

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ VE TEDARİK ZİNCİRİNİN
BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK PLANLAMA VE ÇİZELGELEME
SİSTEMİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Beren GÜRSOY YILMAZ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

MAYIS 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ VE TEDARİK ZİNCİRİNİN
BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK PLANLAMA VE ÇİZELGELEME
SİSTEMİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

**Beren GÜRSOY YILMAZ
(507212104)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Emre ÇEVİKCAN

MAYIS 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF A PLANNING AND SCHEDULING SYSTEM FOR THE
INTEGRATION OF SERU PRODUCTION SYSTEMS AND THE SUPPLY
CHAIN**

Ph.D. THESIS

**Beren GÜRSOY YILMAZ
(507212104)**

Department of Industrial Engineering

Industrial Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. EMRE ÇEVİKCAN

MAY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 507212104 numaralı Doktora Öğrencisi Beren GÜRSOY YILMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ VE TEDARİK ZİNCİRİNİN BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK PLANLAMA VE ÇİZELGELEME SİSTEMİ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Alp ÜSTÜNDAĞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şule İtir SATOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İhsan KAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin Selçuk KILIÇ
Marmara Üniversitesi Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mart 2025
Savunma Tarihi : 09 Mayıs 2025





Aileme,



ÖNSÖZ

Günümüz tüketim çağında, talep yapılarındaki hızlı değişim, yenilikçi ve hızlı adapte olabilen üretim sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, Seru Üretim Sistemleri, yeniden yapılandırılabilme yeteneği ve çalışan odaklı yapısıyla geleneksel üretim hatlarına kıyasla önemli avantajlar sunmakta ve giderek daha fazla tercih edilmektedir. Seru üretim sistemleri, sağladığı esneklik ve üretim gücü sayesinde işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır. Bu tür üretim sistemlerinde, uygun parti büyüklüğünün belirlenmesi ve çalışanların doğru çizelgelenmesi, üretim performansını doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Ayrıca, üretim süreçlerinin tedarik zinciri faaliyetleri ile entegre bir şekilde ele alınması, tüm sistemin verimliliğini ve etkinliğini artıran önemli bir unsurdur.

Üretim planlamasının dağıtım süreçleriyle uyumlu hale getirilmesi, ürünlerin müşterilere zamanında ve sorunsuz bir şekilde ulaştırılmasını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu çalışma, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin kullanıldığı seru üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele almakta ve bu problem için çözüm yöntemleri sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında beni her zaman yönlendiren ve destekleyen değerli danışmanım Prof. Dr. Emre ÇEVİKCAN'a, bilgisinden sıkça faydalandığım sayın Doç. Dr. Ömer Faruk YILMAZ'a, doktora sürecimde 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı ve 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs programı ile finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK), manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2025

Beren GÜRSOY YILMAZ
(Endüstri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ.....	7
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	11
4. PROBLEM TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL....	19
4.1 Problemin Tanımlanması	19
4.2 Matematiksel Programlama Modeli	21
4.3 Sayısal Örnek	30
5. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALAR.....	35
5.1 Kromozom Kodlama ve Çözümleme	42
5.2 Başlangıç Popülasyonu Oluşturma.....	45
5.3 Algoritma Operatörleri	46
6. HESAPLAMALI ANALİZLER	51
6.1 Deney Tasarımı	51
6.2 GA ve YAK için Parametre Değerlerinin Belirlenmesi	52
6.3 Karşılaştırmalı Analizler	54
6.4 Bulgular ve Yönetimsel Çıkarımlar	73
7. SONUÇLAR VE GELECEK ARAŞTIRMALAR.....	81
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	91



KISALTMALAR

AS	: Araştırma Sorusu
ANOVA	: Analysis of Variance- Varyans Analizi
BYS	: Bağlı Yüzde Sapma
CPU	: Central Processing Unit- Merkezi İşlem Birimi
ÇNÇ	: Çift Noktalı Çaprazlama
EUf	: Eniyi Uygunluk Fonksiyonu
GA	: Genetik Algoritma
NP	: Non-polynomial- Belirlenimsiz problemler
OTS	: Ortalama Temin Süresi
SÜS	: Serü Üretim Sistemleri
S/N	: Sinyal-Gürültü Oranı
UF	: Uygunluk Fonksiyonu
TNÇ	: Tek Noktalı Çaprazlama
YAK	: Yapay Arı Kolonisi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: SÜS ile ilgili literatür çalışmaları.....	16
Çizelge 4.1 : Senaryo sonuçları.	31
Çizelge 6.1 : Seviyeleri ve diğer parametreleriyle birlikte kontrol edilebilir faktörler.	52
Çizelge 6.2 : Seviyeleriyle birlikte hiperparametreler ve Taguchi tasarım sonuçları.	53
Çizelge 6.3 : YAK yaklaşımlarının BYS değerleri..	59
Çizelge 6.4 : GA yaklaşımlarının BYS değerleri.	62
Çizelge 6.5 : YAK14 yaklaşımına göre üç yönlü ANOVA sonuçları.	69



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Seru Türleri.....	8
Şekil 3.1 : SÜS'ü ele alan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Scopus, 2025).....	11
Şekil 3.2 : SÜS alanında yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı (Scopus, 2025).	12
Şekil 3.3 : SÜS alanında yapılan çalışmaların türü (Scopus, 2025).	12
Şekil 4.1 : Problemin görselleştirilmesi.	21
Şekil 4.2 : Senaryolara ait stratejiler ve modüller.....	30
Şekil 4.3 : Senaryo sonuçlarının çizelgelenmesi ve karar değişkenleri.....	33
Şekil 5.1 : Geliştirilen GA tabanlı algoritmalar için sözde kodlar.	36
Şekil 5.2 : Geliştirilen YAK tabanlı algoritmalar için sözde kodlar.....	37
Şekil 5.3 : Stratejiler ve çözüm yaklaşımları.	41
Şekil 5.4 : Örnek kromozom yapısı	43
Şekil 5.5 : Kromozom çözümlemeye ait sözde kodlar.	44
Şekil 5.6 : Kromozom çözümleme sonucu elde edilen çizelge.	45
Şekil 5.7 : Başlangıç popülasyonu oluşturma operatörünün sözde kodları.	45
Şekil 5.8 : Çaprazlama operatörü için sözde kodlar.	48
Şekil 5.9 : Mutasyon operatörü için sözde kodlar.	49
Şekil 5.10 : Örnek çaprazlama ve mutasyon operatörleri.....	49
Şekil 6.1 : S/N oranları için ana etki grafiği	54
Şekil 6.2 : YAK ve GA yaklaşımlarının karşılaştırılması için kutu grafikleri.	55
Şekil 6.3 : CPU değerlerinin algoritmalar bazında karşılaştırılması.	56
Şekil 6.4 : Çaprazlama operatörlerinin karşılaştırıldığı kutu grafikleri.	56
Şekil 6.5 : YAK yaklaşımlarının farklı Δ değerleri için kutu grafikleri.	65
Şekil 6.6 : GA yaklaşımlarının farklı Δ değerleri için kutu grafikleri.	66
Şekil 6.7 : Ortalama kullanılan araç sayısı.	67
Şekil 6.8 : Ortalama çalışan sayısı.....	67
Şekil 6.9 : YAK14 için ana etki grafikleri.	71
Şekil 6.10 : YAK14 için etkileşim grafikleri.....	72



SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ VE TEDARİK ZİNCİRİNİN BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK PLANLAMA VE ÇİZELGELEME SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Küresel rekabetin artması ve tüketici taleplerinin giderek daha dinamik bir hale gelmesi, üretim sistemlerinin esneklik ve adaptasyon yeteneklerini ön plana çıkarmaktadır. Geleneksel montaj hatları, değişken talep yapısına uyum sağlayamaması ve dengesiz iş yükü dağılımları nedeniyle dalgalanan talep koşulları altında yetersiz kalmakta, bu durum işletmeleri daha esnek üretim sistemleri arayışına yönlendirmektedir. Bu bağlamda, Seru Üretim Sistemleri (SÜS), yeniden yapılandırılabilir modüler üretim birimleri ve çalışan merkezli organizasyon yapılarıyla geleneksel üretim hatlarına kıyasla önemli avantajlar sunmakta ve tercih edilmektedir. SÜS'ün sağladığı esneklik, iş yükü dengeleme, kurulum ve temin sürelerinin azaltılması gibi unsurlar, işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır. Ancak, üretim süreçlerinin dinamik yapısı ve iş gücünün etkin yönetimi, SÜS ortamında karar verme süreçlerini daha karmaşık hale getirmektedir.

Bu bağlamda, SÜS'te üretim süreçlerinin etkin yönetimi açısından parti büyüklüğü belirleme stratejileri kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde yaygın olarak ele alınan eşit ve değişken alt parti belirleme stratejileri, iş akışı sürelerini, iş yükü dengesini ve sistem genelindeki verimliliği doğrudan etkilemektedir. Eşit büyüklükte alt partiler, üretim süreçlerinin daha düzenli ilerlemesini sağlarken, değişken büyüklükte alt partiler ise sistemin değişken taleplere daha esnek yanıt vermesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, şirketler değişen koşullara hızla adapte olarak performans sürekliliğini sağlayıp rekabet avantajı elde etmektedir.

Bunların yanı sıra SÜS'ün en önemli esneklik mekanizmalarından biri olan çalışan transferi (Shojinka) de kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Shojinka, iş gücünün talep dalgalanmalarına ve operasyonel değişkenlere uyum sağlayacak şekilde esnek biçimde yeniden dağıtılmasını ifade etmektedir. Bu strateji, iş yükünün serular arasında dengeli dağıtılmasını sağlayarak darboğazları önlemekte, üretim sürekliliğini güvence altına almakta ve sistem genelinde verimliliği artırmaktadır. Çalışan transferi sayesinde, belirli bir seruda iş yükü arttığında, o birime diğer serulardan eğitilmiş çalışanlar yönlendirilebilmekte ve böylece üretim kesintisiz devam edebilmektedir. Ayrıca, çalışanların çok becerili olarak yetiştirilmesi, serular arasındaki iş gücü hareketliliğini artırarak üretim sisteminin adaptasyon yeteneğini güçlendirmektedir.

Bununla birlikte, üretim süreçlerinin tedarik zinciri faaliyetleri ile bütünleşik bir şekilde ele alınması, tüm sistemin performansını iyileştirmek açısından bir diğer kritik faktördür. Üretim planlamasının dağıtım süreçleriyle uyumlu hale getirilmesi, ürünlerin müşterilere zamanında ulaştırılmasını sağlarken, aynı zamanda stok seviyelerinin optimize edilmesine, beklemlerin azaltılmasına ve müşteri memnuniyetinin artırılmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme süreçlerinin entegrasyonu, yalnızca üretim sistemleri açısından değil,

tedarik zinciri operasyonları bakımından da daha sürdürülebilir ve esnek bir yapı sunmaktadır. Bu konuda literatür incelendiğinde, mevcut çalışmaların büyük ölçüde montaj hatlarına odaklandığı, SÜS bağlamında üretim planlaması ile tedarik zinciri süreçlerinin entegrasyonuna yönelik araştırmaların ise oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Oysa SÜS'ün dinamik ve esnek yapısı, geleneksel montaj hatlarından farklı olarak daha karmaşık bir üretim-tedarik zinciri uyumunu gerektirmektedir. Serular arası iş yükü dengesi, alt parti üretim stratejileri ve çalışan transferi gibi faktörler, üretim çizelgelemesinin dağıtım süreçleriyle entegre edilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu nedenle bu konuda yapılacak çalışmalar, SÜS'ün tedarik zinciri içindeki etkinliğini artırarak hem üretim esnekliğini güçlendirecek hem de operasyonel verimliliği artıracaktır.

Bu motivasyonla gerçekleştirilen bu tez çalışması, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin SÜS bağlamında üretim planlaması ve tedarik zinciri entegrasyonu üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, SÜS ortamında farklı parti büyüklüğü stratejileri altında üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının eş zamanlı ve bütünleşik şekilde ele alındığı literatürdeki ilk çalışma olma niteliğini taşımaktadır. Çalışma, üretim ve dağıtım süreçlerinin koordinasyonunu esas alan, ortalama temin süresini minimize etmeyi hedefleyen özgün bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmekte ve bu yönüyle literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Model, parti büyüklüğü belirleme (eşit alt parti ve değişken alt parti) ve çalışan transferi (transfere izin verilir ve verilmez) stratejilerini içeren beş farklı modülden oluşan entegre bir yapı ile tasarlanmıştır. Üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarını içeren model aracılığıyla, strateji kullanımlarının amaç fonksiyonuna etkisi analiz edilmiştir. Problemin yüksek karmaşıklığı ve NP-zor sınıfında yer alması göz önünde bulundurularak, büyük boyutlu problemlerin uygun sürelerde çözümünü sağlamak amacıyla Genetik Algoritma (GA) ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması sezgisel yöntemlerinden yararlanılmıştır. Parti büyüklüğü belirleme, çalışan transferi ve araç atama (rastgele atama ve ilk biteni ilk gönder atama) stratejileri dikkate alınarak 16 farklı çözüm kombinasyonu oluşturulmuştur. Ayrıca, iki farklı çaprazlama operatörünün algoritmaların çözüm kalitesi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney tasarımı ile kontrol faktörlerinin sistem üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, ilk biteni ilk gönder araç atama stratejisinin sistem performansı üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, değişken alt parti stratejisinin uygulanması ve çalışan transferine izin verilmesi, sistem performansında belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Ayrıca, seru ve çalışan sayısının dengeli belirlenmesinin sistem performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması üretim ve tedarik zinciri süreçleri arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayarak, SÜS'ün verimliliğini artırmaya yönelik teorik, metodolojik ve yönetsel açılardan önemli katkılar sunmaktadır.

DESIGN OF A PLANNING AND SCHEDULING SYSTEM FOR THE INTEGRATION OF SERU PRODUCTION SYSTEMS AND THE SUPPLY CHAIN

SUMMARY

Nowadays, the product variety with low-volume manufacturing has shaped the way producers control operations as it requires quick adaptation to satisfy the modern market challenges. The adaptability of the production system refers to responding to the changes in demand concerning product mix and volume flexibility in a short response time. With that in mind, it can be ensured by achieving the veneer of normalcy in operations through flexibility, high efficiency, and fast response. Seru production system (SPS) combines the efficiency of assembly lines with the flexibility of job-shop production, resulting in a dynamic production pattern that can rapidly adapt to changes in demand. Distinguished from the assembly lines, SPS is a more flexible, responsive, and efficient production mode with its adjusting ability. In contrast, the assembly lines are ideal for high-volume standardized products and require significant investment in specialized machinery and equipment. SPS emphasizes worker empowerment and collaboration, making it ideal for smaller lot sizes and variable demand conditions for industries where customization and rapid adaptation are essential. Since companies from the electronic assembly industry have faced the volatile market environment over the last decade, they start to reconfigure their traditional assembly lines to adapt to short-term product replacements through human-centered assembly cells, so-called serus. Thus, these companies gain a competitive advantage to suit such conditions with performance continuity thanks to the reconfigurable characteristics of SPS.

