assembly Automation*, 35 (1), 137-142.

**Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi & Eylem Planı.** 2014-2017  
<http://webdosya.csb.gov.tr/db/ugds/ustmenu/ustmenu615.pdf>

**URL-1.** < <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/>>, erişim tarihi 10 Ocak 2019.

**URL-2.** Assembly Line Balancing Data Sets, <https://assembly-line-balancing.de/>,  
erişim tarihi 26 Mayıs 2018.

**Zhang, Z. ve diğ.** (2017). A Pareto Impro&d Artificial Fish Swarm Algorithm for Solving a Multi-Objecti& Fuzzy Disassembly Line Balancing Problem. *Expert Systems with Applications*, 86 (1), 165–176.





## **EKLER**

**Ek A:** amaşır makinesi GAMS-CPLEX matematiksel modeli

**Ek B:** Bulaşık makinesi GAMS-CPLEX matematiksel modeli

**Ek C:** Sezgiseller için geliştirilen MATLAB kodu

**Ek D:** Kk, orta ve bk ölçekli problem zmleri

**Ek E:** Kk, orta ve bk ölçekli problemler için CPU zamanı sonuçları



## EK A: Çamaşır makinesi GAMS-CPLEX matematiksel modeli

```
Sets
i set of all tasks /1*41/
j set of all workstations /1*41/
k set of all workers for each workstation /1*3/
epor_2 /5,23,28,29,30,37/
spor_2 /5,23,28,29,30,37/
alias(i,s)

Set
P(i,s) set of immediate AND predecessors for task i
/1.15, 1.10, 1.6, 4.3, 7.6, 8.15, 8.7, 11.10, 12.13, 13.15, 13.10, 13.8, 13.9,
14.15, 15.2, 16.15, 17.15, 18.2, 19.18, 20.15, 21.2, 22.2, 24.2, 25.2, 26.25,
27.12, 31.3, 32.15, 33.31, 35.31, 36.2, 37.15, 37.39, 37.40, 37.34, 37.24,
37.25, 38.3, 39.2, 40.13, 41.37, 41.30, 41.29/

POR(i,s) set of immediate OR predecessors for task i
/5.2, 5.3, 23.24, 23.26, 28.1, 28.27, 29.28, 29.14, 30.35, 30.14, 37.38, 37.36/

Parameters
CT cycle time /137/
kmax max allowable workers in a workstation /3/
imax the number of all tasks /41/
jmax the number of all workstations /41/
t(i) duration of tasks
/
1 83
2 18
3 12
4 22
5 24
6 28
7 35
8 72
9 16
10 22
11 18
12 68
13 62
14 71
15 30
16 42
17 35
18 36
19 30
20 30
21 60
22 60
23 45
24 28
25 34
26 30
27 22
28 34
29 75
30 60
31 15
32 45
33 26
34 20
35 15
36 15
37 93
38 75
39 48
40 54
41 20
/
;
```

Şekil A.1 : Takım çalışması esaslı matematiksel model.

```

Scalar
M a large positive number /1000000000/;

Binary Variables
x(i,j,k) if task i is assigned to the worker k in workstation j
c(j) if workstation j is open
w(j,k) if worker k is used in workstation j
ws(j,k) if k workers are used in workstation j
y(i,s) if task i is executed earlier than task s in the sequence of tasks assigned to the same worker
epor(i,s,j) or predecessors for task i
spor(i,s) or predecessors for task i
;

Positive Variables
strt(i) start time of each task i;

Variables
z optimum number of worker;

Equations
goal.. z=e=sum(j,k),w(j,k));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=1=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=1=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum(s,epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*y(i,s)=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=1=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=1=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=1=0;

Equations
goal.. z=e=sum(j,c(j));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=1=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=1=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum(s,epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*y(i,s)=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=1=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=1=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=1=0;
workerconst.. sum((j,k),w(j,k))=1=NRW;

```

Şekil A.1 (devam) : Takım çalışması esaslı matematiksel model.

```

Equations
goal.. z=e=sum(j,k),w(j,k));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=1=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=1=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=1=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum(s,epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*y(i,s)=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=1=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=1=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=1=0;
teamwork(j,f).. c(j)=e=ws(j,f);

```

Şekil A.2 : Klasik hatlı matematiksel model.

## Ek B : Bulaşık makinesi GAMS-CPLEX matematiksel modeli

```
Sets
i set of all tasks /1*44/
j set of all workstations /1*44/
k set of all workers for each workstation /1*3/
epor_2 /38,39/
spor_2 /38,39/
alias(i,s)

Set
P(i,s) set of immediate AND predecessors for task i
/2.1, 2.4, 3.1, 3.4, 5.2, 5.3, 7.6, 9.8, 10.7, 11.2, 11.3, 12.8, 13.15, 13.8,
14.7, 15.7, 16.7, 17.8, 22.21, 23.21, 24.23, 25.21, 26.2, 26.3, 27.21, 27.26,
28.2, 28.3, 28.27, 28.9, 28.10, 28.11, 28.13, 28.14, 28.15, 28.16, 28.17, 28.18,
29.24, 29.28, 30.4, 31.28, 32.3, 32.4, 33.4, 34.28, 35.4, 36.28, 37.36, 40.3,
41.17, 41.40, 42.3, 42.28, 43.30, 43.31, 43.33, 43.35, 43.37, 43.42, 44.30,
44.31, 44.33, 44.35, 44.37, 44.42/

POR(i,s) set of immediate OR predecessors for task i
/38.39, 38.41, 39.5, 39.28/

Parameters
CT cycle time /80/
kmax max allowable workers in a workstation /3/
imax the number of all tasks /44/
jmax the number of all workstations /44/
t(i) duration of tasks
/
1 12
2 19
3 19
4 23
5 11
6 5
7 9
8 8
9 7
10 7
11 18
12 6
13 16
14 7
15 14
16 6
17 7
18 8
19 14
20 13
21 30
22 12
23 9
24 12
25 22
26 24
27 22
28 39
29 33
30 27
31 29
32 6
33 18
34 16
35 14
36 6
37 34
38 7
39 10
40 8
41 12
42 14
43 11
44 12
/
;
```

Şekil B.1 : Takım çalışması esaslı matematiksel model.

```

Scalar
M a large positive number /1000000000/;

Binary Variables
x(i,j,k) if task i is assigned to the worker k in workstation j
c(j) if workstation j is open
w(j,k) if worker k is used in workstation j
ws(j,k) if k workers are used in workstation j
y(i,s) if task i is executed earlier than task s in the sequence of tasks assigned to the same worker
epor(i,s,j) or predecessors for task i
spor(i,s) or predecessors for task i
;

Positive Variables
strt(i) start time of each task i;

Variables
z optimum number of worker;

Equations
goal.. z=e=sum((j,k),w(j,k));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=l=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=l=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum((s),epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=l=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=l=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=l=0;

Equations
goal.. z=e=sum(j,c(j));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=l=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=l=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum((s),epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=l=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=l=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=l=0;
workerconst.. sum((j,k),w(j,k))=l=NRW;

```

Şekil B.1 (devam) : Takım çalışması esaslı matematiksel model.

```

Equations
goal.. z=e=sum((j,k),w(j,k));
assignmentcons(i).. sum((j,k),x(i,j,k))=e=1;
cycletimecons(i).. strt(i)+t(i)=l=CT;
predconsP(P(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=0;
predconsPOR(POR(i,s)).. sum((j,k),a(j)*x(s,j,k))-sum((j,k),a(j)*x(i,j,k))=l=M*(1-spor(i,s));
predconsPOR_2(spor_2(i)).. sum(s,spor(i,s)*b(i,s))=g=1;
strtconsP(P(i,s),j).. strt(i)-strt(s)+M*(1-sum(k,x(s,j,k)))+M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=g=t(s);
strtconsPOR(POR(i,s),j).. -strt(i)+strt(s)-M*(1-sum(k,x(s,j,k)))-M*(1-sum(k,x(i,j,k)))=l=-t(s)+M*(1-epor(i,s,j));
strtconsPOR_2(epor_2(i),j).. sum((s),epor(i,s,j)*b(i,s))=g=1;
strtconsE(E(i,s),j,k).. strt(s)-strt(i)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(i);
strtconsE_2(E(i,s),j,k).. strt(i)-strt(s)+M*(1-x(s,j,k))+M*(1-x(i,j,k))+M*(1-y(i,s))=g=t(s);
strtconsPOR_3(POR(i,s)).. jmax*spor(i,s)-sum(j,epor(i,s,j))=e=0;
work_1(j,k).. sum(i,x(i,j,k))-M*w(j,k)=l=0;
work_2(j).. sum(k,d(k)*ws(j,k))-sum(k,w(j,k))=e=0;
workerorder(j,k).. w(j,k+1)-w(j,k)=l=0;
workstation(j).. sum(k,ws(j,k))-c(j)=e=0;
workstation_2(j).. c(j+1)-c(j)=l=0;
teamwork(j,f).. c(j)=e=ws(j,f);

```

Şekil B.2 : Klasik hatlı matematiksel model.