Additionally, lot streaming strategies play a critical role in the efficient management of production processes in SPS. Studies on lot streaming have been conducted since the 1960s. Thenceforth, it has become a widely used method in various manufacturing systems to achieve efficiency by means of resource utilization. There are three subplot division strategies that can be implemented for scheduling problems in SPS: equal sublots, variable sublots, and consistent sublots. Since the SPS consists of autonomous and independent serus, the variable and consistent sublots are interchangeable for SPS. Sublot sizes are the same for equal sublots however, vary for variable sublots. Nonetheless, these division methodologies are preferred to compare with each other with respect to resource utilization efficiency.

In today's competitive market conditions, the effective utilization of worker resources is another critical factor for enhancing the performance of production systems in terms of various metrics. In this regard, Shojinka (worker transfer), one of the most vital flexibility mechanisms of SPS, plays a fundamental role in enhancing production efficiency. The term 'Shojinka' comes from the Japanese words 'sho,' which means change, and 'jinka,' which means worker resources. In this context, Shojinka is akin to the flexibility achieved by worker transfer in SPS when a seru needs more worker

resources to complete a set of tasks in a reasonable response time. Furthermore, it emphasizes the importance of cross-training employees, enabling them to perform multiple tasks and roles within the production process. This enables the workforce to be more agile and responsive to changes, as they can be quickly shifted to different serus as needed. In a nutshell, lot streaming allows for improved flexibility, responsiveness, and efficiency by dividing lots into smaller sublots, while Shojinka, a philosophy of lean manufacturing, emphasizes maintaining adaptable production systems to meet dynamic customer demands.

Moreover, the integration of production processes with supply chain activities is crucial for improving overall performance. Synchronizing production scheduling with distribution processes ensures timely and cost-effective product deliveries while optimizing inventory levels, reducing lead times, and enhancing overall supply chain efficiency. Hence, integrating production and supply chain scheduling not only benefits production systems but also provides a more sustainable and flexible structure for supply chain operations.

Nevertheless, existing studies predominantly focus on assembly lines, while research on the integration of production planning and distribution processes in SPS remains limited. Unlike traditional assembly lines, the dynamic and flexible structure of SPS necessitates a more intricate production-distribution coordination. Factors such as workload balancing across serus, lot streaming strategies, and worker transfers make the integration of production scheduling with distribution planning even more critical. However, a comprehensive study that simultaneously optimizes production and supply chain scheduling decisions in SPS has not been sufficiently explored in the literature. Addressing this gap would enhance the efficiency of SPS within supply chains, strengthen production flexibility, and improve operational efficiency in supply chain processes.

Motivated by this, this study investigates the impact of lot streaming strategies on the integrated production and supply chain scheduling problem in SPS. A comprehensive mixed-integer optimization model is formulated, incorporating Shojinka and lot streaming strategies as operational decisions while aligning them with supply chain scheduling decisions. As previously mentioned, Shojinka is characterized by interseru worker transfers, while lot streaming is achieved through equal and variable subplot division methodologies. In alignment with these strategy combinations, the optimization model is structured into five modules, each representing a different scenarios of the SPS production and supply chain scheduling problem. Given the complexity of the problem, Genetic Algorithm (GA) and Artificial Bee Colony (ABC) heuristic methods are employed to provide the solution for large-scale problems within reasonable computational times. To compare different strategy implementations, 16 approaches are generated based on lot streaming (equal sublots vs. variable sublots), worker transfer (allowed vs. not allowed), and vehicle assignment strategies (random assignment vs. first-finished-first-assigned). Additionally, the impact of different crossover operators on the solution quality of the approaches are extensively analyzed. Furthermore, a design of experiment framework is introduced to analyze the effect of controlled factors on the SPS performance in terms of the average customer lead time. To achieve this, a set of computational experiments are performed with an empirical ground for the problem instances through the proposed approaches to attain remarkable managerial insights.

The findings indicate that the first-finished-first-assigned vehicle assignment strategy significantly improves system performance. Furthermore, the implementation of variable subplot size and worker transfer enhances overall system efficiency. Additionally, maintaining a balanced number of serus and workers is identified as a crucial factor for optimizing system performance. The study demonstrates that an optimal ratio between available workers and serus significantly reduces lead times and the resource allocation. A well-balanced workforce allocation mitigates the negative impact of sudden demand shifts, ensuring continuous production flow. Moreover, the results suggest that integrating production scheduling with distribution planning allows for better coordination between manufacturing and supply chain operations, ultimately leading to lead time reductions and improved service levels.

As an overall assessment, this study contributes theoretical, methodological, and managerial insights by improving the understanding of production and supply chain integrations in SPS, ultimately enhancing its overall efficiency. The findings offer valuable implications for industries seeking to optimize SPS-based manufacturing, particularly in environments characterized by fluctuating demand and the necessity for agile production systems. The results also provide practical guidance on the selection of lot streaming, worker transfer, and vehicle assignment strategies, supporting decision-makers in achieving higher efficiency levels in production and distribution networks. By addressing the gap in integrated production and supply chain scheduling, this study paves the way for future research exploring further enhancements in SPS performance through advanced optimization technique and heuristic approaches.



1. GİRİŞ

Günümüzde artan ürün çeşitliliği ve yüksek talep değişkenliği, modern pazar zorluklarıyla başa çıkabilmek için hızlı adaptasyonu gerektirmektedir. Bu durum, üreticilerin üretim operasyonlarını kontrol etme şeklini değiştirmelerine neden olmaktadır. Artık, üretim sistemlerinin uyarlanabilirliği, ürün çeşitliliği ve hacim esnekliği gibi faktörlerle birlikte, talep değişikliklerine hızlıca yanıt verebilen sistemler tercih edilmektedir (Bortolini, 2023). Geleneksel montaj hatları uzun çevrim süreleri, değişen talepleri karşılayamama, dengesiz iş yükü ve tek becerili işçilere sahip olmaları nedeniyle bu ihtiyaçlara yanıt verememektedir. Bu nedenle işletmeler, üretim sistemlerini geleneksel montaj hatlarından, bu ihtiyaçları karşılayabilen serü üretim sistemlerine (SÜS) dönüştürmeye başlamıştır. Geleneksel montaj hatlarından farklı olarak, SÜS genellikle bir veya birden fazla yeniden konfigüre edilebilir mini montaj biriminden oluşur ve aynı anda birden fazla ürün üretebilmektedir (Wu et al., 2024a). Atölye tipi üretimin esnekliğini ve standart montaj hatlarının verimliliğini birleştirerek, SÜS insan odaklı, iş-hücre bazlı bir montaj sistemi olarak faaliyet göstermektedir (Liu et al., 2021). SÜS, işlemdeki stok seviyelerini, temin sürelerini, dengesiz iş yüklerini, kurulum sürelerini ve karbon emisyonlarını azaltma gibi bir dizi avantaj sunarak, geleneksel montaj hatlarının esnek olmayan yapısına kıyasla, güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Zhang et al., 2022a).

SÜS, çok becerili küçük bir çalışan ekibi ve genel amaçlı ekipmanlarla çeşitli ürünlerin küçük ölçekli üretimi için daha uygundur. Ayrıca, talep dalgalanmalarına göre çok becerili çalışanları serular arasında transfer ederek çalışan sayısını ayarlamak (Shojinka kavramını uygulamak) da oldukça kolaydır (Yılmaz, 2020a). Bu sayede, sistem hızlı ve verimli bir şekilde adapte olarak müşteri taleplerindeki değişimlere yüksek esneklik ve kısa temin süreleriyle yanıt verebilmektedir. Ayrıca, çalışan yetkilendirme ve işbirliğine odaklanması sayesinde de, özelleştirme gereksinimi yüksek ve hızlı adaptasyon gerektiren endüstriler için de önemli avantajlar sunmaktadır (Li et al., 2024).

Son dönemde elektronik sektöründeki birçok şirket, talepteki kısa vadeli dalgalanmalara daha iyi yanıt verebilmek için standart montaj hatlarını çalışan odaklı serulara dönüştürmüştür (Zhang et al., 2022b). Bu dönüşüm, adaptasyon yeteneklerini artırarak onlara rekabet avantajı sağlamıştır. Örneğin, Çin'in Zhengzhou kentindeki Foxconn, iPhone modellerine yönelik değişen taleplere hızlı yanıt verebilmek için montaj hatlarını serulara dönüştürmüştür. Standart iPhone 14 serisinin satışları düşerken iPhone 14 Pro serisine olan talebin artmasıyla, Foxconn beş üretim katındaki seruları yeniden konfigüre ederek bu yeni talebi etkin bir şekilde karşılamıştır (Li et al., 2023).

SÜS için uyum kabiliyeti, yüksek çeşitlilik ve düşük hacimli talebi karşılamayı gerektirdiğinden, bu üretim sistemlerinde parti büyüklüklerinin belirlenmesi de oldukça önemlidir. Parti büyüklüğü belirleme stratejileri, 1960'lardan bu yana çalışılan bir konu olmuştur (Reiter, 1966) ve o zamandan beri kaynak kullanımında verimliliği artırmak için çeşitli üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Temelde eşit alt partiler, değişken alt partiler ve tutarlı alt partiler olmak üzere üç ana strateji kullanılır. Seruların otonom ve bağımsız doğası göz önüne alındığında, değişken ve tutarlı alt partiler birbirinin yerine kullanıldığı görülmektedir. Eşit alt partiler, sabit alt parti boyutlarını korurken, değişken alt partiler alt parti boyutlarında esneklik sağlamaktadır (Zhang ve diğ., 2020). Parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin uygulanması, daha küçük parti boyutlarında üretim yapılmasını ve işçilerin hızlı bir şekilde farklı serulara geçişini kolaylaştırarak üretim sistemi içinde uyum kabiliyetini ve verimliliği artırmaktadır. Bu sayede, şirketler değişen koşullara hızla adapte olarak performans sürekliliğini sağlayıp rekabet avantajı elde etmektedir (Wang ve diğ., 2019).

SÜS'te üretim süreçlerinin etkin yönetimi kadar, tedarik zinciri kararlarının bu süreçlerle entegre edilmesi de büyük önem taşımaktadır (Ying ve Tsai, 2017). Tedarik zinciri, hammaddelerin temininden nihai ürünlerin tüketiciye ulaştırılmasına kadar uzanan ve işletmelerin üretim performansını doğrudan etkileyen önemli bir yapıdır (Gürsoy ve Kara, 2021). Üretimden dağıtıma kadar birçok aşamayı kapsayan tedarik zinciri, verimliliğin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve zamanın etkin kullanılması açısından kritik bir süreçtir. Bu nedenle, üretim ve tedarik sistemlerinin entegre bir şekilde yönetilmesi, üretim süreçlerinin sürekliliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca bu entegrasyon, tedarik zinciri ve dağıtım süreçlerinde

meydana gelebilecek değişimlerin üretim performansı üzerindeki olumsuz etkilerini minimize ederek sistemin esnekliğini ve dayanıklılığını da artırmaktadır (Yılmaz ve Pardalos, 2017).

Özellikle yüksek esneklik sağlayan SÜS gibi üretim sistemlerinde, üretim ve tedarik zinciri kararlarının birlikte ele alınması, sistemin genel performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir (Zhang ve diğ, 2024b). Bu entegrasyon, tedarik zinciri süreçlerinin üretim çizelgeleriyle daha uyumlu ve dinamik hale gelmesini sağlayarak talep dalgalanmalarına karşı daha dayanıklı ve hızlı cevap verebilir bir yapı oluşturur. Ayrıca, üretim ve tedarik zinciri süreçlerinin entegrasyonu, müşteriye temin sürelerinin kısaltılmasını, stok seviyelerinin optimize edilmesini, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve israfın en aza indirilmesini mümkün kılmaktadır (Pei ve diğ, 2014). Bu durum, üretim planlamasında daha esnek ve hızlı karar mekanizmalarının benimsenmesine olanak tanırken, müşteri taleplerine daha etkin yanıt verilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, üretim ve tedarik zinciri kararlarının entegrasyonu, sadece üretim sistemlerinin operasyonel verimliliğini değil, aynı zamanda sistemin esnekliğini ve dayanıklılığını da önemli ölçüde iyileştirir (Ceylan ve diğ, 2021).

Literatürde, montaj hattı üretim sistemlerinde üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme entegrasyonunun avantajlarını ele alan birçok çalışma bulunmasına karşın (Chen, 2024), SÜS üzerine yapılan araştırmalar genellikle seru ve operatör gibi sadece üretim kaynaklarının çizelgelenmesine odaklanmaktadır. Buna karşılık, SÜS'te üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının entegrasyonuna yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, mevcut literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamakta ve SÜS'te parti büyüklüğü belirleme stratejileri çerçevesinde üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele almaktadır. Bu sayede, çalışma, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının koordinasyonunu kapsamlı bir şekilde inceleyerek, SÜS tasarımı ve operasyonları için değerli ve uygulanabilir içgörüler sunmayı hedeflemektedir.

Bu doğrultuda, çalışma da aşağıdaki araştırma sorularına (AS) cevap aramaktadır:

AS.1: Parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin uygulandığı bir SÜS ortamında üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararları için benimsenen stratejiler, sistem performansını özellikle ortalama temin süresi ve kaynak kullanımı açısından nasıl etkilemektedir?

AS.2: Kullanılan çözüm yaklaşımları ve çaprazlama operatörleri sonuç performansları açısından nasıl farklılık göstermektedir?

AS.3: Kontrol edilebilir faktörlerin farklı seviyeleri altında sistem performansı nasıl değişmektedir?

Ele alınan problem için ortalama müşteri temin süresini minimize eden beş modülden oluşan bir optimizasyon modeli sunulmaktadır. İlgili problemin NP-zor sınıfına ait olması nedeniyle de Genetik Algoritma (GA) ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, üretim çizelgeleme kararlarında parti büyüklüğü belirleme (eşit alt parti ve değişken alt parti) ve çalışan transferi (transfere izin verilir ve verilmez) stratejilerini içerirken, tedarik zinciri çizelgeleme kararlarında ise araç atama (rastgele atama ve ilk biteni ilk gönder atama) stratejilerini ele almaktadır. Çözüm yaklaşımlarının ve uygulanan çaprazlama operatörlerinin etkinliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi de araştırılmaktadır.