## Ek C : Sezgiseller için geliştirilen MATLAB kodu

### User Data Selection

```
prompt = {'Enter task file name(1st column: Task Number, 2nd column: Task Duration):', ...  
          'Enter precedence file name(1st column: Predecessor, 2nd column: Successor):', ...  
          'Number of Maximum Worker in a station:', ...  
          'Cycle Time:'};  
title = 'User Data Selection';  
dims = [1 70];  
definput = {'tasks.xlsx','precedence.xlsx', '3', '137'};  
answer = inputdlg(prompt, title, dims, definput);  
  
task = xlsread(answer{1});  
precedence= xlsread(answer{2});  
numberOfMaximumWorker = str2double(answer{3});  
cycleTime = str2double(answer{4});
```

### Initialization of Parameters

```
numberOfTasks = size(task, 1);  
  
taskNo = task(:, 1);  
taskDuration = task(:, 2);  
taskStartTime = zeros(numberOfTasks, 1);  
taskEndTime = zeros(numberOfTasks, 1);  
taskData = [taskNo taskDuration taskStartTime taskEndTime];  
  
orTaskNumbers = zeros(numberOfTasks, 2);  
for taskNo=1:numberOfTasks
```

Şekil C.1 : Veri girişi.

```
function main()
```

```
close all;  
clc;
```

### Algorithm Choice and Schedule Criteria Selection

```
algorithmChoice= menu('Choose an algorithm','Heuristic-1', 'Heuristic-2');  
if (algorithmChoice ~= 1 && algorithmChoice ~= 2)  
    disp ('Algorithm is not selected properly!');  
    return;  
end  
  
scheduleCriteriaChoice = menu('Choose a schedule criteria', 'Number of Followers', 'Positional Weight');  
if (scheduleCriteriaChoice ~= 1 && scheduleCriteriaChoice ~= 2)  
    disp ('Schedule criteria is not selected properly!');  
    return;  
end
```

Şekil C.2 : Algoritma seçim kriteri.

```

        orTaskNumbers(taskNo, 1) = taskNo;
        orTaskNumbers(taskNo, 2) = sum(precedence(ismember(precedence(:,2), taskNo), 3));
    end
    orTaskNumbers(orTaskNumbers(:,2) == 0, :) = [];

    disassemblyLine = struct('numberOfTasks', numberOfTasks, ...
        'numberOfMaximumWorker', numberOfMaximumWorker, ...
        'cycleTime', cycleTime, ...
        'taskData', taskData, ...
        'precedence', precedence, ...
        'schedule', scheduleCriteriaChoice, ...
        'orTaskNumbers', orTaskNumbers);

```

#### Algorithm implementation

```

switch algorithmChoice
    case 1
        prompt = {'Please enter alfa between 0 - 1'};
        title = 'Alfa Selection';
        answer = inputdlg(prompt, title);
        alfa = str2double(answer);
        tic
        [stationWorkerTask, optimumWorker, ~, numberOfStation] = heuristic1(disassemblyLine,
alfa);
        toc
    case 2
        local = menu('Choose precedence locality', 'Local', 'General');
        tic
        [stationWorkerTask, numberOfStation, optimumWorker] = heuristic2(disassemblyLine, loc
al);
        toc
    otherwise
        disp ('Heuristic method is not selected properly');
        return;
end

```

Şekil C.3 : Algoritma uygulama.

## Ek D : Küçük, orta ve büyük ölçekli problem çözümleri

| Test Problemi         | MILP Approach  |                 |         |                   |                   | MMDLBH-I_pos   |                 |         |                   |                   | MMDLBH-I_suc     |                |                 |         |                   | MMDLBH-II_pos     |                  |                |                 |         | MMDLBH-II_suc     |                   |                  |                |                 |         |                   |                   |                  |
|-----------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|
|                       | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) |
| dis_instance_n=20_10  | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,01             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,96             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,57             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,02             |
| dis_instance_n=20_15  | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,44             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,22             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,56             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,88             |
| dis_instance_n=20_20  | 11             | 6               | 54,55   | 0,00              | 50,00             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 1,86             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 1,87             | 12             | 6               | 50,00   | 9,09              | 50,00             | 3,87             | 12             | 6               | 50,00   | 9,09              | 50,00             | 3,71             |
| dis_instance_n=20_33  | 11             | 5               | 45,45   | 0,00              | 25,00             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 2,58             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 2,49             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 5,38             | 13             | 7               | 53,85   | 18,18             | 75,00             | 4,85             |
| dis_instance_n=20_37  | -              | -               | -       | -                 | -                 | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 3,46             | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 3,43             | 14             | 6               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 6,98             | 15             | 7               | 46,67   | 25,00             | 75,00             | 6,78             |
| dis_instance_n=20_49  | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 2,14             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 2,04             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 4,23             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 4,40             |
| dis_instance_n=20_51  | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 2,25             | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 2,38             | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 4,85             | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 4,69             |
| dis_instance_n=20_67  | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,32             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,11             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,89             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,57             |
| dis_instance_n=20_71  | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 1,90             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 1,90             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,01             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,21             |
| dis_instance_n=20_72  | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,31             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,19             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,41             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,68             |
| dis_instance_n=20_75  | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,91             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,95             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,28             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,17             |
| dis_instance_n=20_80  | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 1,86             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 1,87             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,15             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,91             |
| dis_instance_n=20_95  | 12             | 6               | -       | -                 | -                 | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 2,04             | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 1,86             | 14             | 5               | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 4,20             | 15             | 6               | 40,00   | 25,00             | 50,00             | 3,88             |
| dis_instance_n=20_139 | 5              | 4               | 80,00   | 0,00              | 100,00            | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 1,97             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 1,89             | 6              | 3               | 50,00   | 20,00             | 50,00             | 3,99             | 7              | 3               | 42,86   | 40,00             | 50,00             | 3,75             |
| dis_instance_n=20_145 | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,76             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,69             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 5,39             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 5,00             |
| dis_instance_n=20_168 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 11             | 5               | 45,45   | 10,00             | 25,00             | 2,63             | 11             | 6               | 54,55   | 10,00             | 50,00             | 2,44             | 12             | 7               | 58,33   | 20,00             | 75,00             | 5,39             | 12             | 8               | 66,67   | 20,00             | 100,00            | 4,90             |
| dis_instance_n=20_206 | 5              | 3               | 60,00   | 0,00              | 50,00             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,88             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,81             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 6,28             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 5,77             |
| dis_instance_n=20_210 | 5              | 2               | 40,00   | 0,00              | 0,00              | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 3,09             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,92             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 6,10             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 6,00             |
| dis_instance_n=20_220 | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,97             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,02             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,62             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,01             |
| dis_instance_n=20_226 | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,15             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,02             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,31             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,14             |
| dis_instance_n=20_242 | 12             | 5               | 41,67   | 0,00              | 25,00             | 14             | 5               | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 2,60             | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 2,80             | 14             | 5               | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 5,67             | 14             | 6               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 5,30             |
| dis_instance_n=20_244 | 11             | 6               | 54,55   | 0,00              | 50,00             | 12             | 6               | 50,00   | 9,09              | 50,00             | 3,08             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 3,09             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 6,79             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 6,61             |
| dis_instance_n=20_245 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 2,20             | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 2,28             | 16             | 7               | 43,75   | 23,08             | 40,00             | 4,88             | 17             | 8               | 47,06   | 30,77             | 60,00             | 4,58             |
| dis_instance_n=20_252 | 11             | 5               | 45,45   | 0,00              | 25,00             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 3,28             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 3,49             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 6,68             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 6,77             |
| dis_instance_n=20_253 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 2,87             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 2,83             | 12             | 6               | 50,00   | 9,09              | 50,00             | 6,34             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 5,75             |
| dis_instance_n=20_286 | 5              | 3               | 60,00   | 0,00              | 50,00             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,97             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,92             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 5,85             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 5,70             |
| dis_instance_n=20_294 | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 1,95             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,02             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,79             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,10             |
| dis_instance_n=20_306 | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,14             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,11             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,52             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 4,33             |
| dis_instance_n=20_319 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 3,03             | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 2,81             | 17             | 7               | 41,18   | 21,43             | 40,00             | 5,87             | 17             | 7               | 41,18   | 21,43             | 40,00             | 5,66             |
| dis_instance_n=20_327 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 3,06             | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 2,73             | 16             | 7               | 43,75   | 23,08             | 40,00             | 5,81             | 16             | 7               | 43,75   | 23,08             | 40,00             | 5,54             |
| dis_instance_n=20_339 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 3,28             | 16             | 6               | 37,50   | 23,08             | 20,00             | 3,07             | 16             | 8               | 50,00   | 23,08             | 60,00             | 6,54             | 18             | 10              | 55,56   | 38,46             | 100,00            | 6,36             |
| dis_instance_n=20_343 | 6              | 3               | 50,00   | 0,00              | 50,00             | 7              | 3               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 1,89             | 7              | 3               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 1,93             | 7              | 4               | 57,14   | 16,67             | 100,00            | 3,95             | 7              | 4               | 57,14   | 16,67             | 100,00            | 3,75             |
| dis_instance_n=20_353 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 7              | 3               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 2,97             | 7              | 3               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 2,76             | 7              | 4               | 57,14   | 16,67             | 100,00            | 6,17             | 7              | 4               | 57,14   | 16,67             | 100,00            | 5,77             |
| dis_instance_n=20_355 | 5              | 3               | 60,00   | 0,00              | 50,00             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,24             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 2,28             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 4,78             | 6              | 2               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 4,44             |
| dis_instance_n=20_358 | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 3,36             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 3,05             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 6,24             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 6,65             |
| dis_instance_n=20_364 | 4              | 2               | 50,00   | 0,00              | 0,00              | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 2,70             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 2,66             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 5,72             | 5              | 2               | 40,00   | 25,00             | 0,00              | 5,68             |
| dis_instance_n=20_368 | 3              | 2               | 66,67   | 0,00              | 100,00            | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 2,96             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 3,06             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 6,51             | 3              | 1               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 5,91             |
| dis_instance_n=20_391 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 2,65             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 2,61             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 5,56             | 14             | 7               | 50,00   | 27,27             | 75,00             | 5,42             |
| dis_instance_n=20_396 | -              | -               | -       | -                 | -                 | 14             | 6               | 42,86   | 7,69              | 20,00             | 2,03             | 14             | 6               | 42,86   | 7,69              | 20,00             | 2,00             | 15             | 7               | 46,67   | 15,38             | 40,00             | 4,15             | 16             | 8               | 50,00   | 23,08             | 60,00             | 4,02             |
| dis_instance_n=20_405 | -              |                 |         |                   |                   |                |                 |         |                   |                   |                  |                |                 |         |                   |                   |                  |                |                 |         |                   |                   |                  |                |                 |         |                   |                   |                  |

| Test Problemi         | MMDLBH-I_pos   |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-I_suc   |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-II_pos  |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-II_suc  |                 |         |                   |                   |                  |
|-----------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|
|                       | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) |
| dis_instance_n=50_12  | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 7,86             | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 7,23             | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 13,80            | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 12,71            |
| dis_instance_n=50_47  | 29             | 13              | 44,83   | 3,57              | 30,00             | 6,49             | 29             | 13              | 44,83   | 3,57              | 30,00             | 5,81             | 29             | 14              | 48,28   | 3,57              | 40,00             | 9,83             | 29             | 14              | 48,28   | 3,57              | 40,00             | 9,60             |
| dis_instance_n=50_66  | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 7,58             | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 7,27             | 14             | 6               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 13,18            | 14             | 6               | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 12,13            |
| dis_instance_n=50_71  | 14             | 6               | 42,86   | 7,69              | 20,00             | 7,52             | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 6,66             | 15             | 7               | 46,67   | 15,38             | 40,00             | 11,73            | 14             | 7               | 50,00   | 7,69              | 40,00             | 11,81            |
| dis_instance_n=50_75  | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,73             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,34             | 14             | 5               | 35,71   | 27,27             | 25,00             | 9,68             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 9,35             |
| dis_instance_n=50_77  | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 6,74             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 6,86             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 11,73            | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 10,36            |
| dis_instance_n=50_80  | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 6,60             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 6,72             | 7              | 4               | 57,14   | 0,00              | 33,33             | 10,94            | 7              | 4               | 57,14   | 0,00              | 33,33             | 10,25            |
| dis_instance_n=50_97  | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 5,87             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 5,53             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 9,73             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 9,31             |
| dis_instance_n=50_108 | 31             | 12              | 38,71   | 3,33              | 20,00             | 6,52             | 32             | 14              | 43,75   | 6,67              | 40,00             | 6,44             | 35             | 15              | 42,86   | 16,67             | 50,00             | 10,16            | 34             | 14              | 41,18   | 13,33             | 40,00             | 10,03            |
| dis_instance_n=50_115 | 29             | 12              | 41,38   | 11,54             | 33,33             | 7,16             | 29             | 12              | 41,38   | 11,54             | 33,33             | 6,74             | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 11,98            | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 11,81            |
| dis_instance_n=50_119 | 26             | 10              | 38,46   | 4,00              | 11,11             | 8,78             | 26             | 12              | 46,15   | 4,00              | 33,33             | 8,67             | 27             | 13              | 48,15   | 8,00              | 44,44             | 14,68            | 28             | 13              | 46,43   | 12,00             | 44,44             | 14,76            |
| dis_instance_n=50_120 | 29             | 10              | 34,48   | 7,41              | 11,11             | 5,14             | 29             | 11              | 37,93   | 7,41              | 22,22             | 4,74             | 31             | 13              | 41,94   | 14,81             | 44,44             | 8,59             | 30             | 12              | 40,00   | 11,11             | 33,33             | 7,82             |
| dis_instance_n=50_134 | 15             | 7               | 46,67   | 7,14              | 40,00             | 5,92             | 15             | 6               | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 5,86             | 15             | 7               | 46,67   | 7,14              | 40,00             | 9,80             | 15             | 8               | 53,33   | 7,14              | 60,00             | 9,28             |
| dis_instance_n=50_165 | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,92             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,51             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 9,70             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 9,77             |
| dis_instance_n=50_168 | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 7,93             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 7,91             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 13,26            | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 13,33            |
| dis_instance_n=50_173 | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 5,94             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 6,24             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 10,46            | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 10,21            |
| dis_instance_n=50_177 | 29             | 11              | 37,93   | 7,41              | 22,22             | 8,63             | 29             | 10              | 34,48   | 7,41              | 11,11             | 8,04             | 31             | 14              | 45,16   | 14,81             | 55,56             | 13,74            | 30             | 14              | 46,67   | 11,11             | 55,56             | 13,16            |
| dis_instance_n=50_185 | 29             | 12              | 41,38   | 11,54             | 33,33             | 8,51             | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 8,42             | 29             | 14              | 48,28   | 11,54             | 55,56             | 14,39            | 30             | 13              | 43,33   | 15,38             | 44,44             | 13,92            |
| dis_instance_n=50_193 | 31             | 12              | 38,71   | 10,71             | 20,00             | 7,16             | 31             | 11              | 35,48   | 10,71             | 10,00             | 6,74             | 32             | 15              | 46,88   | 14,29             | 50,00             | 11,28            | 33             | 16              | 48,48   | 17,86             | 60,00             | 10,91            |
| dis_instance_n=50_202 | 9              | 3               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 7,79             | 9              | 3               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 7,18             | 9              | 3               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 12,26            | 9              | 3               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 12,61            |
| dis_instance_n=50_216 | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 6,81             | 14             | 5               | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 6,81             | 15             | 6               | 40,00   | 25,00             | 50,00             | 11,86            | 15             | 6               | 40,00   | 25,00             | 50,00             | 11,36            |
| dis_instance_n=50_220 | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,35             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,04             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 9,23             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 8,22             |
| dis_instance_n=50_234 | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 5,14             | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 4,84             | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 8,18             | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 7,66             |
| dis_instance_n=50_260 | 31             | 13              | 41,94   | 10,71             | 30,00             | 7,96             | 31             | 13              | 41,94   | 10,71             | 30,00             | 7,57             | 31             | 12              | 38,71   | 10,71             | 20,00             | 13,18            | 31             | 12              | 38,71   | 10,71             | 20,00             | 12,01            |
| dis_instance_n=50_263 | 30             | 12              | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 6,04             | 29             | 11              | 37,93   | 3,57              | 10,00             | 5,68             | 33             | 16              | 48,48   | 17,86             | 60,00             | 10,20            | 32             | 15              | 46,88   | 14,29             | 50,00             | 10,06            |
| dis_instance_n=50_282 | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 5,64             | 13             | 6               | 46,15   | 8,33              | 50,00             | 5,05             | 14             | 7               | 50,00   | 16,67             | 75,00             | 9,25             | 14             | 7               | 50,00   | 16,67             | 75,00             | 9,03             |
| dis_instance_n=50_295 | 18             | 8               | 44,44   | 12,50             | 33,33             | 5,55             | 17             | 7               | 41,18   | 6,25              | 16,67             | 5,22             | 18             | 7               | 38,89   | 12,50             | 16,67             | 9,01             | 19             | 7               | 36,84   | 18,75             | 16,67             | 9,33             |
| dis_instance_n=50_303 | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 5,57             | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 5,09             | 10             | 4               | 40,00   | 25,00             | 33,33             | 8,78             | 10             | 5               | 50,00   | 25,00             | 66,67             | 8,48             |
| dis_instance_n=50_333 | 30             | 11              | 36,67   | 7,14              | 10,00             | 7,09             | 31             | 12              | 38,71   | 10,71             | 20,00             | 6,74             | 32             | 13              | 40,63   | 14,29             | 30,00             | 11,39            | 32             | 14              | 43,75   | 14,29             | 40,00             | 11,47            |
| dis_instance_n=50_341 | 29             | 10              | 34,48   | 7,41              | 11,11             | 7,31             | 30             | 11              | 36,67   | 11,11             | 22,22             | 6,74             | 31             | 12              | 38,71   | 14,81             | 33,33             | 12,22            | 32             | 12              | 37,50   | 18,52             | 33,33             | 11,13            |
| dis_instance_n=50_348 | 32             | 14              | 43,75   | 6,67              | 40,00             | 7,30             | 31             | 15              | 48,39   | 3,33              | 50,00             | 7,01             | 30             | 12              | 40,00   | 0,00              | 20,00             | 11,17            | 30             | 13              | 43,33   | 0,00              | 30,00             | 10,80            |
| dis_instance_n=50_361 | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 7,96             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 7,35             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 12,69            | 12             | 6               | 50,00   | 9,09              | 50,00             | 12,75            |
| dis_instance_n=50_363 | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 5,16             | 12             | 5               | 41,67   | 9,09              | 25,00             | 4,96             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 7,98             | 13             | 6               | 46,15   | 18,18             | 50,00             | 7,79             |
| dis_instance_n=50_366 | 14             | 6               | 42,86   | 7,69              | 20,00             | 6,95             | 14             | 7               | 50,00   | 7,69              | 40,00             | 6,34             | 15             | 8               | 53,33   | 15,38             | 60,00             | 11,17            | 15             | 9               | 60,00   | 15,38             | 80,00             | 11,69            |
| dis_instance_n=50_372 | 11             | 4               | 36,36   | 10,00             | 0,00              | 7,51             | 11             | 4               | 36,36   | 10,00             | 0,00              | 6,91             | 12             | 4               | 33,33   | 20,00             | 0,00              | 12,31            | 11             | 4               | 36,36   | 10,00             | 0,00              | 11,66            |
| dis_instance_n=50_426 | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,78             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,38             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 9,38             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 9,63             |
| dis_instance_n=50_434 | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 5,80             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 5,51             | 13             | 5               | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 10,40            | 14             | 6               | 42,86   | 27,27             | 50,00             | 10,15            |
| dis_instance_n=50_441 | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 7,95             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 7,95             | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 13,31            | 12             | 4               | 33,33   | 9,09              | 0,00              | 13,93            |
| dis_instance_n=50_451 | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,69             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,35             | 9              | 4               | 44,44   | 12,50             | 33,33             | 9,70             | 9              | 4               | 44,44   | 12,50             | 33,33             | 9,29             |
| dis_instance_n=50_456 | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 6,00             | 9              | 3               | 33,33   | 12,50             | 0,00              | 5,76             | 9              | 4               | 44,44   | 12,50             | 33,33             | 9,46             | 9              | 4               | 44,44   | 12,50             | 33,33             | 9,52             |
| dis_instance_n=50_459 | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 7,08             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 7,36             | 8              | 4               | 50,00   | 14,29             | 33,33             | 11,97            | 8              | 4               | 50,00   | 14,29             | 33,33             | 12,16            |
| dis_instance_n=50_462 | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 7,74             | 8              | 3               | 37,50   | 14,29             | 0,00              | 7,43             | 9              | 3               | 33,33   | 28,57             | 0,00              | 12,58            | 9              | 3               | 33,33   | 28,57             | 0,00              | 12,04            |
| dis_instance_n=50_463 | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 7,96             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 7,41             | 8              | 4               | 50,00   | 0,00              | 33,33             | 13,18            | 8              | 4               | 50,00   | 0,00              | 33,33             | 12,12            |
| dis_instance_n=50_464 | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 5,49             | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 5,59             | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 9,47             | 6              | 2               | 33,33   | 0,00              | 0,00              | 9,24             |
| dis_instance_n=50_465 | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,67             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 5,96             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 9,39             | 8              | 3               | 37,50   | 0,00              | 0,00              | 9,46             |
| dis_instance_n=50_466 | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 8,17             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 8,00             | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 14,09            | 7              | 3               | 42,86   | 0,00              | 0,00              | 13,50            |
| dis_instance_n=50_488 | 30             | 11              | 36,67   | 7,14              | 10,00             | 5,72             | 31             | 11              | 35,48   | 10,71             | 10,00             | 5,89             | 33             | 12              | 36,36   | 17,86             | 20,00             | 9,97             | 34             | 12              | 35,29   | 21,43             | 20,00             | 9,73             |
| dis_instance_n=50_493 | 29             | 10              | 34,48   | 7,41              | 11,11             | 8,29             | 30             | 10              | 33,33   | 11,11             | 11,11             | 8,45             | 30             | 11              | 36,67   | 11,11             | 22,22             | 14,87            | 31             | 11              | 35,48   | 14,81             | 22,22             | 13,69            |
| dis_instance_n=50_505 | 13             | 5               | 38,46   | 8,33              | 25,00             | 6,27             | 14             | 5               | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 5,73             | 15             | 5               | 33,33   | 25,00             | 25,00             | 10,08            | 16             | 5               | 31,25   | 33,33             | 25,00             | 9,56             |
| dis_instance_n=50_514 | 13             | 6               | 46,15   | 8,33              | 50,00             | 5,26             | 13             | 6               | 46,15   | 8,33              | 50,00             | 4,81             | 14             | 7               | 50,00   | 16,67             | 75,00             | 8,54             | 14             | 7               | 50,00   | 16,67             | 75,00             | 7,93             |