Yapılan çalışmanın katkıları ve özgün yönleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- **Teorik Katkıları:** Bu çalışma parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin uygulandığı SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele alan ilk çalışmadır. Tüm alt partiler için toplam müşteri temin sürelerini minimize etmeye yönelik Karmaşık-Tamsayılı Doğrusal Programlama modeli geliştirilmiştir.
- **Metodolojik Katkıları:** Bu çalışma, farklı parti büyüklüğü belirleme, çalışan transferi ve araç atama stratejilerinin SÜS performansı üzerindeki etkisini, özellikle müşteri temin süresi ve kaynak kullanımı açısından değerlendirmektedir. GA ve YAK tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiş ve bu iki temel metodoloji, uygulanan farklı çaprazlama operatörleriyle birlikte karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kontrol edilebilir faktörlerin etkisini analiz etmek amacıyla kapsamlı hesaplamalı deneyler içeren bir deney tasarımı çerçevesi benimsenmiştir.
- **Yönetimsel Katkıları:** Bu çalışma, SÜS performansını etkileyen faktörlerle ilgili önemli araştırma sorularını ele alarak, SÜS yönetimi alanını teorik, yöntemsel ve yönetimsel açılardan zenginleştirmeyi amaçlamaktadır. Parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin uygulandığı bir ortamda üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının koordinasyonunun stratejik önemini

vurgulayarak, teori ile uygulama arasındaki boşluğu kapatmakta ve yöneticiler için uygulanabilir içgörüler sunmaktadır.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2’de Serü Üretim Sistemleri genel hatlarıyla tanıtılmaktadır. Bölüm 3’te, ilgili akademik literatür kapsamlı bir şekilde gözden geçirilerek mevcut literatürdeki boşluklar vurgulanmaktadır. Bölüm 4, parti büyüklüğü belirleme stratejileri çerçevesinde SÜS üretim ve tedarik zinciri çizeleme problemi için önerilen optimizasyon modelini sunmaktadır. Problemin çözümüne yönelik kullanılan yöntemler ve geliştirilen algoritmalar Bölüm 5’te detaylandırılmaktadır. Bölüm 6’da gerçekleştirilen hesaplamalı analizler, elde edilen bulgular ve yönetimsel çıkarımlar ele alınmaktadır. Son olarak, Bölüm 7’de çalışmanın genel sonuçları tartışılmakta ve gelecekteki araştırma yönleri önerilmektedir.



2. SERU ÜRETİM SİSTEMLERİ

Japonya'da 1990'lı yıllarda yaşanan ekonomik kriz ve müşteri taleplerindeki çeşitlenme, ürün yaşam döngüsünün kısalmasına ve üretim hacmi ile ürün çeşitliliğinde belirsizliklerin artmasına yol açmıştır. Bu koşullar altında Toyota Üretim Sistemi, montaj hattı ve hücrel üretim gibi geleneksel üretim yaklaşımları, değişken talebi karşılamakta yetersiz kalmıştır (Liu et al., 2013). Öte yandan, işgücü maliyetlerinin yükselmesi ve fabrikaların düşük işgücü maliyetine sahip Çin ve Güneydoğu Asya ülkelerine taşınması, Japonya'daki birçok montaj hattının kapanmasına neden olmuştur. Ancak, Japonya'da benimsenen çalışma kültürü nedeniyle hem dinamik taleplere uyum sağlamak hem de işçilere yeni istihdam alanları yaratmak amacıyla alternatif üretim sistemleri geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bu bağlamda, Japonlar yenilikçi bir üretim modeli olarak "Seru Üretim Sistemi"ni (SÜS) ortaya çıkarmışlardır (Zhang et al., 2023b).

Seru, Japonca'da "hücre" anlamına gelmekte olup, geleneksel hücrel üretim anlayışından farklılaşarak Japon üretim sistemlerine özgü bir anlam kazanmıştır (Kaku, 2017). Bu sistemde, basit ekipmanlarla üretim süreçlerinin büyük bir kısmını veya tamamını gerçekleştirebilen, bir veya birkaç çalışandan oluşan montaj birimleri bulunur. Seru üretim modeli, özerklik, öz yönetim, sürekli öğrenme ve kendini geliştirme gibi insan odaklı yaklaşımlara dayanır (Sun et al., 2016). Seru sistemleri, esnek yapıları sayesinde iş gücü, ekipman ve ürünlerin hızla yeniden yapılandırılmasını sağlayarak üretkenliği artıran dinamik bir üretim sürecini ifade etmektedir.

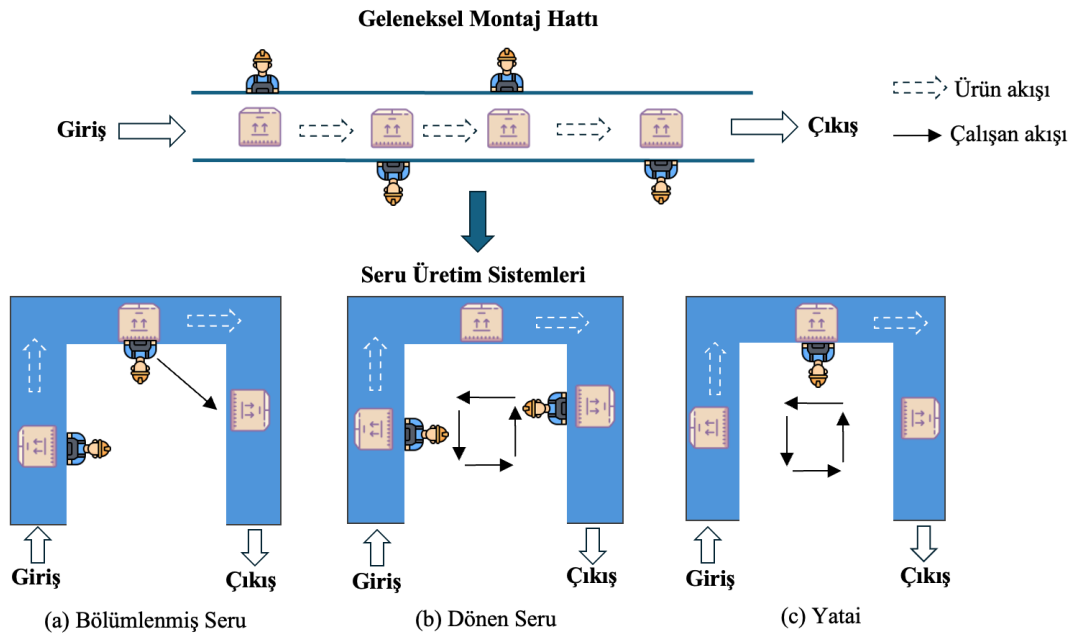
Seru sistemlerinde önemli noktalardan birisi de serulardaki çalışanların sahip olduğu bilgi, eğitim ve kabiliyettir. Çünkü SÜS insan odaklı bir üretim sistemidir. Bu nedenle bu sistemleri çalışan sayısı ve çalışanlara atanan görevlere göre 3 gruba ayırmak mümkündür (Li and Zhang, 2025);

1) Bölümlenmiş (Divisional) Seru: Bu serularda ürünün üretimi için yapılacak işler çalışanlar arasında paylaştırılmakta yani tahsisli çalışan ataması gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.1'de (a) ile gösterilen sistemlerde çalışanlar aldıkları

eğitim ve becerilerine göre serü içerisinde birden fazla işi gerçekleştirmektedir. Çalışanlar çapraz eğitilmiş olsa da tam yetkin değildir.

2)Döner (Rotating) Serü: Şekil 2.1’de (b) ile gösterilen bu serularda çalışanların tümü ürünün üretilmesi için yapılacak işler hakkında gerekli bilgi ve beceriye sahip olmalıdır. Burada birden fazla çalışan ürünün üretilmesi gereken işleri birbiri ardına takip ederek görevlerini tamamlamakta yani tavşan kovalama sistemini gerçekleştirmektedir.

3)Yatai: Şekil 2.1’ de (c) gösterilen serularda bir çalışan döner serulardaki gibi birbiri ardına ürünün üretilmesi için gereken işleri tamamlamaktadır. Döner serularda çalışanlar işlerin etrafında dönerken burada işler çalışanın etrafında dönmektedir. SÜS, geleneksel üretim sistemlerini yavaş yavaş yatai serularına dönüştürmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 2.1 : Serü Türleri.

SÜS’e ilk olarak 1992 yılında Sony geçiş yapmıştır. Daha sonra Canon, Panasonic, Fujitsu, Sharp, Yamaha ve Hitachi gibi büyük elektronik şirketleri de bu üretim modelini benimsemiş ve başarılı sonuçlar elde etmiştir (Yin ve diğ., 2017). SÜS sayesinde firmalar, verimlilik artışı sağlarken montaj hattı uzunluğunu ve maliyetleri azaltmış, böylece gereksiz üretim alanlarını ortadan kaldırmıştır (Tüzemen, 2020). Zaman içinde serü sistemleri, uygulamada yüksek performans göstererek etkinliğini

kanıtlamıştır. Bunun üzerine günümüzde Japonya’da farklı sektörlerde değişen müşteri taleplerini hızlı cevaplamak için SÜS’e yönelinmektedir (Li ve diğ., 2025).

Bir SÜS’ün aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenmektedir (Yu ve Tang, 2019):

- Tamamlanmışlık (Kanketsu): Bir ürünün üretimi için gereken tüm işlemler, başlangıçtan bitiş noktasına kadar aynı serü içinde tamamlanır. Çalışanlar, ürünün büyük bir kısmını veya tamamını kendi başlarına üretme sorumluluğunu taşır. Bu, üretim süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla yönetilmesini sağlar.
- Özerklik: Çalışanlar üretim sürecinin birçok aşamasından sorumlu olur. Bu durum, çalışanların yetkinliklerini geliştirmelerine ve çok yönlü becerilere sahip olmalarına olanak tanır.
- Sürekli İyileştirme: Çalışanların bireysel becerileri ve serü içindeki üretim süreçleri, sürekli iyileştirme anlayışıyla geliştirilir. Bu yaklaşım, kaliteyi artırırken iş süreçlerinde daha verimli yöntemlerin benimsenmesini sağlar.
- Paralel Üretim: SÜS bir veya birden fazla serü içerebilir ve aynı anda üretim yapabilir. Ayrıca her serü bir ya da birden fazla ürün tipi üretebilir. Bu yapı, üretim süreçlerinin birbirinden bağımsız çalışmasını sağladığı için herhangi bir serüde yaşanan aksaklık diğer seruların işleyişini doğrudan etkilemez.
- Yeniden Konfigürasyon: Serü üretimi, müşteri taleplerine göre hızlı bir şekilde yeniden düzenlenebilir. Bu esneklik, taşınabilir ekipmanlar ve çok yönlü becerilere sahip çalışanlar sayesinde sağlanır. Böylece değişen pazar koşullarına ve müşteri ihtiyaçlarına hızla uyum sağlanabilir.
- Çalışan transferi (Shojinka): Üretim talebindeki değişimlere uyum sağlamak amacıyla, çalışanlar farklı serular arasında esnek bir şekilde transfer edilebilir. Shojinka ilkesi, çalışanların gerektiğinde farklı görevleri üstlenebilmelerini ve üretim süreçlerinde esnek bir yapı oluşturulmasını sağlar.

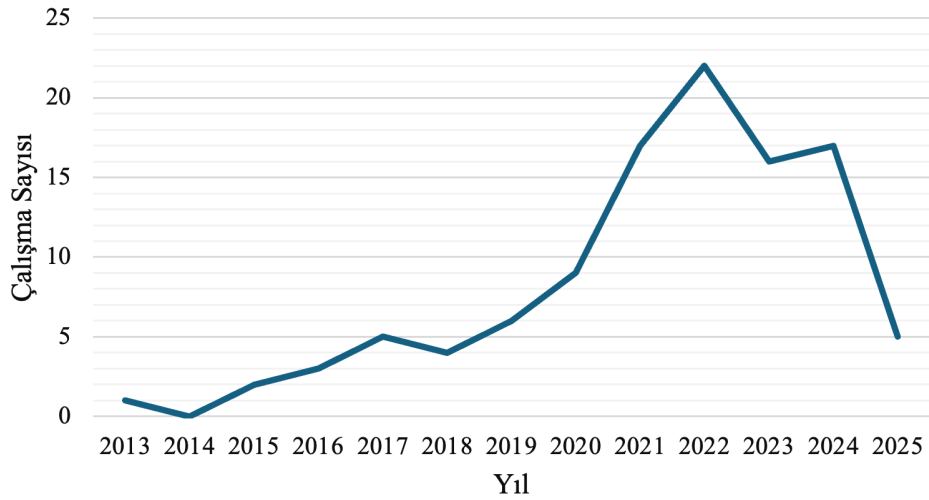
SÜS, montaj hatlarının verimliliğini atölye üretiminin esnekliğiyle birleştirerek talepteki değişikliklere hızla uyum sağlayabilen dinamik bir üretim modeli olarak ortaya çıkarmaktadır (Torkul ve diğ. 2022). Her ne kadar diğer üretim sistemleri ile bazı benzerlikler taşısa da önemli farklılıklara da sahiptir. Örneğin ayarlama yeteneği ile daha esnek, duyarlı ve verimli bir üretim modu olan SÜS, bu özellikleri ile montaj hatlarından ayrılmaktadır (Fujita ve diğ. 2022). Çünkü montaj hatları, yüksek hacimli standart ürünler için idealdir ve özel makine ve ekipmanlara önemli miktarda yatırım

yapılmasını gerektirir. SÜS ise çalışanların yetkilendirilmesini ve iş birliğini vurgulayarak, özelleştirme ve hızlı adaptasyonun önemli olduğu endüstrilerde daha küçük parti boyutları ve değişken talep koşulları için idealdir (Yu ve diğ. 2018). Dahası, serular, sıfır stok, zamanında üretim gibi politikaları ile yalın üretim sistemleri ile benzerlik gösterse de ekipman ve yeniden yapılandırma alanlarında birbirinden ayrılmaktadır. Serular basit ve ucuz ekipmalarla yüksek yeniden yapılandırma gösterirken yalın üretim sistemlerinde ekipmanlar pahalı ve yüksek donanımlıdır. Bu nedenle yeniden yapılandırmaya uygun özellikte değildirler (Çalışkan ve diğ., 2021). Bunun yanı sıra, SÜS temelde hücresele üretim sistemlerinden ortaya çıkmıştır. Fakat ürünlerin üretimi açısından hücresele üretimden farklılık göstermektedir. Serular her bir ürün için yeniden yapılandırılırken hücresele üretim sistemleri grup teknolojisine dayalı olarak ürünlerin üretim programına göre şekillendirilmektedir. Burada kullanılan ekipmanlar fiyatı yüksek ve fonksiyonel olduğu için sık sık değiştirilmeye uygun yapıda değildir (Kaku, 2009).

Özetle, SÜS sunduğu esneklik, verimlilik ve hızlı adaptasyon kabiliyeti sayesinde hem küresel ölçekte hem de Türkiye’de giderek daha fazla ilgi gören yenilikçi bir üretim modeli olarak öne çıkmaktadır. Yalın üretim ilkeleriyle uyumlu yapısı, düşük maliyetli ekipmanlarla sağladığı yüksek yeniden yapılandırma kapasitesi ve değişken talep koşullarına hızlı uyum sağlayabilmesi, SÜS’ü rekabet avantajı sunan bir sistem haline getirmektedir. Bu özellikleriyle SÜS, dinamik pazar ortamlarında sürdürülebilir ve etkili üretim çözümleri sunarak gelecekte daha yaygın bir şekilde benimsenmeye adaydır.