Şekil D.2 : Orta ölçekli problem çözümleri.

| Test Problemi          | MMDLBH-I_pos   |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-I_suc   |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-II_pos  |                 |         |                   |                   |                  | MMDLBH-II_suc  |                 |         |                   |                   |                  |
|------------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|------------------|
|                        | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) | çalışan sayısı | istasyon sayısı | SUF (%) | LBW (%)'den sapma | LBS (%)'den sapma | CPU Zamanı (sn.) |
| dis_instance_n=100_1   | 24             | 8               | 33,33   | 4,35              | 0,00              | 40,91            | 25             | 9               | 36,00   | 8,70              | 12,50             | 40,61            | 25             | 10              | 40,00   | 8,70              | 25,00             | 57,62            | 25             | 11              | 44,00   | 8,70              | 37,50             | 58,53            |
| dis_instance_n=100_6   | 25             | 9               | 36,00   | 13,64             | 12,50             | 23,82            | 24             | 9               | 37,50   | 9,09              | 12,50             | 24,93            | 27             | 11              | 40,74   | 22,73             | 37,50             | 34,56            | 27             | 11              | 40,74   | 22,73             | 37,50             | 36,88            |
| dis_instance_n=100_7   | 28             | 10              | 35,71   | 7,69              | 11,11             | 43,41            | 31             | 11              | 35,48   | 19,23             | 22,22             | 40,61            | 30             | 11              | 36,67   | 15,38             | 22,22             | 63,60            | 30             | 10              | 33,33   | 15,38             | 11,11             | 63,33            |
| dis_instance_n=100_18  | 21             | 8               | 38,10   | 10,53             | 14,29             | 43,39            | 20             | 7               | 35,00   | 5,26              | 0,00              | 41,81            | 23             | 8               | 34,78   | 21,05             | 14,29             | 63,62            | 23             | 8               | 34,78   | 21,05             | 14,29             | 64,00            |
| dis_instance_n=100_21  | 22             | 9               | 40,91   | 4,76              | 28,57             | 33,16            | 23             | 9               | 39,13   | 9,52              | 28,57             | 31,08            | 21             | 8               | 38,10   | 0,00              | 14,29             | 46,74            | 21             | 10              | 47,62   | 0,00              | 42,86             | 45,37            |
| dis_instance_n=100_44  | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 24,28            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 23,45            | 17             | 6               | 35,29   | 21,43             | 20,00             | 35,21            | 18             | 6               | 33,33   | 28,57             | 20,00             | 35,02            |
| dis_instance_n=100_63  | 63             | 22              | 34,92   | 3,28              | 4,76              | 41,62            | 69             | 24              | 34,78   | 13,11             | 14,29             | 40,10            | 69             | 30              | 43,48   | 13,11             | 42,86             | 61,65            | 69             | 31              | 44,93   | 13,11             | 47,62             | 60,97            |
| dis_instance_n=100_82  | 22             | 8               | 36,36   | 4,76              | 14,29             | 28,27            | 22             | 8               | 36,36   | 4,76              | 14,29             | 26,71            | 23             | 10              | 43,48   | 9,52              | 42,86             | 42,67            | 23             | 10              | 43,48   | 9,52              | 42,86             | 42,04            |
| dis_instance_n=100_106 | 16             | 7               | 43,75   | 14,29             | 40,00             | 25,06            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 25,70            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 38,61            | 15             | 7               | 46,67   | 7,14              | 40,00             | 36,92            |
| dis_instance_n=100_112 | 14             | 6               | 42,86   | 7,69              | 20,00             | 39,69            | 15             | 6               | 40,00   | 15,38             | 20,00             | 38,65            | 15             | 7               | 46,67   | 15,38             | 40,00             | 55,87            | 15             | 7               | 46,67   | 15,38             | 40,00             | 60,26            |
| dis_instance_n=100_124 | 16             | 7               | 43,75   | 6,67              | 40,00             | 27,26            | 17             | 6               | 35,29   | 13,33             | 20,00             | 27,11            | 18             | 6               | 33,33   | 20,00             | 20,00             | 41,55            | 18             | 9               | 50,00   | 20,00             | 80,00             | 41,33            |
| dis_instance_n=100_132 | 59             | 22              | 37,29   | 5,36              | 15,79             | 38,56            | 58             | 21              | 36,21   | 3,57              | 10,53             | 37,18            | 63             | 24              | 38,10   | 12,50             | 26,32             | 52,73            | 62             | 23              | 37,10   | 10,71             | 21,05             | 52,51            |
| dis_instance_n=100_134 | 55             | 20              | 36,36   | 5,77              | 11,11             | 28,78            | 59             | 21              | 35,59   | 13,46             | 16,67             | 26,39            | 60             | 23              | 38,33   | 15,38             | 27,78             | 38,89            | 60             | 24              | 40,00   | 15,38             | 33,33             | 38,71            |
| dis_instance_n=100_136 | 51             | 19              | 37,25   | 4,08              | 11,76             | 30,52            | 50             | 18              | 36,00   | 2,04              | 5,88              | 30,03            | 52             | 22              | 42,31   | 6,12              | 29,41             | 43,40            | 51             | 21              | 41,18   | 4,08              | 23,53             | 42,05            |
| dis_instance_n=100_137 | 52             | 18              | 34,62   | 4,00              | 5,88              | 42,78            | 53             | 20              | 37,74   | 6,00              | 17,65             | 42,05            | 54             | 21              | 38,89   | 8,00              | 23,53             | 57,29            | 54             | 22              | 40,74   | 8,00              | 29,41             | 59,43            |
| dis_instance_n=100_144 | 49             | 20              | 40,82   | 4,26              | 25,00             | 42,05            | 51             | 21              | 41,18   | 8,51              | 31,25             | 40,52            | 51             | 19              | 37,25   | 8,51              | 18,75             | 64,12            | 50             | 20              | 40,00   | 6,38              | 25,00             | 62,97            |
| dis_instance_n=100_157 | 29             | 12              | 41,38   | 11,54             | 33,33             | 31,56            | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 31,35            | 30             | 15              | 50,00   | 15,38             | 66,67             | 44,88            | 30             | 15              | 50,00   | 15,38             | 66,67             | 46,00            |
| dis_instance_n=100_158 | 25             | 9               | 36,00   | 8,70              | 12,50             | 27,40            | 25             | 10              | 40,00   | 8,70              | 25,00             | 27,50            | 26             | 10              | 38,46   | 13,04             | 25,00             | 40,52            | 26             | 10              | 38,46   | 13,04             | 25,00             | 38,38            |
| dis_instance_n=100_172 | 26             | 9               | 34,62   | 8,33              | 12,50             | 36,96            | 27             | 10              | 37,04   | 12,50             | 25,00             | 38,95            | 28             | 11              | 39,29   | 16,67             | 37,50             | 57,48            | 27             | 10              | 37,04   | 12,50             | 25,00             | 49,81            |
| dis_instance_n=100_175 | 27             | 9               | 33,33   | 3,85              | 0,00              | 40,70            | 28             | 10              | 35,71   | 7,69              | 11,11             | 42,05            | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 62,66            | 28             | 11              | 39,29   | 7,69              | 22,22             | 59,43            |
| dis_instance_n=100_180 | 16             | 6               | 37,50   | 6,67              | 20,00             | 27,32            | 18             | 7               | 38,89   | 20,00             | 40,00             | 25,85            | 18             | 8               | 44,44   | 20,00             | 60,00             | 37,32            | 18             | 8               | 44,44   | 20,00             | 60,00             | 39,03            |
| dis_instance_n=100_184 | 15             | 6               | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 35,63            | 15             | 7               | 46,67   | 7,14              | 40,00             | 35,41            | 15             | 8               | 53,33   | 7,14              | 60,00             | 55,41            | 15             | 8               | 53,33   | 7,14              | 60,00             | 53,07            |
| dis_instance_n=100_206 | 52             | 18              | 34,62   | 4,00              | 5,88              | 35,02            | 55             | 20              | 36,36   | 10,00             | 17,65             | 34,10            | 56             | 24              | 42,86   | 12,00             | 41,18             | 49,32            | 58             | 26              | 44,83   | 16,00             | 52,94             | 51,05            |
| dis_instance_n=100_216 | 51             | 18              | 35,29   | 0,00              | 5,88              | 31,21            | 52             | 19              | 36,54   | 1,96              | 11,76             | 30,71            | 54             | 23              | 42,59   | 5,88              | 35,29             | 46,61            | 55             | 23              | 41,82   | 7,84              | 35,29             | 45,93            |
| dis_instance_n=100_235 | 29             | 11              | 37,93   | 11,54             | 22,22             | 35,72            | 28             | 10              | 35,71   | 7,69              | 11,11             | 34,78            | 32             | 12              | 37,50   | 23,08             | 33,33             | 49,30            | 33             | 12              | 36,36   | 26,92             | 33,33             | 52,07            |
| dis_instance_n=100_236 | 24             | 9               | 37,50   | 9,09              | 12,50             | 40,53            | 25             | 10              | 40,00   | 13,64             | 25,00             | 39,46            | 25             | 12              | 48,00   | 13,64             | 50,00             | 59,45            | 25             | 13              | 52,00   | 13,64             | 62,50             | 57,42            |
| dis_instance_n=100_263 | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 28,38            | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 30,56            | 15             | 6               | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 42,91            | 15             | 6               | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 40,16            |
| dis_instance_n=100_318 | 22             | 8               | 36,36   | 4,76              | 14,29             | 30,62            | 23             | 9               | 39,13   | 9,52              | 28,57             | 31,65            | 23             | 11              | 47,83   | 9,52              | 57,14             | 44,43            | 23             | 11              | 47,83   | 9,52              | 57,14             | 45,11            |
| dis_instance_n=100_332 | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 30,35            | 15             | 6               | 40,00   | 7,14              | 20,00             | 28,73            | 16             | 7               | 43,75   | 14,29             | 40,00             | 40,66            | 16             | 7               | 43,75   | 14,29             | 40,00             | 39,65            |
| dis_instance_n=100_344 | 17             | 6               | 35,29   | 13,33             | 20,00             | 38,83            | 18             | 6               | 33,33   | 20,00             | 20,00             | 38,55            | 18             | 6               | 33,33   | 20,00             | 20,00             | 52,48            | 18             | 6               | 33,33   | 20,00             | 20,00             | 51,01            |
| dis_instance_n=100_348 | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 29,71            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 29,51            | 17             | 6               | 35,29   | 21,43             | 20,00             | 39,77            | 17             | 6               | 35,29   | 21,43             | 20,00             | 40,00            |
| dis_instance_n=100_357 | 56             | 20              | 35,71   | 5,66              | 11,11             | 25,58            | 57             | 20              | 35,09   | 7,55              | 11,11             | 24,94            | 55             | 23              | 41,82   | 3,77              | 27,78             | 38,23            | 59             | 24              | 40,68   | 11,32             | 33,33             | 38,03            |
| dis_instance_n=100_362 | 58             | 22              | 37,93   | 1,75              | 15,79             | 25,32            | 57             | 21              | 36,84   | 0,00              | 10,53             | 24,94            | 65             | 22              | 33,85   | 14,04             | 15,79             | 38,61            | 65             | 22              | 33,85   | 14,04             | 15,79             | 37,18            |
| dis_instance_n=100_369 | 49             | 18              | 36,73   | 0,00              | 5,88              | 31,87            | 51             | 18              | 35,29   | 4,08              | 5,88              | 29,23            | 54             | 20              | 37,04   | 10,20             | 17,65             | 43,98            | 56             | 21              | 37,50   | 14,29             | 23,53             | 46,44            |
| dis_instance_n=100_371 | 52             | 19              | 36,54   | 1,96              | 11,76             | 43,48            | 57             | 21              | 36,84   | 11,76             | 23,53             | 41,51            | 58             | 24              | 41,38   | 13,73             | 41,18             | 59,66            | 60             | 24              | 40,00   | 17,65             | 41,18             | 56,82            |
| dis_instance_n=100_379 | 25             | 8               | 32,00   | 8,70              | 0,00              | 45,69            | 26             | 9               | 34,62   | 13,04             | 12,50             | 44,04            | 26             | 10              | 38,46   | 13,04             | 25,00             | 68,15            | 27             | 10              | 37,04   | 17,39             | 25,00             | 62,25            |
| dis_instance_n=100_381 | 26             | 9               | 34,62   | 8,33              | 12,50             | 29,42            | 28             | 10              | 35,71   | 16,67             | 25,00             | 26,71            | 29             | 10              | 34,48   | 20,83             | 25,00             | 43,50            | 29             | 10              | 34,48   | 20,83             | 25,00             | 41,23            |
| dis_instance_n=100_384 | 27             | 10              | 37,04   | 8,00              | 11,11             | 38,14            | 29             | 10              | 34,48   | 16,00             | 11,11             | 36,40            | 30             | 12              | 40,00   | 20,00             | 33,33             | 55,34            | 31             | 12              | 38,71   | 24,00             | 33,33             | 49,88            |
| dis_instance_n=100_390 | 24             | 9               | 37,50   | 9,09              | 12,50             | 32,13            | 26             | 10              | 38,46   | 18,18             | 25,00             | 30,71            | 26             | 11              | 42,31   | 18,18             | 37,50             | 42,61            | 27             | 11              | 40,74   | 22,73             | 37,50             | 45,93            |
| dis_instance_n=100_391 | 21             | 8               | 38,10   | 5,00              | 14,29             | 26,53            | 23             | 9               | 39,13   | 15,00             | 28,57             | 26,36            | 24             | 9               | 37,50   | 20,00             | 28,57             | 35,51            | 24             | 9               | 37,50   | 20,00             | 28,57             | 35,70            |
| dis_instance_n=100_397 | 28             | 10              | 35,71   | 12,00             | 11,11             | 37,04            | 31             | 11              | 35,48   | 24,00             | 22,22             | 37,16            | 32             | 12              | 37,50   | 28,00             | 33,33             | 53,76            | 32             | 13              | 40,63   | 28,00             | 44,44             | 54,59            |
| dis_instance_n=100_400 | 26             | 9               | 34,62   | 8,33              | 12,50             | 33,29            | 26             | 9               | 34,62   | 8,33              | 12,50             | 30,51            | 26             | 11              | 42,31   | 8,33              | 37,50             | 46,87            | 27             | 11              | 40,74   | 12,50             | 37,50             | 48,53            |
| dis_instance_n=100_417 | 16             | 6               | 37,50   | 6,67              | 20,00             | 33,97            | 17             | 7               | 41,18   | 13,33             | 40,00             | 32,44            | 17             | 8               | 47,06   | 13,33             | 60,00             | 47,36            | 17             | 8               | 47,06   | 13,33             | 60,00             | 49,04            |
| dis_instance_n=100_419 | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 37,84            | 16             | 7               | 43,75   | 14,29             | 40,00             | 33,67            | 16             | 8               | 50,00   | 14,29             | 60,00             | 53,32            | 16             | 8               | 50,00   | 14,29             | 60,00             | 48,50            |
| dis_instance_n=100_427 | 55             | 19              | 34,55   | 1,85              | 5,56              | 25,96            | 58             | 21              | 36,21   | 7,41              | 16,67             | 22,91            | 58             | 22              | 37,93   | 7,41              | 22,22             | 36,58            | 58             | 23              | 39,66   | 7,41              | 27,78             | 34,97            |
| dis_instance_n=100_435 | 54             | 19              | 35,19   | 3,85              | 5,56              | 42,05            | 57             | 21              | 36,84   | 9,62              | 16,67             | 41,35            | 59             | 24              | 40,68   | 13,46             | 33,33             | 62,88            | 60             | 25              | 41,67   | 15,38             | 38,89             | 62,62            |
| dis_instance_n=100_441 | 53             | 18              | 33,96   | 3,92              | 5,88              | 34,99            | 58             | 21              | 36,21   | 13,73             | 23,53             | 31,47            | 60             | 25              | 41,67   | 17,65             | 47,06             | 48,33            | 61             | 26              | 42,62   | 19,61             | 52,94             | 47,16            |
| dis_instance_n=100_443 | 55             | 19              | 34,55   | 3,77              | 5,56              | 34,67            | 59             | 20              | 33,90   | 11,32             | 11,11             | 33,09            | 62             | 21              | 33,87   | 16,98             | 16,67             | 50,31            | 62             | 22              | 35,48   | 16,98             | 22,22             | 50,08            |
| dis_instance_n=100_483 | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 25,71            | 15             | 5               | 33,33   | 7,14              | 0,00              | 27,15            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 40,01            | 16             | 6               | 37,50   | 14,29             | 20,00             | 39,41            |
| dis_instance_n=100_506 | 54             | 19              | 35,19   | 0,00              | 5,56              | 37,48            | 54             | 20              | 37,04   | 0,00              | 11,11             | 34,73            | 55             | 20              | 36,36   | 1,85              | 11,11             | 50,15            | 55             | 21              | 38,18   | 1,85              | 16,67             | 49,99            |