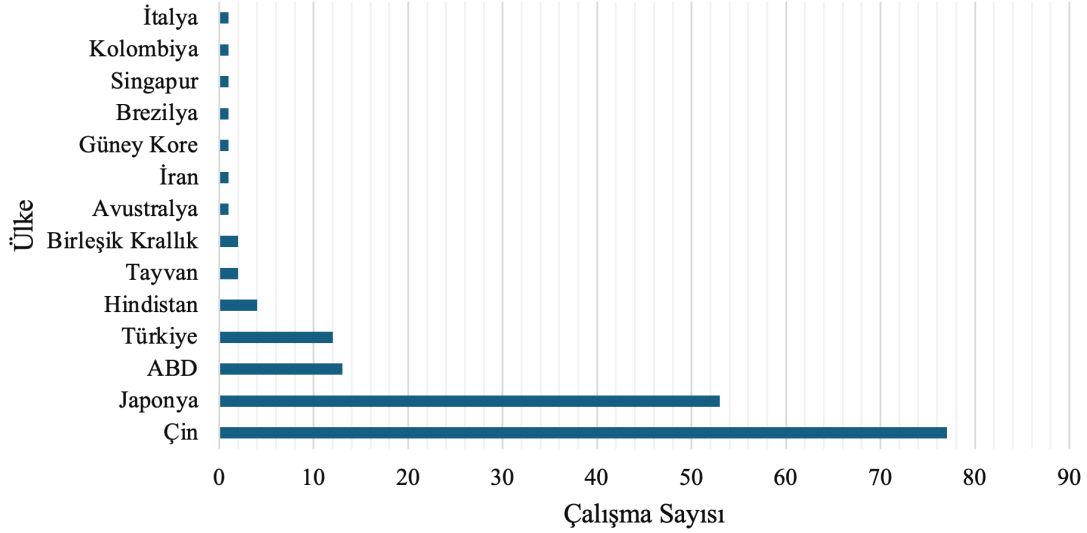
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1990'lı yıllardaki ekonomik baskılar, Japon elektronik endüstrisini rekabet gücünü artırmak için stratejik bir yanıt olarak SÜS'ü geliştirmeye yönlendirmiştir (Kaku, 2017). Zamanla, yeniden yapılandırılabilirliği sayesinde popülerlik kazanan SÜS, endüstri ve akademik araştırmaların da önemli bir odağı haline gelmiştir (Yu ve Tang, 2019). Scopus veri tabanında yapılan incelemelerde 2013-2025 yılları arasında yayımlanan, başlık, özet ya da anahtar kelimelerde “Seru üretim sistemleri” terimini kullanan çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu istatistiğe göre SÜS’ü ele alan çalışmaların sayısı özellikle son beş yılda ciddi bir şekilde artış göstermektedir. Özellikle son yıllarda tüketim hızının ve talep dalgalanmalarının yüksek olması bu araştırmaların artmasında etkili olmaktadır.



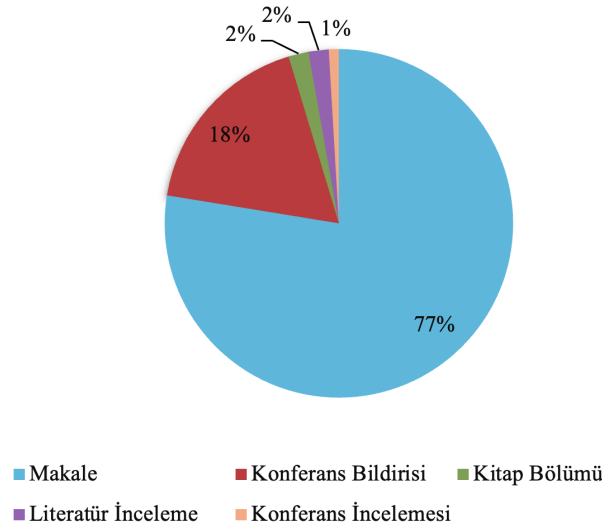
Şekil 3.1 : SÜS’ü ele alan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Scopus, 2025).

Şekil 3.2’te 2013-2025 yılları arasında yapılan bu çalışmaların ülkeler bazında dağılımları verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi Çin, Japonya ve ABD’den sonra SÜS alanında en çok çalışma yapan ülkelerden bir de Türkiye’dir. Bu durum, ülkemizde değişen talep yapısına karşı yeni ve efektif üretim sistemlerine olan ihtiyacı da göstermektedir.



Şekil 3.2 : SÜS alanında yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı (Scopus, 2025).

Şekil 3.3'te ise 2013-2025 yılları arasında yayınlanan eserlerin türlerine yer verilmektedir. Sonuçlar %77 ile çalışmaların en çok makale olarak yayımlandığı bunu da %18 ile konferans bildirilerinin takip ettiği görülmektedir.



Şekil 3.3 : SÜS alanında yapılan çalışmaların türü (Scopus, 2025).

SÜS üzerine yapılan bu çalışmalar önemli ölçüde gelişmiş olup, bu alandaki erken dönem katkılar Kaku ve diğ. (2009) tarafından sağlanmıştır. Kaku ve diğ. (2009) ürün çeşitliliği, çalışan becerileri ve talep değişkenliğini dikkate alarak hat-seru dönüşüm problemi için bir matematiksel programlama modeli geliştirmişlerdir. Daha sonrasında, SÜS içerisindeki tasarım ve atama problemleri üzerine odaklanılmıştır. Yu ve diğ. (2012), seru tasarım problemini inceleyerek montaj hatlarının seru sistemlerine

dönüştürülmesine vurgu yapmıştır. Çalışmalarında, toplam üretim süresi ve toplam iş gücü saatlerini en aza indirmeyi amaçlayan iki amaçlı bir hat-seru dönüşüm modeli önermişlerdir. Liu ve diğ. (2015), ekonomik ve çevresel faktörleri de göz önünde bulundurarak seru atama problemini ele almıştır. Bu doğrultuda, çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmiş ve problemi çözmek için geliştirilmiş bir baskın olmayan sıralama genetik algoritması II (NSGA-II) kullanmışlardır. Yu ve diğ. (2016), hat-seru dönüşümü ve seru atama problemini eş zamanlı olarak ele alarak geliştirilmiş kesin çözüm algoritması tasarlamıştır. Yu ve diğ. (2017), seru dönüşümü için bir matematiksel model geliştirerek çalışan sayısını artırmadan üretim süresini azaltmayı hedeflemiştir. Büyük ölçekli problemleri çözmek içinse sezgisel algoritmalar kullanmışlardır. Liu ve diğ. (2022), seru yeniden yapılandırmasının ve çok yetenekli çalışanların üretim esnekliği ve performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çin'deki üretim fabrikalarında gerçek bir vaka çalışması gerçekleştirerek verileri analiz etmek için yapısal eşitlik modelleme tekniğini kullanmışlardır.

SÜS için önemli diğer unsurlardan biri de etkin üretim ve çalışan çizelgelemesinin yapılmasıdır; bu, iş akışının optimize edilmesi, üretim süresinin minimize edilmesi ve üretim faaliyetlerinin talep dalgalanmalarına uyum sağlaması açısından kritik bir rol oynamaktadır (Sun ve diğ., 2020; Liu ve diğ., 2022). Bu nedenle, SÜS üzerine yapılan literatürdeki birçok çalışma çizelgeleme problemlerine odaklanmıştır. Örneğin, Lian ve diğ. (2018), çalışan heterojenliğini göz önünde bulundurarak çok yetenekli çalışanların çizelgeleme problemini ele alan bir tam sayılı doğrusal programlama modeli önermiş ve iş yükü dengesizliğini en aza indirmek için NSGA-II algoritmasını kullanmıştır. Jiang ve diğ. (2021), kurulum süreleri ve öğrenme etkilerini içeren seru çizelgeleme problemlerini çözmek için kesin çözüm algoritmalarına başvurmuştur. Daha yakın zamanda, Zhang ve diğ. (2023b), seru çizelgelemede toplam ağırlıklı tamamlanma süresini minimize etmeye odaklanan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Bunlara ek olarak, Yılmaz (2020a), literatüre çalışan transferi (Shojinka) kavramını kazandırarak SÜS'te çalışan çizelgeleme problemine yeni bir boyut eklemiştir. Benzer şekilde, Gürsoy Yılmaz ve diğ. (2023), Wu ve diğ. (2024a) ve Wu ve diğ. (2024b), çalışan transferini içeren seru çizelgeleme problemini ele almıştır. Bu çalışmalar, NP-Zor yapıya sahip bu problemler için meta sezgisel yöntemler geliştirmiştir. Elde edilen bulgular, çalışan transferinin akış süresi ve üretim süresini

önemli ölçüde azaltılabileceğini ve dolayısıyla SÜS performansını artırılabileceğini göstermiştir.

Çizelgeleme ve atama problemlerinin ötesinde, son yıllarda SÜS'te parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin entegrasyonunun önemi de giderek artmıştır. Bu stratejileri ele almak, SÜS içinde kaynak kullanımını optimize etmek ve operasyonel verimliliği artırmak açısından kritik bir öneme sahiptir (Li ve Wu, 2024). Wang ve diğ. (2019), bu entegrasyonun önemini vurgulamış ve sonraki araştırmalar da bu bulguyu desteklemiştir. Shen ve diğ. (2021), kurulum sürelerini de dikkate alarak seru çizelgeleme ve çalışan atama problemleri için bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Çalışmada, toplam üretim süresini minimize etmek için GA kullanılmıştır. Zhang ve diğ. (2022b), seru çizelgeleme problemlerinde parti büyüklüğü belirleme ve çalışan öğrenme etkilerinin rolünü incelemiş ve küçük ölçekli problemler için dal ve sınır algoritmasını kullanarak çözümler sunmuştur. Miao ve diğ. (2023), parti büyüklüğü belirleme stratejilerini seru dengeleme problemi kapsamında ele almak için matematiksel bir model önermiştir. Bu çalışmada hem üretim süresi hem de iş yükü dengesizliğini en aza indirmek için NSGA-II algoritmasından yararlanılmıştır. Bu çalışmalar, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin SÜS 'ün genel performansı üzerinde dikkate değer faydalar sağladığını ve sistem optimizasyonunu kolaylaştırdığını göstermektedir.

SÜS için bir diğer kritik unsur, tedarik zinciri kararlarının üretim planlama süreçleriyle entegrasyonudur. Bu iki sürecin etkin bir şekilde koordine edilmesi, yalnızca iç operasyonların optimizasyonunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda dış süreçlerin uyumlu hale getirilmesine de katkıda bulunur. Bu entegrasyon, teminat sürelerini azaltmaya, kaynak kullanımını artırmaya ve nihayetinde genel sistem performansını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır (Zhang ve diğ, 2024a). Bu bakış açısıyla Zhang ve diğ. (2024b), SÜS'te DeJong'un öğrenme etkilerini içeren bütünleşmiş çizelgeleme ve dağıtım problemini araştırmıştır. Çalışmada, dinamik programlama tabanlı kesin çözüm algoritması ve karınca kolonisi optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Araştırma bulguları, üretim çizelgelemesi ile dağıtım süreçlerinin birlikte ele alınmasının %15'in üzerinde iyileşme sağladığını ortaya koymuştur.

Bu bölümde gerçekleştirilen literatür araştırmasını daha kapsamlı bir şekilde ortaya koymak adına, önceki çalışmalar amaçları, çözüm yaklaşımları, problem sınıflandırmaları ve temel özellikleri açısından kategorize edilerek Çizelge 3.1'de

sunulmuştur. Çizelgeden de görüldüğü üzere, her ne kadar SÜS'te dağıtım planlama ve çizelgeleme üzerine yapılan araştırmalar yeni yeni gelişmeye başlasa da bu alanda literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Özellikle, SÜS'te çalışan transferi ve parti büyüklüğü belirleme stratejileri kapsamında üretim çizelgeleme kararlarını tedarik zinciri çizelgeleme kararları ile entegre eden bir çalışma bulunmamaktadır. Bu motivasyonla, bu çalışma parti büyüklüğü belirleme stratejileri kapsamında SÜS'te üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele almaktadır. Problemin çözümü için, ortalama müşteri temin süresini en aza indirmeyi hedefleyen bir optimizasyon modeli önerilmektedir. Geliştirilen model, parti büyüklüğü ve çalışan transferi stratejileri doğrultusunda araç atamalarına karar veren beş farklı modülden oluşmaktadır. Her bir modül kombinasyonu, farklı stratejilerin uygulanmasına olanak tanıyarak entegre problemin kapsamlı bir şekilde ele alınmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, SÜS'te üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme süreçlerini farklı stratejiler altında bütünleşik olarak değerlendirmesiyle literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Ayrıca ele alınan problem NP-zor sınıfında yer aldığından, büyük boyutlu örneklerin etkin bir şekilde çözülmesi için GA ve YAK tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiş ve farklı çaprazlama operatörleri ile performansları karşılaştırılmıştır. Böylece, SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemi için kapsamlı bir metodoloji sunularak farklı üretim ve dağıtım stratejilerinin etkinliği analiz edilmiş ve işletmeler için pratik, uygulanabilir çözüm önerileri geliştirilmiştir.

Çizelge 3.1: SÜS ile ilgili literatür çalışmaları.

Yazar	Problem Türü				Amaç	Çalışan Transferi	Parti Bölme	Çözüm yaklaşımları
	Tasarım	Atama	Çizelgeleme	Dağıtım				
Kaku ve diğ.(2009)	✓		✓		TIS ve TCS	NA	NA	OM ve Simülasyon
Liu ve diğ. (2012)	✓				Cmax	NA	NA	OM
Yu ve diğ. (2012)	✓	✓			TIS ve TCS	NA	NA	Sezgisel
Liu ve diğ. (2013)			✓		TEM ve CID	NA	NA	OM ve Sezgisel
Yu ve diğ. (2013)	✓				TIS ve CS	NA	NA	OM
Liu ve diğ. (2015)		✓			Cmax ve CDE	NA	NA	NSGA-II
Sun ve diğ. (2016)	✓				Cmax	NA	NA	OM
Yu ve diğ. (2016)	✓	✓			TIS ve TCS	NA	NA	OM
Ying ve Tsai (2017)		✓			TM	NA	NA	OM ve Sezgisel
Lian ve diğ. (2018)			✓		CID ve SID	NA	NA	OM ve NSGA-II
Wang ve diğ. (2019)			✓		Net kar	NA	A	OM ve GA
Zhang ve diğ. (2020)	✓		✓		Cmax	NA	A	OM ve PSO
Yılmaz (2020a)			✓		Cmax ve CID	A	NA	OM ve NSGA-II
Yılmaz (2020b)			✓		Cmax	A	NA	OM ve GA
Sun ve diğ. (2020)			✓		Toplam gecikme	NA	NA	OM ve İOE
Shen ve diğ.(2021)			✓		Cmax	NA	A	OM ve GA
Jiang ve diğ. (2021)			✓		TB, TBSF ve TYY	NA	NA	OM
Çalışkan ve diğ. (2021)		✓			Cmax	NA	NA	OM ve Metasezgisel
Liu ve diğ. (2021)		✓			Cmax ve CID	NA	NA	OM ve NSGA-II
Liu ve diğ. (2022)			✓		Cmax	NA	NA	Metasezgisel
Gai ve diğ. (2022)		✓			Cmax	NA	NA	OM ve Sezgisel
Zhang ve diğ. (2022a)			✓		TATZ	NA	NA	OM ve DSA
Fujita ve diğ. (2022)		✓			Net kar	NA	NA	OM
Li ve diğ. (2022a)		✓	✓		Cmax ve TCS	NA	NA	OM ve MSM
Li ve diğ. (2022b)		✓	✓		GPS	NA	NA	OM, DSA ve TB

Çizelge 3.1(devamı): SÜS ile ilgili literatür çalışmaları.