Şekil D.3 : Büyük ölçekli problem çözümleri.

## Ek E : Küçük, orta ve büyük ölçekli problemler için CPU zamanı sonuçları

| Test Problemi         | MMDLBH-I_pos                  |                    |                               |                    |                               |                    | MMDLBH-I_suc                  |                    |                               |                    |                               |                    | MMDLBH-II_pos                 |                    |                               |                    |                               |                    | MMDLBH-II_suc                 |                    |                               |                    |                               |                    |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
|                       | CPU Zamanı                    |                    |                               |                    |                               |                    | CPU Zamanı                    |                    |                               |                    |                               |                    | CPU Zamanı                    |                    |                               |                    |                               |                    | CPU Zamanı                    |                    |                               |                    |                               |                    |
|                       | 3 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 5 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 7 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 3 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 5 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 7 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 3 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 5 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 7 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 3 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 5 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 7 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı |
| dis_instance_n=20_10  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_15  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_20  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | 12                            | 6                  | 12                            | 6                  | -                             | -                  | 12                            | 6                  | 12                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_33  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 13                            | 6                  | -                             | -                  | 13                            | 7                  | 13                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_37  | -                             | -                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 14                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 15                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_49  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_51  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | -                             | -                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  | -                             | -                  | 4                             | 2                  | 4                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_67  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_71  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_72  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_75  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_80  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_95  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | -                             | -                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_139 | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | 6                             | 3                  | 6                             | 3                  | -                             | -                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  |
| dis_instance_n=20_145 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_168 | 11                            | 5                  | 11                            | 5                  | 11                            | 5                  | 11                            | 6                  | 11                            | 6                  | 11                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 12                            | 7                  | -                             | -                  | 12                            | 8                  | 12                            | 8                  |
| dis_instance_n=20_206 | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_210 | -                             | -                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_220 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_226 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_242 | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 14                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 14                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_244 | -                             | -                  | 12                            | 6                  | 12                            | 6                  | -                             | -                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 13                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_245 | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | -                             | -                  | 16                            | 7                  | 16                            | 7                  | -                             | -                  | 17                            | 8                  | 17                            | 8                  |
| dis_instance_n=20_252 | -                             | -                  | 13                            | 6                  | 13                            | 6                  | -                             | -                  | 13                            | 6                  | 13                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 12                            | 5                  |
| dis_instance_n=20_253 | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 12                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 13                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_286 | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_294 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_306 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_319 | -                             | -                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 17                            | 7                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 17                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_327 | -                             | -                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 16                            | 7                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 16                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_339 | -                             | -                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | -                             | -                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 16                            | 8                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 18                            | 10                 |
| dis_instance_n=20_343 | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  | 7                             | 4                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  | 7                             | 4                  |
| dis_instance_n=20_353 | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  |
| dis_instance_n=20_355 | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_358 | -                             | -                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_364 | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 5                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_368 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_391 | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 13                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 14                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_396 | 14                            | 6                  | 14                            | 6                  | 14                            | 6                  | 14                            | 6                  | 14                            | 6                  | 14                            | 6                  | -                             | -                  | 15                            | 7                  | 15                            | 7                  | -                             | -                  | 16                            | 8                  | 16                            | 8                  |
| dis_instance_n=20_405 | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | -                             | -                  | 14                            | 5                  | 14                            | 5                  | -                             | -                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_415 | -                             | -                  | 11                            | 5                  | 11                            | 5                  | -                             | -                  | 11                            | 6                  | 11                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 11                            | 7                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 11                            | 7                  |
| dis_instance_n=20_435 | 8                             | 3                  | 8                             | 3                  | 8                             | 3                  | 8                             | 3                  | 8                             | 3                  | 8                             | 3                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 9                             | 3                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 9                             | 3                  |
| dis_instance_n=20_437 | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  |
| dis_instance_n=20_444 | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_448 | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_454 | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  | -                             | -                  | 3                             | 1                  | 3                             | 1                  |
| dis_instance_n=20_477 | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 12                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | 13                            | 5                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 14                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 15                            | 6                  |
| dis_instance_n=20_484 | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 15                            | 6                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | 16                            | 6                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 16                            | 8                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 17                            | 8                  |
| dis_instance_n=20_498 | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | 7                             | 3                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  | 7                             | 4                  | -                             | -                  | 7                             | 4                  | 7                             | 4                  |
| dis_instance_n=20_513 | -                             | -                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  | -                             | -                  | -                             | -                  | 6                             | 2                  |

(-) çözüm yok

Şekil E.1 : Küçük ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları.