Yazar	Problem Türü			Amaç	Çalışan Transferi	Parti Bölme	Çözüm Yaklaşımları			
	Tasarım	Atama	Çizelgeleme							
Miao ve diğ. (2022)	✓	✓	✓	Cmax, Inter-SSD ve Intra-SSD	NA	A	NSGA-II			
Zhang ve diğ. (2022b)			✓	Cmax	NA	NA	OM ve MTBA			
Zhang ve diğ. (2023a)			✓	Cmax	NA	NA	OM ve DSA			
Zhang ve diğ. (2023b)			✓	TATZ	NA	NA	OM ve Metasezgisel			
Gürsoy Yılmaz ve diğ. (2023)			✓	✓	Ortalama akış süresi	A	A	OM ve GA		
Wu ve diğ. (2023)			✓	✓	Cmax ve Enerji tüketimi	NA	NA	OM ve İOEA		
Ren ve diğ. (2024)					Toplam maliyet	NA	NA	İASP ve MSM		
Wu ve diğ. (2024a)					Cmax	A	NA	Metasezgisel		
Wu ve diğ. (2024b)					Cmax ve Toplam iş gücü	A	NA	OM ve Metasezgisel		
Li ve diğ. (2024)					Cmax ve Çizelge değişimi	NA	NA	NSGA-II		
Zhang ve diğ. (2024a)					✓	Cmax	NA	NA	OM ve İBY	
Zhang ve diğ. (2024b)					✓	✓	Hizmet düzeyi ve maliyet	NA	NA	OM ve Metasezgisel
Tao ve diğ. (2025)				✓		Cmax	NA	NA	OM ve NSGA-II	
Li ve diğ. (2025)				✓		Net kar	NA	NA	OM ve Metasezgisel	
Li ve Zhang (2025)				✓		Ürün sayısı	NA	NA	Metasezgisel	
Gürsoy Yılmaz ve diğ. (2025)		✓	✓	Ortalama akış süresi	A	A	OM ve NSGA-II			
Bu çalışma		✓	✓	✓	Ortalama müşteri temin süresi	A	A	OM, GA ve YAK		

A: Uygulandı, NA: Uygulanmadı V: Var, Y: Yok, OM: optimizasyon modeli, TIS: toplam işlem süresi, TCS: toplam çalışan süresi, Cmax: yayılma süresi, TEM: toplam eğitim maliyeti, CID: çalışan işgücü dengeleme, CS: çalışan sayısı, CDE: karbondioksit emisyonu, GA: genetik algoritma, TM: toplam maliyet, SID: serularda işgücü dengeleme, NK: net kar, PSO: parçacık sürü optimizasyonu, NSGA-II: baskın olmayan sıralama genetik algoritma-II, TB: toplam bekleme süresi, TBSF: toplam bekleme süresi farkı, TYL: toplam yatai yükleme, TATZ: toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı, DSA: dal-sınır algoritması, MSM: master-slave mekanizması, GPS: geciken parti sayısı, TB: tavlama benzetimi, Inter-SSD: inter-seru sistemi dengeleme, Intra-SSD: intra-seru sistemi dengelem, MTBA: mantık tabanlı benders ayrıştırması, HGA: hibrit genetik algoritma, İASP: İki aşamalı stokastik programlama, İBY: İç içe bölümlendirme yöntemi, OTS: Ortalama tamamlanma süresi, İOEA: işbirlikçi ortak evrim algoritması



4. PROBLEM TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, tez kapsamında ele alınan SÜS'te parti büyüklüğü belirleme stratejileri çerçevesinde üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemi tanıtılmış ve geliştirilen optimizasyon modeli detaylı olarak açıklanmıştır. Bu problemin ele alınması, SÜS'te operasyonel verimliliğin artırılması, üretim ve dağıtım süreçlerinin daha etkin yönetilmesi, üretimden dağıtıma kadar olan süreçlerin senkronize edilmesi ve uygulanan stratejilerle değişken talep karşısında müşteri temin süresinin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

4.1 Problemin Tanımlanması

Bu çalışmada ele alınan problem, SÜS içinde üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme süreçlerinin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Problem ortamı aşağıdaki şekilde karakterize edilmektedir:

SÜS tarafından üretilen belirli bir ürün tipi kümesi bulunmaktadır. Her ürün tipi için görevler, görev sırası ve her görevin işlem süresi önceden bilinmektedir. SÜS içindeki seru sayısı ve çapraz eğitilmiş çalışan sayısı da bilinmektedir. Her seru, ya tüm görevleri tek bir çalışanın gerçekleştirdiği bir yatai seru olarak (ideal seru yapısını temsil eder) ya da birden fazla çalışanın görevleri paylaştığı bölümlenmiş seru olarak çalışabilir. Burada çalışan transferine izin verilmesi ya da verilmemesi üzerine uygulanan stratejiye göre serulardaki çalışan sayıları değişkenlik gösterebilir. İlgili seruya atanan çalışan sayısına bağlı olarak da çevrim süreleri belirlenmektedir. Ayrıca, bir müşteri kümesi bulunmaktadır. Her müşteri için belirli siparişler bulunmakta ve her müşteri siparişi bir parti olarak değerlendirilmektedir. Bir parti, SÜS içinde işlenmek üzere birkaç alt partiye bölünmektedir. Parti büyüklüğünü belirlemek amacıyla da eşit alt parti büyüklüğü ve değişken alt parti büyüklüğü olmak üzere iki farklı strateji benimsenmektedir. Tamamlanan bir alt partinin, işlem bittiğinde doğrudan müşteriye teslim edilmesi mümkündür. Dağıtım süreci belirli rotalar ve kapasitesi önceden tanımlanmış araçlarla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, SÜS ile müşteriler arasındaki taşıma süreleri önceden bilinmektedir. Üretim sürecinde

farklı ürün tiplerine ait alt partiler aynı araca atanabilir; ancak bu durumda araç, tüm atanan alt partiler üretilene kadar SÜS'te beklemek zorundadır.

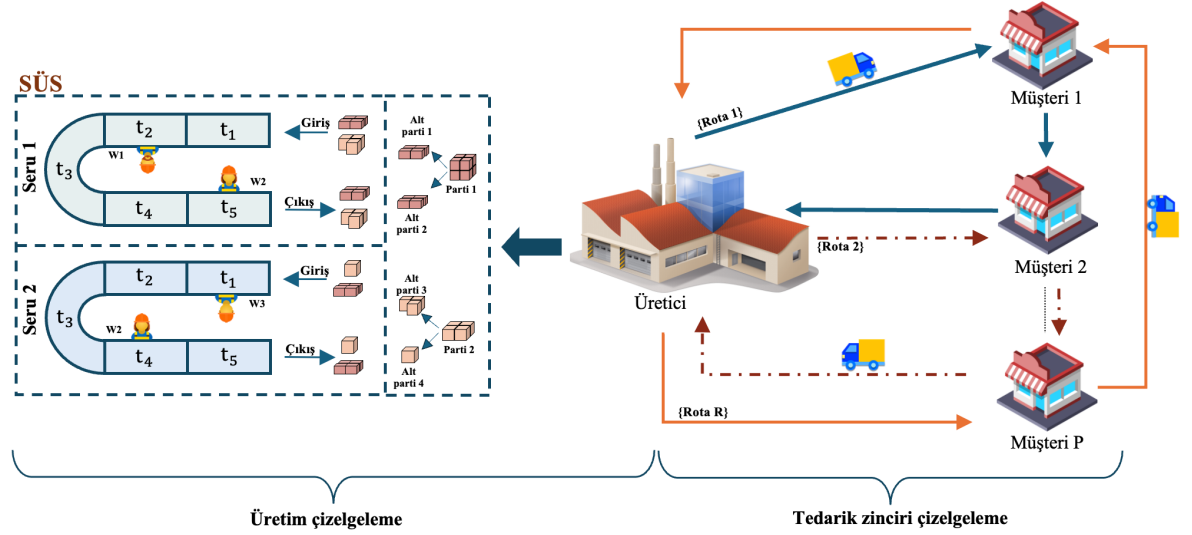
Özetle ele alınan problem şu şekilde tanımlanabilir:

- (i) Ürün tipi ve parti büyüklükleri bilinen bir sipariş kümesi,
- (ii) herhangi bir ürün tipini üretebilen bir seru kümesi, ve
- (iii) tüm ürünler için tüm görevleri herhangi bir seruda gerçekleştirebilen çok becerili çalışanlar

Bu yapı altında, temel amaç ortalama müşteri temin süresini en aza indiren bir üretim ve dağıtım çizelgesi geliştirmektir. Bu kapsamda alınan kararlar şu şekildedir:

- (i) Her müşteri siparişi için alt parti sayısı ve büyüklükleri,
- (ii) Her seruya atanacak çalışan sayısı ve ilgili alt partiler,
- (iii) Alt partilerin serulara atanması ve her seru içindeki sıralaması,
- (iv) Her alt partinin her seruda başlama ve bitiş zamanları,
- (v) Alt partilerin araçlara atanması,
- (vi) Alt partileri müşterilere teslim etmek için araçların başlama ve bitiş zamanları.

Ele alınan problemin yapısı Şekil 4.1'de görselleştirilmiştir. Şekilde, üretim merkezi içinde yer alan birden fazla serunun, müşteri siparişlerine bağlı olarak üretim süreçlerini yürüttüğü gösterilmektedir. Her müşteri siparişi, belirlenen parti büyüklüğüne göre alt partilere bölünmekte ve üretim sürecine dahil edilmektedir. Alt partiler, atandıkları serularda işlem görerek belirlenen üretim sırasına göre tamamlanmaktadır. Üretimi biten alt partiler, önceden tanımlanmış taşıma rotaları ve kapasite kısıtları doğrultusunda uygun araçlara atanarak müşterilere teslim edilmektedir. Şekil, üretim ve dağıtım süreçlerinin bütünsel yapısını ortaya koyarak probleme yönelik genel akışı detaylı olarak sunmaktadır.



Şekil 4.1 : Problemin görselleştirilmesi.

Problemin modellenmesini ve çözüm sürecini kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Her ürün tipi için tüm görevlerin işlem süreleri önceden bilinmektedir.
- Tüm siparişler, alt partiler, serular ve çalışanlar sıfır zamanında üretime hazırdır.
- Her müşteri siparişi, farklı bir ürün tipine karşılık gelmektedir.
- Her rota için farklı bir araç tahsis edilmiştir, yani her rota belirli bir araca atanmıştır.
- Araç sayısı yeterlidir, bu nedenle hiçbir araç, alt partileri müşterilere teslim etmeye başlamadan önce kullanılabilir olmayı beklemek zorunda değildir.
- Tüm araçlar aynı kapasiteye sahiptir.

4.2 Matematiksel Programlama Modeli

Bu bölümde, ele alınan problem için geliştirilen optimizasyon modeli sunulmaktadır. Model, parti büyüklüğü belirleme (parti büyüklüğü belirleme uygulanmaz, eşit alt parti ve değişken alt parti) ve çalışan transferi (transfere izin verilir ve verilmez) stratejilerine göre şekillendirilmiş olup toplam beş farklı modülden oluşmaktadır. Modelin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla, birinci modülde yer alan araç atama kararları yalnızca rastgele araç atama stratejisi kullanılarak formüle edilmiştir. Birinci modül değişken alt parti stratejisinin uygulandığı ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının yer aldığı temel modüldür. Tüm stratejiler temel modüle diğer modüllerin

eklenmesi ile gerçekleştirilir. İkinci modülün eşit alt parti stratejisinin uygulanmasını sağlarken üçüncü modül parti belirleme stratejisinin uygulanmasını engellemektedir. Dördüncü modülde çalışan transferine izin verilirken beşinci modülde ise çalışan transferine izin verilmez. Böylece modüllerin farklı kombinasyonları sayesinde ele alınan stratejilerin karşılaştırılması ve sistemin uygulanan stratejiler karşısında performansının ölçülmesi sağlanmaktadır. Aşağıda, geliştirilen modelin indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve modüllerde yer alan kısıtları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

İndisler

l : Parti indisi	$\{l \in L\}$
l', l'' : Alt-parti indisi	$\{l' \in L'_v, l'' \in L''_v\}$
p : Ürün tipi indisi	$\{p \in P\}$
t : Görevler indisi	$\{t \in T_p\}$
w : Çalışanlar indisi	$\{w \in W\}$
s : Serular indisi	$\{s \in S\}$
i, j : l' . alt partinin büyüklük indisi	$\{l \in L, i, j \in I_l; I_l = V_l\}$
r : Rotalar indisi	$\{r \in R\}$

Kümeler

P : Her biri bir müşteriyle ilişkilendirilmiş olan ürün tipleri kümesi

T_p : Ürün tipi p ile ilişkili görevler kümesini

S : Serular kümesi

W : Çalışanlar kümesi

L : Her biri bir müşteri siparişiyle ilişkilendirilmiş olan partiler kümesi

L'_l, L''_l : l partisine karşılık gelen alt partiler kümesi

I_l : l partinin büyüklük kümesi

F : Sistemdeki tüm alt partilerin kümesi $F = L'_1 \cup L'_2 \cup \dots \cup L'_{|L|}$

R : Olası rotalar kümesi

Parametreler

$\varphi_{l'p}$: Eğer l' alt parti p . ürün tipine aitse ise 1, aksi halde 0

r_{tp} : Eğer t . görev p . ürün tipi için yapılıyorsa 1, aksi halde 0

e_{tp} : t . görevin p . ürün tipi için işlem süresi

V_l : l . partinin parti büyüklüğü

Y_{rp} : p . ürün tipinin r . rotadaki toplam dağıtım süresi

τ_r : r . rotadaki araca atanabilecek alt parti sayısı

A : Toplam rota (araç) sayısı

U : Büyük sayı

$N_{l'}$: l' alt parti için yürütülecek maksimum çalışanların sayısı

Δ : Bir partinin bölünebileceği maksimum alt parti sayısı ($|L| \times \Delta = \sum_l |L'_l|$)

Karar Değişkenleri

$c_{l'}$: l' alt partinin tamamlanma (akış) zamanı

$p_{l'}$: l' alt partinin işlem süresi

$\kappa_{l'}$: l' alt partinin başlama zamanı

$B_{wl'}$: Eğer w . çalışan l' . alt partinin görevlerini yerine getiriyorsa 1, aksi halde 0

α_{ws} : Eğer w . çalışan s . seruya atanmışsa 1, aksi halde 0

$\eta_{l'l''}$: Eğer l' . alt partinin başlama zamanı l'' . alt partinin başlama zamanından küçükse 1, aksi halde 0

$m_{l'l''}$: Eğer l' . alt partinin tamamlanma zamanı l'' . alt partinin tamamlanma zamanından büyükse 1, aksi halde 0

$\Gamma_{wl'}$: w . çalışan için l' . Alt partinin işlem süresi

$A'_{l's}$: s . seru için l' . alt partinin parti büyüklüğünü belirleyen yardımcı değişken

$\delta_{l'}$: l' . alt partinin parti büyüklüğü

$x_{l's}$: Eğer l' . alt parti s . seruya atanmışsa 1, aksi halde 0

$y_{l'l''s}$: Eğer l' . alt parti s . seruda l'' . alt partiden önce işlenirse 1, aksi halde 0

$z_{ll'}$: Eğer l . parti l' . alt partiye ayrılmışsa 1, aksi halde 0

$\phi_{wtl'}$: Eğer w . çalışan l' . alt partinin t . görevini gerçekleştiriyorsa 1, aksi halde 0

$\vartheta_{il'}$: Eğer l' . alt partinin büyüklüğü i ise, 1; aksi halde, 0

$\Theta_{iwtl'}$: Eğer w . çalışan büyüklüğü i olan l' . alt partinin t . görevini gerçekleştirirse, 1; aksi halde, 0

$q_{l'r}$: Eğer l' . alt parti r . rotadaki araca atanmışsa 1; aksi halde, 0

χ_r : Eğer r . rota kullanılırsa, 1; aksi halde, 0

$H_{l'}$: l' . Alt partinin dağıtımına başlama zamanı

$\lambda_{l'}$: l' . alt partinin temin süresi

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } OTS = \sum_{l' \in F} \lambda_{l'} / |F| \quad (4.1)$$

Denklem (4.1) amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunda ortalama müşteri temin süresi hesaplanmaktadır.

Modül 1 Kısıtları: Değişken alt parti ve tedarik zinciri çizelgeleme için tasarlanmış temel modül

Öyle ki

$$\begin{aligned} \lambda &\geq H_{l'} + \left(\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} q_{l'r} \gamma_{rp} \phi_{l'p} \right) \\ l' &\in L', l \in L \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$H_{l'} \geq c_{l'} \quad l' \in L', l \in L \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} H_{l'} - H_{l''} &\geq (q_{l'r} + q_{l''r} - 2) \times U \\ l' &\in L', l'' \in L'', l' \neq l'', r \in R, l \in L \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} H_{l'} - H_{l''} &\leq (2 - q_{l'r} - q_{l''r}) \times U \\ l' &\in L', l'' \in L'', l' \neq l'', r \in R, l \in L \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\sum_{r \in R} q_{l'r} \geq z_{ll'} \quad l' \in L', l \in L, \quad (4.6)$$

$$\sum_{l' \in L'_l} q_{l'r} \leq \tau_r \quad r \in R, l \in L, \quad (4.7)$$

$$q_{l'r} \leq \chi_r \quad r \in R, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.8)$$

$$\sum_{r \in R} \chi_r \leq A \quad r \in R \quad (4.9)$$

Denklem (4.2) ve (4.3), bir alt partinin temin süresinin, ilgili alt partinin akış süresine eşit veya ondan büyük olmasını sağlar. Bir alt parti, SPS'de üretildikten sonra, müşteri teslimatı için bir araca atanır. Bu nedenle, bir alt partinin temin süresi, akış süresi, üretim sonrası bekleme süresi ve taşıma süresinin toplamıdır. Denklem (4.4) ve (4.5), aynı araca atanan alt partilerin dağıtım başlama zamanının aynı olmasını garanti eder. Bir alt parti, aynı araca atanan diğer alt partilerden daha erken üretilse bile, bitmiş alt partiler, geri kalan alt partilerin üretilmesini beklemek zorundadır.

Denklem (4.6), bir partinin alt partisinin bir araca atanması gerekliliğini sağlar. Denklem (4.7), bir araca atanan alt parti sayısının, aracın kapasitesini aşamayacağını belirtir, bu kapasite belirli bir alt parti sayısı ile sınırlıdır. Bu denklemlerde, rotalar ve araçlar aynı kabul edilir, çünkü her rota için ayrı bir araç atanmıştır. Denklem (4.8) ve (4.9), alt partilerin yalnızca belirli bir rotaya atanan bir araca atanabilmesini sağlar. Ayrıca, maksimum araç sayısına, yani olası rotalara bir sınır vardır.

$$c_{l'} = p_{l'} + \kappa_{l'} \quad l' \in L'_l, l \in L \quad (4.10)$$

Denklem (4.10), bir alt partinin tamamlanma süresinin, başlangıç zamanı ile işlem süresinin toplamına eşit olmasını sağlar. Diğer bir deyişle, herhangi bir alt parti için kesintilere veya önceliklendirmelere izin verilmez.

$$p_{l'} \geq \Gamma_{wl'} \quad w \in W, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.11)$$

$$\Gamma_{wl'} \geq \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_{tp} \times \varphi_{l'p} \times i \times \Theta_{iwtl'} \quad (4.12)$$

$$w \in W, l' \in L'_l, l \in L, i \in I$$

Denklem (4.11) ve (4.12), bir alt partinin işlem süresini hesaplamak için kullanılır. Denklem (4.11) ise işlem süresinin tüm çalışanların çalışma sürelerine eşit veya onlardan büyük olmasını sağlar. Buna karşılık, Denklem (4.12) çalışanların çalışma sürelerini belirlemek için kullanılır.

$$\phi_{wtl'} = \sum_{i \in I} \Theta_{iwtl'} \quad w \in W, l' \in L'_l, l \in L, t \in T \quad (4.13)$$

$$\vartheta_{il'} \geq \Theta_{iwtl'} \quad w \in W, l' \in L'_l, l \in L, t \in T, i \in I \quad (4.14)$$

Denklem (4.13) ve (4.14), bir çalışan bir alt partinin görevine atandığında, çalışanın ilgili alt partinin boyutuyla da ilişkilendirilmesini sağlar. Bu, alt parti boyutunun tüm ilgili karar değişkenlerinde tutarlı olmasını garanti eder.

$$\vartheta_{il'} + \vartheta_{jl'} \leq 1 \quad l' \in L'_l, l \in L, i \in I, j \in I, i \neq j \quad (4.15)$$

$$i \times \Theta_{iwtl'} \leq \delta_{l'} \quad w \in W, l' \in L'_l, l \in L, t \in T, i \in I \quad (4.16)$$

$$\sum_{l' \in L'_l} \delta_{l'} = V_l \quad l \in L \quad (4.17)$$

Denklem (4.15) ve (4.16), bir alt partiye yalnızca bir boyut atanmasını sağlarken Denklem (4.17) ise ilgili partinin alt parti boyutlarının toplamının partinin boyutuna eşit olmasını garanti eder.

$$\mathcal{B}_{wl'} \geq \phi_{wtl'} \quad w \in W, t \in T, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.18)$$

Denklem (4.18) bir çalışanın bir alt partideki görevi yürütmesi durumunda, o çalışanın ilgili alt partiye atanması gerektiğini belirtir. Başka bir deyişle, çalışan-görev atama kararlarının, çalışan-alt parti atamalarıyla tutarlı olmasını sağlar.

$$\sum_{w \in W} \phi_{wtl'} = z_{ll'} \times \sum_{p \in P} \varphi_{l'p} \times r_{tp} \quad t \in T, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.19)$$

Denklem (4.19), bir görev bir alt parti için gerçekleştirilecekse ve bu alt parti ilgili parti için değerlendiriliyorsa, ilgili görevi gerçekleştirmek üzere bir çalışanın atanmasını sağlar.

$$\sum_{w \in W} \mathcal{B}_{wl'} \leq N_{l'} \quad l' \in L'_l, l \in L \quad (4.20)$$

Denklem (4.20) bir alt parti için seruda operasyon yürüten toplam çalışan sayısını kısıtlar. Spesifik olarak, belirli bir alt parti için belirli bir serudaki görevleri gerçekleştirmek üzere atanabilecek çalışan sayısına bir sınır koyar.

$$\kappa_{l''} - c_{l'} + U \times (3 - y_{l'l''s} - x_{l's} - x_{l''s}) \geq 0$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.21)$$

Denklem (4.21) aynı serudaki ardışık alt partilerin başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki bağlantıyı tanımlar. Bir alt partinin aynı serudaki başka bir alt partiden önce işlenmesi durumunda, ikinci alt partinin başlangıç zamanının önceki alt partinin tamamlanma süresinden daha büyük veya ona eşit olmasını sağlar.

$$\delta_{l'}/U \leq z_{ll'} \leq \delta_{l'} \quad l' \in L'_l, l \in L \quad (4.22)$$

Denklem (4.22), boyutu sıfırdan büyük olmadığı sürece bir alt partinin dikkate alınmamasını sağlar. Sıfır boyutuna sahip alt partilerin herhangi bir işleme gereksinimi olmayacağından ve planlamaya dahil edilmeleri gereksiz olacağından bu kısıtlama önemlidir.

$$z_{ll'+1} \leq z_{ll'} \quad l' \in L'_l, l \in L \quad (4.23)$$

Denklem (4.23) bir partinin bir alt partisinin bir serü üzerinde planlama için dikkate alınması durumunda, aynı partinin bir önceki alt partisinden de bir serü üzerinde planlanmasını zorunlu kılar.

$$y_{l'l''s} + y_{l''l's} \leq 1$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.24)$$

$$y_{l'l''s} + y_{l''l's} \leq x_{l's} + x_{l''s}$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.25)$$

$$x_{l's} + x_{l''s} - 1 \leq y_{l'l''s} + y_{l''l's}$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.26)$$

Denklem (4.24), Denklem (4.25) ve Denklem (4.26) aynı seruya atanan alt partilerin işlenme sırası arasındaki ilişkiyi belirtir.

$$\sum_{s \in S} x_{l's} = z_{ll'} \quad l' \in L'_l, l \in L \quad (4.27)$$

Denklem (4.27) eğer bir alt parti dikkate alınırsa, bunun işlenmek üzere bir ve yalnızca bir seruya atanması gerektiğini belirtir. Ancak bu aynı zamanda bir partinin alt

partilerinin mutlaka aynı seruda işlenmesi gerekmeyebileceği ihtimaline de izin verir. Başka bir deyişle, aynı partiden farklı alt partiler, çalışan-görev atamalarına ve diğer kararlara bağlı olarak farklı serularda işlenebilir.

$$A_{l's} \leq x_{l's} \times U \quad s \in S, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.28)$$

$$\delta_{l'} = \sum_{s \in S} A_{l's} \quad s \in S, l' \in L'_l, l \in L \quad (4.29)$$

Denklem (4.28) and (4.29) belirli bir alt parti dikkate alındığında bir alt partinin boyutunun sıfırdan büyük olabileceğini belirtir. Ek olarak bu kısıtlamalar, bir alt partinin boyutunun yalnızca alt partinin atandığı seru için tanımlanmasını sağlar.

Modül 2 Kısıtları: Eşit alt parti stratejisi için tasarlanmış modül

$$\begin{aligned} \delta_{l'} - \delta_{l''} &\leq (2 - z_{ll'} - z_{ll''}) \times U \\ l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \delta_{l'} - \delta_{l''} &\geq (z_{ll'} + z_{ll''} - 2) \times U \\ l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \end{aligned} \quad (4.31)$$

Eşit alt parti stratejisinin uygulanabilmesi için, bir partideki tüm alt partilerin aynı boyutta olmasını sağlayan kısıtlama Denklem (4.30)-(4.31) ile ifade edilen ikinci modül aracılığıyla tanımlanmaktadır. Bu modül modelden çıkarıldığında, problem yalnızca değişken alt partiler için formüle edilir.

Modül 3 Kısıtları: Parti büyüklüğü belirleme stratejisinin uygulanmaması için tasarlanmış modül

$$\sum_{l' \in L'_l} z_{ll'} = 1 \quad l \in L \quad (4.32)$$

Denklem (4.32), SÜS için iş gücü planlamasında herhangi bir parti büyüklüğü belirleme stratejisinin uygulanmasını engeller. Ortalama müşteri temin süresi açısından parti akışının SÜS performansı üzerindeki etkisini araştırmak için birinci ve üçüncü modüllerin birleştirilmesi gerekir.

Modül 4 Kısıtları: Çalışan transferine izin verilen durumlar için tasarlanmış modül

$$3 - (\eta_{l'l''} + m_{l'l''}) \geq \mathcal{B}_{wl'} + \mathcal{B}_{wl''} \quad (4.33)$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L$$

$$U \times \eta_{l'l''} \geq \kappa_{l''} - \kappa_{l'}$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.34)$$

$$U \times m_{l'l''} \geq c_{l'} - \kappa_{l''}$$

$$l' \in L'_l, l'' \in L''_l, l' \neq l'', l \in L \quad (4.35)$$

Denklem (4.33), Denklem (4.34) ve Denklem (4.35), SÜS'te çalışan hareketliliğine izin vererek Shojinka uygulamasından tam olarak faydalanılmasını sağlar. Bu kısıtlar, temel modüle dahil edilebilir ve temel modül, değişken alt parti boyutlarına izin verdiği için Shojinka ve değişken alt parti metodolojisini birleştiren senaryoları gerçekleştirebilir.

Modül 5 Kısıtları: Çalışan transferine izin verilmeyen durumlar için tasarlanmış modül

$$\alpha_{ws} \geq \mathcal{B}_{wl'} + x_{l's} - 1 \quad (4.36)$$

$$w \in W, s \in S, l' \in L'_l, l \in L$$

$$\sum_s \alpha_{ws} \leq 1 \quad w \in W \quad (4.37)$$

Denklem (4.36) ve (4.37) SÜS'te çalışan hareketliliğini engelleyen beşinci modülü temsil eder. Bu modülün eklenmesi ilgili dönem boyunca serudaki çalışan sayısının değişmemesini sağlar. Eğer çalışanlar arası işçi transferine izin verilmiyorsa, birinci ve beşinci modüllerin birlikte değerlendirilmesi gerekir.

$$x_{l's}; \phi_{wtl'}; y_{l'l''s}; z_{l'l}; m_{l'l''}; \alpha_{ws}; \mathcal{B}_{wl'} \in \{0,1\} \quad (4.38)$$

$$w \in W, t \in T, s \in S, l' \in L'_l, l'' \in L''_l$$

$$\delta_{l'}; c_{l'}; p_{l'}; \kappa_{l'}; A_{l's}; \Gamma_{wl'}; \theta_{iwtl'}; \vartheta_{il'}; \lambda \geq 0 \quad (4.39)$$

$$w \in W, s \in S, l' \in L'_l$$

Denklem (4.38) ve (4.39), sırasıyla değişkenler için ikili ve işaret kısıtlamalarını sağlar.