| Test Problemi         | MMDLBH-I_pos      |                    |                   |                    |                   |                    | MMDLBH-I_suc      |                    |                   |                    |                   |                    | MMDLBH-II_pos     |                    |                   |                    |                   |                    | MMDLBH-II_suc     |                    |                   |                    |                   |                    |
|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                       | CPU Zamanı        |                    | 5 saniye          |                    | 10 saniye         |                    | CPU Zamanı        |                    | 5 saniye          |                    | 10 saniye         |                    | CPU Zamanı        |                    | 5 saniye          |                    | 10 saniye         |                    | CPU Zamanı        |                    | 5 saniye          |                    | 10 saniye         |                    |
|                       | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı |
| dis_instance_n=20_10  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  |
| dis_instance_n=20_15  | -                 | -                  | 29                | 13                 | 29                | 13                 | -                 | -                  | 29                | 13                 | 29                | 13                 | -                 | -                  | 29                | 14                 | 29                | 14                 | -                 | -                  | 29                | 14                 | 29                | 14                 |
| dis_instance_n=20_20  | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 14                | 6                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 14                | 6                  |
| dis_instance_n=20_33  | -                 | -                  | 14                | 6                  | 14                | 6                  | -                 | -                  | 15                | 6                  | 15                | 6                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 7                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 14                | 7                  |
| dis_instance_n=20_37  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 14                | 5                  | 14                | 5                  | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  |
| dis_instance_n=20_49  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_51  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 7                 | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 7                 | 4                  |
| dis_instance_n=20_67  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_71  | -                 | -                  | 31                | 12                 | 31                | 12                 | -                 | -                  | 32                | 14                 | 32                | 14                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 35                | 15                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 34                | 14                 |
| dis_instance_n=20_72  | -                 | -                  | 29                | 12                 | 29                | 12                 | -                 | -                  | 29                | 12                 | 29                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 28                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 28                | 11                 |
| dis_instance_n=20_75  | -                 | -                  | 26                | 10                 | 26                | 10                 | -                 | -                  | 26                | 12                 | 26                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 27                | 13                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 28                | 13                 |
| dis_instance_n=20_80  | -                 | -                  | 29                | 10                 | 29                | 10                 | 29                | 11                 | 29                | 11                 | 29                | 11                 | -                 | -                  | 31                | 13                 | 31                | 13                 | -                 | -                  | 30                | 12                 | 30                | 12                 |
| dis_instance_n=20_95  | -                 | -                  | 15                | 7                  | 15                | 7                  | -                 | -                  | 15                | 6                  | 15                | 6                  | -                 | -                  | 15                | 7                  | 15                | 7                  | -                 | -                  | 15                | 8                  | 15                | 8                  |
| dis_instance_n=20_139 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_145 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_168 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_206 | -                 | -                  | 29                | 11                 | 29                | 11                 | -                 | -                  | 29                | 10                 | 29                | 10                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 31                | 14                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 30                | 14                 |
| dis_instance_n=20_210 | -                 | -                  | 29                | 12                 | 29                | 12                 | -                 | -                  | 28                | 11                 | 28                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 29                | 14                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 30                | 13                 |
| dis_instance_n=20_220 | -                 | -                  | 31                | 12                 | 31                | 12                 | -                 | -                  | 31                | 11                 | 31                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 32                | 15                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 33                | 16                 |
| dis_instance_n=20_226 | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_242 | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | 14                | 5                  | 14                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 6                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 6                  |
| dis_instance_n=20_244 | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  |
| dis_instance_n=20_245 | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_252 | -                 | -                  | 31                | 13                 | 31                | 13                 | -                 | -                  | 31                | 13                 | 31                | 13                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 31                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 31                | 12                 |
| dis_instance_n=20_253 | -                 | -                  | 30                | 12                 | 30                | 12                 | -                 | -                  | 29                | 11                 | 29                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 33                | 16                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 32                | 15                 |
| dis_instance_n=20_286 | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | -                 | -                  | 14                | 7                  | 14                | 7                  | -                 | -                  | 14                | 7                  | 14                | 7                  |
| dis_instance_n=20_294 | -                 | -                  | 18                | 8                  | 18                | 8                  | -                 | -                  | 17                | 7                  | 17                | 7                  | -                 | -                  | 18                | 7                  | 18                | 7                  | -                 | -                  | 19                | 7                  | 19                | 7                  |
| dis_instance_n=20_306 | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 10                | 4                  | 10                | 4                  | -                 | -                  | 10                | 5                  | 10                | 5                  |
| dis_instance_n=20_319 | -                 | -                  | 30                | 11                 | 30                | 11                 | -                 | -                  | 31                | 12                 | 31                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 32                | 13                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 32                | 14                 |
| dis_instance_n=20_327 | -                 | -                  | 29                | 10                 | 29                | 10                 | -                 | -                  | 30                | 11                 | 30                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 31                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 32                | 12                 |
| dis_instance_n=20_339 | -                 | -                  | 32                | 14                 | 32                | 14                 | -                 | -                  | 31                | 15                 | 31                | 15                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 30                | 12                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 30                | 13                 |
| dis_instance_n=20_343 | -                 | -                  | 12                | 5                  | 12                | 5                  | -                 | -                  | 12                | 5                  | 12                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 12                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 12                | 6                  |
| dis_instance_n=20_353 | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | 12                | 5                  | 12                | 5                  | 12                | 5                  | -                 | -                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | -                 | -                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  |
| dis_instance_n=20_355 | -                 | -                  | 14                | 6                  | 14                | 6                  | -                 | -                  | 14                | 7                  | 14                | 7                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 8                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 9                  |
| dis_instance_n=20_358 | -                 | -                  | 11                | 4                  | 11                | 4                  | -                 | -                  | 11                | 4                  | 11                | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 11                | 4                  |
| dis_instance_n=20_364 | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  |
| dis_instance_n=20_368 | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 14                | 6                  |
| dis_instance_n=20_391 | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 12                | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 12                | 4                  |
| dis_instance_n=20_396 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 4                  | 9                 | 4                  | -                 | -                  | 9                 | 4                  | 9                 | 4                  |
| dis_instance_n=20_405 | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | 9                 | 4                  | 9                 | 4                  | -                 | -                  | 9                 | 4                  | 9                 | 4                  |
| dis_instance_n=20_415 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 4                  |
| dis_instance_n=20_435 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 9                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_437 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 4                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 8                 | 4                  |
| dis_instance_n=20_444 | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  | -                 | -                  | 6                 | 2                  | 6                 | 2                  |
| dis_instance_n=20_448 | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  | -                 | -                  | 8                 | 3                  | 8                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_454 | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 7                 | 3                  |
| dis_instance_n=20_477 | -                 | -                  | 30                | 11                 | 30                | 11                 | -                 | -                  | 31                | 11                 | 31                | 11                 | -                 | -                  | 33                | 12                 | 33                | 12                 | -                 | -                  | 34                | 12                 | 34                | 12                 |
| dis_instance_n=20_484 | -                 | -                  | 29                | 10                 | 29                | 10                 | -                 | -                  | 30                | 10                 | 30                | 10                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 30                | 11                 | -                 | -                  | -                 | -                  | 31                | 11                 |
| dis_instance_n=20_498 | -                 | -                  | 13                | 5                  | 13                | 5                  | -                 | -                  | 14                | 5                  | 14                | 5                  | -                 | -                  | -                 | -                  | 15                | 5                  | -                 | -                  | 16                | 5                  | 16                | 5                  |
| dis_instance_n=20_513 | -                 | -                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | 13                | 6                  | -                 | -                  | 14                | 7                  | 14                | 7                  | -                 | -                  | 14                | 7                  | 14                | 7                  |

(-) çözümü yok

Şekil E.2 : Orta ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları.