4.3 Sayısal Örnek

Önerilen modelin doğruluğunu göstermek ve ele alınan problemdeki değişkenler arasındaki ilişkiyi daha iyi açıklamak için sayısal bir örnek aşağıda incelenmektedir. Verilen örnek veriler üzerinden, geliştirilen matematiksel model, GAMS 24.7/CPLEX çözücüsü ile 2.50 GHz işlemci ve 16 GB RAM donanımına sahip bir bilgisayarda çözülmüştür. Tasarlanan örnek aşağıda detaylıca açıklanmaktadır;

İki ürün tipi, iki serü, üç çalışan, iki güzergâh/araç ve iki müşteriden oluşan bir sistem ele alınmaktadır. Birinci müşteri ilk üç görevi gerektiren bir ürünü ($r_{11}=r_{21}=r_{31}=1$) sipariş ederken, ikinci müşteri beş görevin tamamını gerektiren bir ürünü ($r_{12}=r_{22}=r_{32}=r_{42}=r_{52}=1$) sipariş etmektedir. Her görevin işlem süresi 0,1 dakikadır ($e_{11}=e_{21}=e_{31}=e_{12}=e_{22}=e_{32}=e_{42}=e_{52}=0,1$). Siparişlerin parti büyüklükleri sırasıyla 200 ve 100 birimdir, yani $L = \{1,2\}$, $L_1 = 200$ ve $L_2 = 100$ 'dür. Ayrıca, her parti en fazla iki alt partiye bölünebilir ($\Delta = 2$). Bir serüya tahsis edilebilecek maksimum çalışan sayısı üç ile sınırlıdır, yani $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 3$ 'tür. Tamamlanan alt partiler, 20 ve 25 dakika taşıma süresine sahip iki güzergâh boyunca teslim edilebilir ($Y_{11}=Y_{12}=20$; $Y_{21}=Y_{22}=20$). Her araca maksimum 3 adet alt parti yüklenebilir, yani $\tau_1=\tau_2=3$ 'tür.

Bu problem örneğinde, geliştirilen matematiksel modelin modülleri kullanılarak farklı stratejilerin karşılaştırılmasını sağlayan senaryolar oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 4.2, bu senaryoların hangi stratejilere karşılık geldiğini ve modelde hangi modüllerin kullanıldığını göstermektedir.

	Eşit Alt Parti Stratejisi	Değişken Alt Parti Stratejisi	Parti Büyüklüğü Belirleme Stratejisi Uygulanmaz
Çalışan Transferine İzin Verilir	Senaryo 1 (S1) Modül 1 & Modül 2 & Modül 4	Senaryo 3 (S3) Modül 1 & Modül 4	Senaryo 5 (S5) Modül 1 & Modül 3 & Modül 4
Çalışan Transferine İzin Verilmez	Senaryo 2 (S2) Modül 1 & Modül 2 & Modül 5	Senaryo 4 (S4) Modül 1 & Modül 5	Senaryo 6 (S6) Modül 1 & Modül 3 & Modül 5

Şekil 4.2 : Senaryolara ait stratejiler ve modüller.

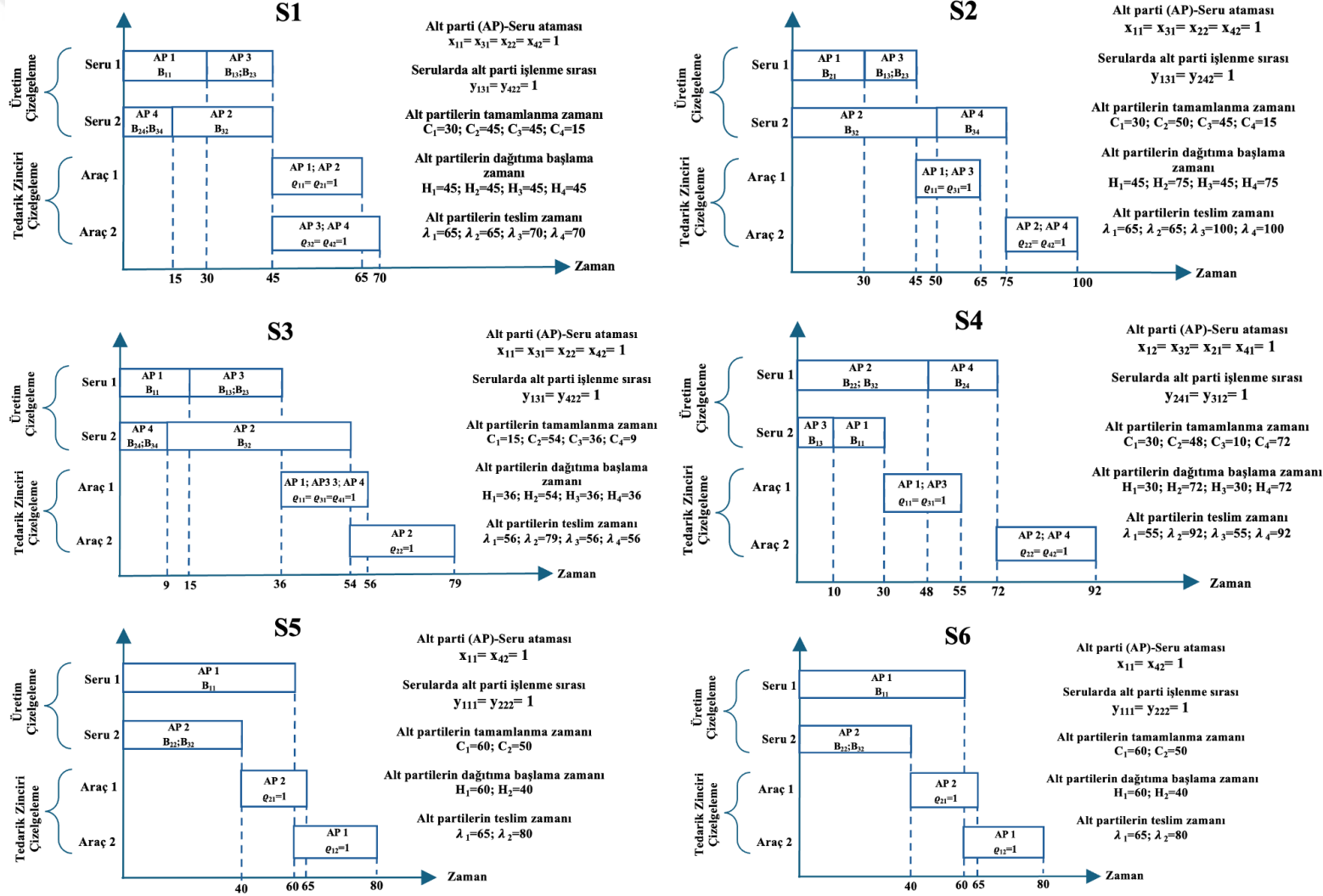
Senaryolar doğrultusunda gerçekleştirilen örnek çözümde, her partinin bölünebileceği maksimum alt parti sayısını belirleyen Δ parametresinin, parti bölme ve alt parti boyutu kararlarını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Bu örnekte, her sipariş iki alt partiye bölünerek işlenmiştir. Buna göre, tüm senaryolarda parti-alt parti atama karar değişkenleri $z_{11}=1$, $z_{12}=1$, $z_{23}=1$ ve $z_{24}=1$ olarak belirlenmiştir. Her senaryo için elde edilen alt parti büyüklükleri, amaç fonksiyonu değerleri ve CPU süreleri, karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi adına Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Senaryolar bazında elde edilen sonuçlara ilişkin karar değişkenleri ve çizelgeler de Şekil 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Senaryo sonuçları.

Senaryolar	Amaç Fonksiyonu (OTS)	1. Parti (200)		2. Parti (100)		CPU (sn)
		1. Alt Parti Büyüklüğü (δ_1)	2. Alt Parti Büyüklüğü (δ_2)	3. Alt Parti Büyüklüğü (δ_3)	4. Alt Parti Büyüklüğü (δ_4)	
S1	67,5	100	100	50	50	902,32
S2	82,5	100	100	50	50	1082,76
S3	61,75	50	150	30	70	1476,45
S4	73,5	40	160	20	80	1593,64
S5	72,5	200	0	100	0	993,57
S6	72,5	200	0	100	0	995,57

En düşük amaç fonksiyonu değerine sahip olan Senaryo 3’ün sonuçları incelendiğinde, ele alınan stratejiler doğrultusunda partilerin değişken alt partilere bölündüğü görülmektedir ($\delta_1 = 50$; $\delta_2 = 150$; $\delta_3 = 30$; $\delta_4 = 70$). Bu senaryoda, 1. ve 3. alt partiler 1. seruya atanırken ($x_{11}=x_{31}=1$) 2 ve 4. alt partiler 2. seruya ($x_{22}=x_{42}=1$) atanmaktadır. Seru bazında çalışan-görev atamaları incelendiğinde, Seru 1’de 1. çalışan tüm görevlere atanırken, 2. çalışan yalnızca 4. ve 5. görevlere atanmıştır. Seru 2’de ise 3. çalışan tüm görevlere atanırken, 2. çalışan 1, 2 ve 3. görevlere atanmıştır. Çalışanların alt partilere atanması, çalışan-görev atama kararlarından doğrudan etkilenmektedir. Buna göre, 1. çalışan 1 ve 3. alt partiye atanırken ($B_{11}=1$, $B_{13}=1$) 2. çalışan 3 ve 4. alt partiye atanmaktadır ($B_{23}=1$, $B_{24}=1$). Burada çalışan transferine izin verildiği için 2. çalışan serular arasında transfer edilmektedir. 3. çalışan ise 2 ve 4. alt partilere atanmıştır ($B_{32}=1$, $B_{34}=1$). Partilerin bölünmesi, çalışanların görevlere atanması ve alt parti boyutlarının belirlenmesi, alt partilerin işlem sürelerinin

hesaplanmasını sağlamaktadır. Böylece işlem süreleri $p_1=15$, $p_2=45$, $p_3=21$, $p_4=9$ olarak belirlenmiştir. Alt partilerin tamamlanma zamanları, çalışan atamaları, alt partilerin sıralaması ve işlem sürelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü üzere tamamlanma zamanları $c_1=15$, $c_2=54$, $c_3=36$, $c_4=9$ olarak elde edilmiştir. Alt partilerin araçlara atanmasıyla ilgili kararlar, alt partilerin tamamlanma sürelerinden etkilenmektedir. Bu örnekte, alt parti 1, 3 ve 4, 1. güzergâhtaki 1. araca atanırken ($q_{11} = q_{31} = q_{41} = 1$) alt parti 2, 2. güzergâhtaki 2. araca atanmıştır ($q_{22} = 1$). Alt partilerin araçlara atanması ve tamamlanma süreleri belirlendiğinden, dağıtım başlama zamanları da $S_1 = 36$, $S_2 = 54$, $S_3 = 36$, $S_4 = 36$ olarak hesaplanmıştır. Bir alt partinin dağıtım başlama zamanı ile güzergâhtaki toplam taşıma süresi toplanarak da o alt partinin müşteri temin süresi hesaplanmaktadır ($\lambda_1 = 56$, $\lambda_2 = 79$, $\lambda_3 = 56$, $\lambda_4 = 56$). Son olarak da amaç fonksiyonu tüm alt partilerin toplam temin süresinin toplam alt parti sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır ($OTS= 61,75$).



Şekil 4.3 : Senaryo sonuçlarının çizelgelenmesi ve karar değişkenleri.



5. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALAR

Bu tez kapsamında ele alınan SÜS'te üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemi, esnek kaynaklarla paralel makine çizelgeleme (Edis ve Oğuz, 2012) ile SÜS'te çalışan atama ve çizelgeleme problemleri (Luo vd., 2017; Gürsoy Yılmaz vd., 2023) gibi iyi bilinen NP-zor problemlerle yakından ilişkili karmaşık bir yapıya sahiptir. Özellikle, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararları hariç tutulduğunda, ele alınan problemin çalışan ataması ile birlikte çizelgeleme problemine dönüştüğü ve bu problemin NP-zor olduğu daha önce kanıtlanmıştır (Yu vd., 2016; Yılmaz, 2020a). Dolayısıyla, tedarik zinciri çizelgeleme kararlarını da içeren bu problemin güçlü NP-zor olduğu söylenebilir. NP-zor problemlerin hesaplama karmaşıklığı göz önüne alındığında, makul süreler içinde optimal çözüme yakın sonuçlar elde etmek için genellikle sezgisel ve metasezgisel algoritmalar tercih edilmektedir (Li vd., 2023; Wu vd., 2021). Bu doğrultuda, bu çalışma da SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme probleminin yapısal özelliklerine dayalı olarak GA ve YAK tabanlı geliştirilen çözüm yaklaşımları önerilmektedir.

Holland (1992) tarafından geliştirilen GA, doğal seçimden ilham alan evrimsel bir optimizasyon tekniğidir. GA, başlangıçta kromozomlar ile bir çözüm popülasyonu oluşturur ve seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri aracılığıyla bu popülasyonu yinelemeli olarak iyileştirerek arama uzayını etkili bir şekilde keşfeder ve değerlendirir (Kramer ve Kramer, 2017). Öte yandan, Karaboga ve Akay (2009) tarafından önerilen YAK algoritması ise, bal arılarının yiyecek arama davranışını taklit etmektedir. Çözümler, nektar kaynakları olarak görülür ve üç tip arı tarafından değerlendirilir. İşçi arılar, belirli çözüm noktalarına atanarak bu çözümleri değerlendirir ve komşu çözümler üreterek iyileştirme yapmaya çalışır. Daha iyi bir çözüm bulunursa eski çözüm güncellenir, aksi takdirde mevcut çözüm korunur. İzleyici arılar ise işçi arıların getirdiği bilgilere göre en iyi çözümleri seçerek arama sürecini yönlendirir ve daha verimli kaynaklara odaklanarak sürecin hızlanmasını sağlar. Gözcü arılar ise uzun süre geliştirilemeyen çözümleri tespit eder ve bunları terk ederek rastgele yeni çözümler

üretir. Bu sayede çözüm uzayında çeşitlilik sağlanarak algoritmanın yerel minimuma sıkışması önlenir (Karaboga ve Akay, 2009; Karaboga ve diğ., 2014).