| Test Problem          | MMDLBH-I_pos                   |                    |                                |                    |                                |                    | MMDLBH-I_suc                   |                    |                                |                    |                                |                    | MMDLBH-II_pos                  |                    |                                |                    |                                |                    | MMDLBH-II_suc                  |                    |                                |                    |                                |                    |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
|                       | CPU Zamanı                     |                    |                                |                    |                                |                    | CPU Zamanı                     |                    |                                |                    |                                |                    | CPU Zamanı                     |                    |                                |                    |                                |                    | CPU Zamanı                     |                    |                                |                    |                                |                    |
|                       | 30 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 50 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 70 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 30 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 50 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 70 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 30 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 50 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 70 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 30 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 50 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı | 70 saniye<br>çalışan<br>sayısı | istasyon<br>sayısı |
| dis_instance_n=20_10  | -                              | -                  | 24                             | 8                  | 24                             | 8                  | -                              | -                  | 25                             | 9                  | 25                             | 9                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 25                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 25                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_15  | 25                             | 9                  | 25                             | 9                  | 25                             | 9                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  | -                              | -                  | 27                             | 11                 | 27                             | 11                 | -                              | -                  | 27                             | 11                 | 27                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_20  | -                              | -                  | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | -                              | -                  | 31                             | 11                 | 31                             | 11                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 30                             | 11                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 30                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_33  | -                              | -                  | 21                             | 8                  | 21                             | 8                  | -                              | -                  | 20                             | 7                  | 20                             | 7                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 23                             | 8                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 23                             | 8                  |
| dis_instance_n=20_37  | -                              | -                  | 22                             | 9                  | 22                             | 9                  | -                              | -                  | 23                             | 9                  | 23                             | 9                  | -                              | -                  | 21                             | 8                  | 21                             | 8                  | -                              | -                  | 21                             | 10                 | 21                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_49  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  | -                              | -                  | 18                             | 6                  | 18                             | 6                  |
| dis_instance_n=20_51  | -                              | -                  | 63                             | 22                 | 63                             | 22                 | -                              | -                  | 69                             | 24                 | 69                             | 24                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 69                             | 30                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 69                             | 31                 |
| dis_instance_n=20_67  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | -                              | -                  | 23                             | 10                 | 23                             | 10                 | -                              | -                  | 23                             | 10                 | 23                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_71  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 15                             | 7                  | 15                             | 7                  |
| dis_instance_n=20_72  | -                              | -                  | 14                             | 6                  | 14                             | 6                  | -                              | -                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 15                             | 7                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 15                             | 7                  |
| dis_instance_n=20_75  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  | -                              | -                  | 18                             | 6                  | 18                             | 6                  | -                              | -                  | 18                             | 9                  | 18                             | 9                  |
| dis_instance_n=20_80  | -                              | -                  | 59                             | 22                 | 59                             | 22                 | -                              | -                  | 58                             | 21                 | 58                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 63                             | 24                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 62                             | 23                 |
| dis_instance_n=20_95  | 55                             | 20                 | 55                             | 20                 | 55                             | 20                 | 59                             | 21                 | 59                             | 21                 | 59                             | 21                 | -                              | -                  | 60                             | 23                 | 60                             | 23                 | -                              | -                  | 60                             | 24                 | 60                             | 24                 |
| dis_instance_n=20_139 | -                              | -                  | 51                             | 19                 | 51                             | 19                 | -                              | -                  | 50                             | 18                 | 50                             | 18                 | -                              | -                  | 52                             | 22                 | 52                             | 22                 | -                              | -                  | 51                             | 21                 | 51                             | 21                 |
| dis_instance_n=20_145 | -                              | -                  | 52                             | 18                 | 52                             | 18                 | -                              | -                  | 53                             | 20                 | 53                             | 20                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 54                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 54                             | 22                 |
| dis_instance_n=20_168 | -                              | -                  | 49                             | 20                 | 49                             | 20                 | -                              | -                  | 51                             | 21                 | 51                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 51                             | 19                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 50                             | 20                 |
| dis_instance_n=20_206 | -                              | -                  | 29                             | 12                 | 29                             | 12                 | -                              | -                  | 28                             | 11                 | 28                             | 11                 | -                              | -                  | 30                             | 15                 | 30                             | 15                 | -                              | -                  | 30                             | 15                 | 30                             | 15                 |
| dis_instance_n=20_210 | 25                             | 9                  | 25                             | 9                  | 25                             | 9                  | 25                             | 10                 | 25                             | 10                 | 25                             | 10                 | -                              | -                  | 26                             | 10                 | 26                             | 10                 | -                              | -                  | 26                             | 10                 | 26                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_220 | -                              | -                  | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | -                              | -                  | 27                             | 10                 | 27                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 28                             | 11                 | -                              | -                  | 27                             | 10                 | 27                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_226 | -                              | -                  | 27                             | 9                  | 27                             | 9                  | -                              | -                  | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 28                             | 11                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 28                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_242 | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | 18                             | 7                  | 18                             | 7                  | 18                             | 7                  | -                              | -                  | 18                             | 8                  | 18                             | 8                  | -                              | -                  | 18                             | 8                  | 18                             | 8                  |
| dis_instance_n=20_244 | -                              | -                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  | -                              | -                  | 15                             | 7                  | 15                             | 7                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 15                             | 8                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 15                             | 8                  |
| dis_instance_n=20_245 | -                              | -                  | 52                             | 18                 | 52                             | 18                 | -                              | -                  | 55                             | 20                 | 55                             | 20                 | -                              | -                  | 56                             | 24                 | 56                             | 24                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 58                             | 26                 |
| dis_instance_n=20_252 | -                              | -                  | 51                             | 18                 | 51                             | 18                 | -                              | -                  | 52                             | 19                 | 52                             | 19                 | -                              | -                  | 54                             | 23                 | 54                             | 23                 | -                              | -                  | 55                             | 23                 | 55                             | 23                 |
| dis_instance_n=20_253 | -                              | -                  | 29                             | 11                 | 29                             | 11                 | -                              | -                  | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | -                              | -                  | 32                             | 12                 | 32                             | 12                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 33                             | 12                 |
| dis_instance_n=20_286 | -                              | -                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  | -                              | -                  | 25                             | 10                 | 25                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 25                             | 12                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 25                             | 13                 |
| dis_instance_n=20_294 | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | -                              | -                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | -                              | -                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  | -                              | -                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  |
| dis_instance_n=20_306 | -                              | -                  | 22                             | 8                  | 22                             | 8                  | -                              | -                  | 23                             | 9                  | 23                             | 9                  | -                              | -                  | 23                             | 11                 | 23                             | 11                 | -                              | -                  | 23                             | 11                 | 23                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_319 | -                              | -                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  | 15                             | 6                  | -                              | -                  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | -                              | -                  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  |
| dis_instance_n=20_327 | -                              | -                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  | -                              | -                  | 18                             | 6                  | 18                             | 6                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 18                             | 6                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 18                             | 6                  |
| dis_instance_n=20_339 | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  | -                              | -                  | 17                             | 6                  | 17                             | 6                  |
| dis_instance_n=20_343 | 56                             | 20                 | 56                             | 20                 | 56                             | 20                 | 57                             | 20                 | 57                             | 20                 | 57                             | 20                 | -                              | -                  | 55                             | 23                 | 55                             | 23                 | -                              | -                  | 59                             | 24                 | 59                             | 24                 |
| dis_instance_n=20_353 | 58                             | 22                 | 58                             | 22                 | 58                             | 22                 | 57                             | 21                 | 57                             | 21                 | 57                             | 21                 | -                              | -                  | 65                             | 22                 | 65                             | 22                 | -                              | -                  | 65                             | 22                 | 65                             | 22                 |
| dis_instance_n=20_355 | -                              | -                  | 49                             | 18                 | 49                             | 18                 | 51                             | 18                 | 51                             | 18                 | 51                             | 18                 | -                              | -                  | 54                             | 20                 | 54                             | 20                 | -                              | -                  | 56                             | 21                 | 56                             | 21                 |
| dis_instance_n=20_358 | -                              | -                  | 52                             | 19                 | 52                             | 19                 | -                              | -                  | 57                             | 21                 | 57                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 58                             | 24                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 60                             | 24                 |
| dis_instance_n=20_364 | -                              | -                  | 25                             | 8                  | 25                             | 8                  | -                              | -                  | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 26                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 27                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_368 | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | -                              | -                  | 29                             | 10                 | 29                             | 10                 | -                              | -                  | 29                             | 10                 | 29                             | 10                 |
| dis_instance_n=20_391 | -                              | -                  | 27                             | 10                 | 27                             | 10                 | -                              | -                  | 29                             | 10                 | 29                             | 10                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 30                             | 12                 | -                              | -                  | 31                             | 12                 | 31                             | 12                 |
| dis_instance_n=20_396 | -                              | -                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  | -                              | -                  | 26                             | 10                 | 26                             | 10                 | -                              | -                  | 26                             | 11                 | 26                             | 11                 | -                              | -                  | 27                             | 11                 | 27                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_405 | 21                             | 8                  | 21                             | 8                  | 21                             | 8                  | 23                             | 9                  | 23                             | 9                  | 23                             | 9                  | -                              | -                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  | -                              | -                  | 24                             | 9                  | 24                             | 9                  |
| dis_instance_n=20_415 | -                              | -                  | 28                             | 10                 | 28                             | 10                 | -                              | -                  | 31                             | 11                 | 31                             | 11                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 32                             | 12                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 32                             | 13                 |
| dis_instance_n=20_435 | -                              | -                  | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | -                              | -                  | 26                             | 9                  | 26                             | 9                  | -                              | -                  | 26                             | 11                 | 26                             | 11                 | -                              | -                  | 27                             | 11                 | 27                             | 11                 |
| dis_instance_n=20_437 | -                              | -                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 17                             | 7                  | 17                             | 7                  | -                              | -                  | 17                             | 8                  | 17                             | 8                  | -                              | -                  | 17                             | 8                  | 17                             | 8                  |
| dis_instance_n=20_444 | -                              | -                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | -                              | -                  | 16                             | 7                  | 16                             | 7                  | -                              | -                  | -                              | -                  | 16                             | 8                  | -                              | -                  | 16                             | 8                  | 16                             | 8                  |
| dis_instance_n=20_448 | 55                             | 19                 | 55                             | 19                 | 55                             | 19                 | 58                             | 21                 | 58                             | 21                 | 58                             | 21                 | -                              | -                  | 58                             | 22                 | 58                             | 22                 | -                              | -                  | 58                             | 23                 | 58                             | 23                 |
| dis_instance_n=20_454 | -                              | -                  | 54                             | 19                 | 54                             | 19                 | -                              | -                  | 57                             | 21                 | 57                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 59                             | 24                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 60                             | 25                 |
| dis_instance_n=20_477 | -                              | -                  | 53                             | 18                 | 53                             | 18                 | -                              | -                  | 58                             | 21                 | 58                             | 21                 | -                              | -                  | 60                             | 25                 | 60                             | 25                 | -                              | -                  | 61                             | 26                 | 61                             | 26                 |
| dis_instance_n=20_484 | -                              | -                  | 55                             | 19                 | 55                             | 19                 | -                              | -                  | 59                             | 20                 | 59                             | 20                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 62                             | 21                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 62                             | 22                 |
| dis_instance_n=20_498 | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | 15                             | 5                  | -                              | -                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  | -                              | -                  | 16                             | 6                  | 16                             | 6                  |
| dis_instance_n=20_513 | -                              | -                  | 54                             | 19                 | 54                             | 19                 | -                              | -                  | 54                             | 20                 | 54                             | 20                 | -                              | -                  | -                              | -                  | 55                             | 20                 | -                              | -                  | 55                             | 21                 | 55                             | 21                 |

(-) çözüm yok

Şekil E.3 : Büyük ölçekli problem için CPU zamanı sonuçları.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Dicle Aslan  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 1989 / Konak  
**E-posta** : dicletosunlar@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2014, Koç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında İTÜ Endüstri Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra 2014 yılında Koç Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümü yüksek lisans programından mezun oldu.
- 2013 yılı itibari ile özel sektörde çalışmaya devam etmektedir.

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Çevikcan, E., **Aslan, D.** ve Yeni, F. B. 2019. Disassembly line design with multi-manned workstations: a novel heuristic optimization approach. *International Journal of Production Research*.