GA ve YAK yöntemleri kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde yüksek kaliteli çözümler bulma konusundaki etkinliğini göstermesi ve literatürde yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle seçilmiştir. Örneğin, GA, hat dengeleme ve çizelgeleme problemlerinde başarılı sonuçlar verirken (Sadegheih, 2006; Moon, 2006; Yılmaz, 2020a; Amirteimoori, 2022), YAK ise kaynak tahsisi, sırt çantası ve çizelgeleme problemlerinde etkilidir (Lei ve Guo, 2013; Yurtkuran ve Emel, 2016; Yılmaz ve Pardalos, 2017). Bu tür problemlere uygulandığında, çözüm çeşitliliği sağlayan çaprazlama ve mutasyon gibi mekanizmalar sayesinde GA'nın, özellikle hızlı yakınsama durumlarında daha iyi performans gösterebileceği görülmektedir (Muthiah ve Rajkumar, 2014). Öte yandan, YAK hızlı yakınsamaya dayalı olmadığından, sonraki iterasyonlar için alternatif çözümler üretmek amacıyla kullanılan operatörlerin sınırlamalarına takılmadan uzun vadede daha iyi çözümler bulma ve yerel optimal noktalara sıkışmayı önleme eğilimindedir (Karaboga ve Akay, 2009). Genel olarak, GA'nın iyi tanımlanmış bir uygunluk fonksiyonu sahip problemlerde yüksek kaliteli çözümler üretmesi beklenirken, YAK daha karmaşık ve çoklu yerel optimal noktalar içeren problemlerde üstün performans göstermektedir. Bunun nedeni, YAK'nın keşif ve değerlendirme mekanizmalarının bu tür ortamları daha etkin şekilde yönetebilmesidir (Kaya ve diğ., 2022). Bu doğrultuda, ele alınan problem için GA ve YAK yaklaşımlarının performanslarını karşılaştırmak amacıyla kapsamlı hesaplamalı analizler gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de iki algoritmaya da ait sözde kodlar sunulmaktadır.

girdi: popülasyon boyutu (ps), maksimum iterasyon sayısı (mni), mutasyon olasılığı (mp), çaprazlama olasılığı (cp), elitist çözüm sayısı (nes)

başla

i=1; (iterasyon sayacı)

ps kullanarak başlangıç popülasyonu oluştur;

uygunluk fonksiyonu değerlerini hesapla;

i ≤ mni **iken**

 rulet çarkı seçme operatörünü uygula;

 cp ile çaprazlama operatörünü uygula;

 mp ile mutasyon operatörünü uygula;

 uygunluk fonksiyonu değerlerini hesapla;

 nes ile elitizm operatörünü uygula;

 i=i+1;

Şekil 5.1 : Geliştirilen GA tabanlı algoritmalar için sözde kodlar.

döngü sonu

her iterasyondaki en iyi çözümleri döndür;

bitir

çıkıtı: en iyi çözüm

Şekil 5.1 (devamı): Geliştirilen GA tabanlı algoritmalar için sözde kodlar.

girdi: popülasyon boyutu (ps), maksimum iterasyon sayısı (mni), işçi arı sayısı (neb), gözlemci arı sayısı (nob), iyileşmeyen çözüm için izin verilen toplam iterasyon sayısı (lni)

başla

i=1; (iterasyon sayacı)

t=0; (artış sayacı)

ps kullanarak başlangıç popülasyonu oluştur;

uygunluk fonksiyonu değerlerini hesapla;

i≤mni iken

 j=1: neb (İşçi arı aşaması) **için**

 rastgele bir besin kaynağı seç;

 çaprazlama operatörü ile komşu çözümü bul;

 uygunluk fonksiyonu değerini hesapla;

 çözümü iyileştirmek için mutasyon operatörünü uygula;

eğer çözüm iyileşir **ise**

 işçi arıyı güncelle;

 aksi halde

 t=t+1;

eğer sonu

döngü sonu

 j=1: nob (Gözlemci arı aşaması) **için**

 rulet çarkı seçme operatörü ile bir çözüm seç;

 çaprazlama operatörü ile yeni bir çözüm oluştur;

 uygunluk fonksiyonu değerini hesapla;

eğer çözüm iyileşir **ise**

 gözlemci arıyı güncelle;

değilse

 t=t+1;

eğer sonu

döngü sonu

 j=1: ps (Keşifçi arı aşaması) **için**

eğer t=lni **ise**

 çözümü terk et;

 başlangıç popülasyonu oluşturma ile yeni çözüm üret;

değilse

 mevcut çözümle devam et;

eğer sonu

döngü sonu**döngü sonu**

her iterasyondaki en iyi çözümleri döndür;

bitir

çıkıtı: en iyi çözüm

Şekil 5.2 : Geliştirilen YAK tabanlı algoritmalar için sözde kodlar.

Bu yaklaşımlar iki temel amaç doğrultusunda geliştirilmiştir. İlk olarak, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının koordinasyonunun sistem performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, üretim çizelgeleme için parti büyüklüğü belirleme ve çalışan transferi stratejileri, tedarik zinciri çizelgeleme için ise araç atama stratejileri olmak üzere, her biri iki alt stratejiden oluşan karar mekanizmaları oluşturulmuştur. Bu stratejilerin değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan kombinasyonlar doğrultusunda, GA ve YAK için sekizer çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

İkinci olarak, çaprazlama metotları arasındaki farklılıkları karşılaştırmak hedeflenmektedir. Bu kapsamda, oluşturulan sekiz çözüm yaklaşımının her biri için tek noktalı ve çift noktalı çaprazlama teknikleri uygulanarak toplam çözüm yaklaşımı sayısı iki katına çıkarılmıştır. Sonuç olarak hem GA hem de YAK için 16'şar çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımlarının açıklamaları ve strateji kombinasyonları da aşağıda verilmektedir. Ayrıca problem özellikleri, stratejiler ve geliştirilen yaklaşımlar Şekil 5.3'de de görselleştirilmiştir.

GA tabanlı çözüm yaklaşım açıklamaları;

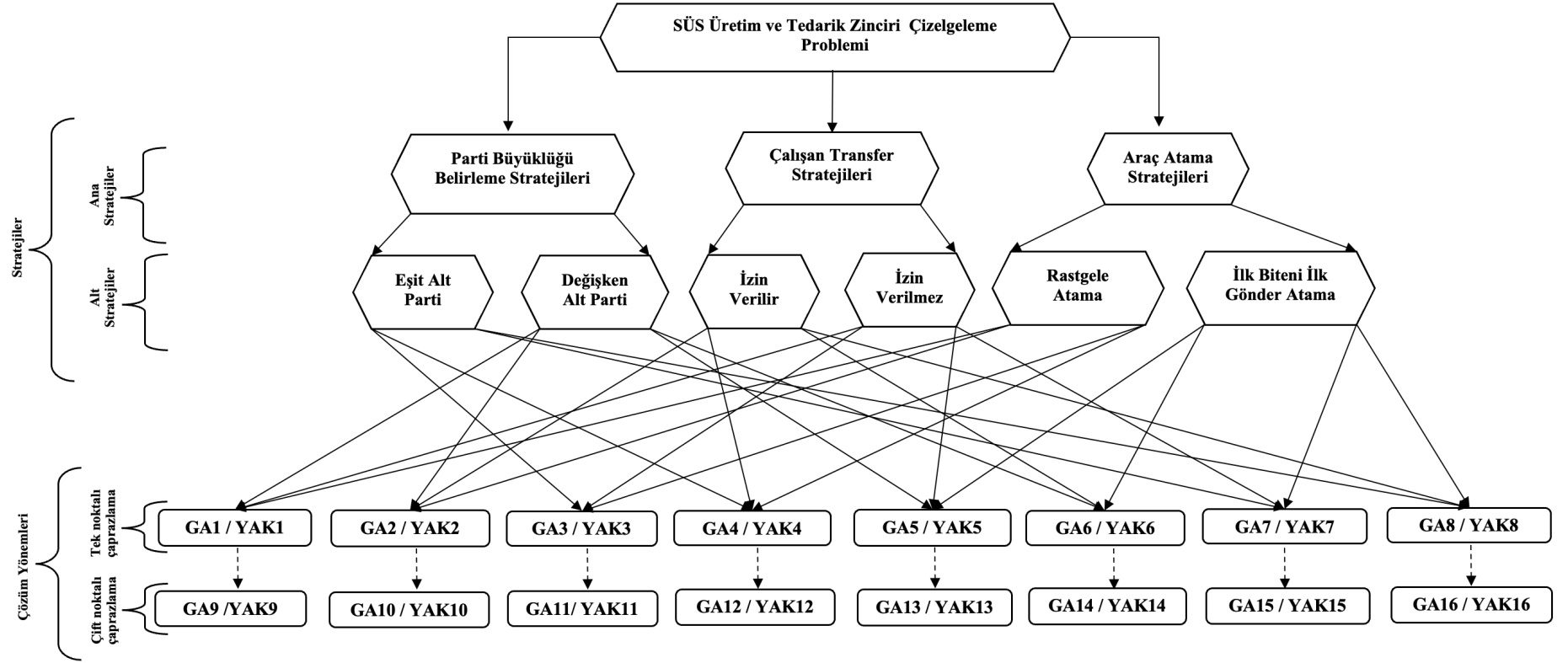
- GA1: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA2: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA3: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA4: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA5: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA6: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA7: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA

- GA8: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA9: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA10: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA11: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA12: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA13: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA14: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA15: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA
- GA16: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı GA

YAK tabanlı çözüm yaklaşım açıklamaları;

- YAK1: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK2: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK3: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK4: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK

- YAK5: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK6: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK7: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK8: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve tek noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK9: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK10: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK11: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK12: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, rastgele araç atama ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK13: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK14: Değişken alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK15: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilmeyen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK
- YAK16: Eşit alt parti stratejisi uygulanırken, çalışan transferine izin verilen, ilk biteni ilk gönder stratejisi ile araç ataması ve çift noktalı çaprazlamanın yapıldığı YAK



Şekil 5.3 : Stratejiler ve çözüm yaklaşımları.

5.1 Kromozom Kodlama ve Çözümleme

Meta-sezgisel tabanlı algoritmaların etkin bir şekilde uygulanabilmesi için bireylerin doğru bir şekilde temsil edilmesi ve bu bireylerden anlamlı çözümler elde edilmesi büyük önem taşımaktadır (Gürsoy Yılmaz ve diğ., 2025). Bu doğrultuda, ele alınan problem için uygun bir çözüm uzayı oluşturmak amacıyla, problemin özelliklerine uygun bir kromozom yapısı tasarlanmış ve bu yapı, algoritmaların çözüm üretme kapasitesini artıracak şekilde geliştirilmiştir.

Önerilen kromozom yapısı, problemin farklı karar sınıflarına karşılık gelen beş ayrı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, parti-alt parti atama kararlarını ve alt partilerin sıralamalarını içerirken, ikinci bölümde alt parti-seru atama kararları yer almaktadır. Üçüncü bölümde seru mod kararlarını ele alınmaktadır. Çalışanların çok becerili ve aynı yeteneklere sahip olduğu varsayılmaktadır. Basitlik açısından, alt partileri işlemek için her seruya atanan çalışan sayısı seru modları ile temsil edilmektedir. Her mod, belirli bir seruya atanan çalışan sayısını ifade etmekte olup, çalışan-görev atamaları parametre olarak ele alınmaktadır. Optimizasyon modelinde çalışan-görev atamaları karar değişkeni olarak değerlendirilirken, çözüm yaklaşımlarında çalışan-görev atamaları parametre olarak ele alınmakta ve seru modları karar değişkeni olarak kullanılmaktadır. Her mod, belirli bir alt parti için bir seruya atanan çalışan sayısını yansıtmaktadır. Örneğin, bir mod iki olarak belirlenmişse, bu, ilgili alt parti için seruya iki çalışanın atandığını göstermektedir. Eğer bir seru için mod değişikliği oluyorsa o serular arası çalışan transferinin gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Ayrıca çevrim süresi, ürün türlerine bağlı olan çalışan-görev atama parametrelerine göre belirlenmektedir. Böylece, her ürün türü için çevrim süreleri, ilgili seruların modlarına göre tanımlanmaktadır.

Dördüncü bölüm alt parti büyüklüklerine ilişkin kararları içermektedir. Burada alt parti büyüklükleri, birinci bölümdeki alt parti sıralama aşamasında belirlenen sıraya göre düzenlenmektedir. Son olarak, beşinci bölümde ise araç atama kararları yer almaktadır ve alt partiler, aracın kapasitesi tamamen kullanılana kadar araçlara tahsis edilmektedir. Ayrıca, basitlik açısından, meta-sezgisel uygulamalarda araç kapasitelerinin büyüklüklerine göre ölçülmektedir. Her araç, farklı bir rotaya karşılık gelmekte olup, bu rotalar teslimat amacıyla tüm müşterileri içermektedir.

Şekil 5.4, üç müşteri siparişi (üç parti), iki serü, üç mod ve üç ürün türünü içeren bir örnek üzerinden kromozom yapısını göstermektedir. Bu örnek için kromozom aşağıdaki bilgileri kodlamaktadır:

Bölüm 1: Sipariş edilen partiler her biri iki alt partiye bölünmüştür. 1. Buna göre, 1. parti 1. ve 2. alt partiye, 2. parti 3. ve 4. alt partiye, 3. parti ise 5. ve 6. alt partiye ayrılmış olup işleme sırası 1,3,2,5,4,6 olarak belirlenmiştir.

Bölüm 2: 2, 3 ve 6 numaralı alt partiler serü 1'e, 1, 4 ve 5 numaralı alt partiler ise serü 2'ye atanmıştır.

Bölüm 3: İşleme sırasında her bir alt partiye belirlenen çalışan sayıları şu şekildedir: Alt Parti 1 için Serü 2'ye 1 çalışan, Alt Parti 3 için Serü 1'e 2 çalışan, Alt Parti 2 için Serü 1'e 1 çalışan, Alt Parti 5 için Serü 2'ye 2 çalışan, Alt Parti 4 için Serü 2'ye 3 çalışan ve Alt Parti 6 için Serü 1'e 2 çalışan atanmıştır.

Bölüm 4: Üretim sürecinde, partiler farklı büyüklüklerde alt partilere bölünmüştür. Buna göre, 1. parti (100 birim) 30 ve 70 birimlik, 2. parti (150 birim) 55 ve 95 birimlik ve 3. parti (200 birim) 100 ve 100 birimlik alt partilere ayrılmıştır.

Bölüm 5: Üretimi tamamlanan alt partilerin müşterilere dağıtımı için dört araç kullanılmış ve bu doğrultuda atamalar gerçekleştirilmiştir. 1. ve 2. alt parti 1. araca, 3. alt parti 2. araca, 5. ve 6. alt parti 3. araca, 4. alt parti ise 4. araca atanmıştır.

	Parti-alt parti atama						Seru atama			Seru modu			Alt parti büyüklüğü						Araç atama											
Parti	1	2	1	3	2	3	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	3	2	30	55	70	150	95	50	1	2	1	3	4	3
Alt Parti	1	3	2	5	4	6	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	3	2	30	55	70	150	95	50	1	2	1	3	4	3
	Bölüm 1						Bölüm 2			Bölüm 3			Bölüm 4						Bölüm 5											

Şekil 5.4 : Örnek kromozom yapısı

Bir kromozomda kodlanan kararlar yukarıda açıklandığı şekilde çözümlendiğinde, tüm alt partilerin üretim ve dağıtım planlamasına ilişkin işlem süreleri ile başlangıç ve bitiş süreleri hesaplanabilmektedir. Bu, ortalama müşteri temin süresinin (uygunluk fonksiyonu) hesaplanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, araç atama stratejileri olan rastgele ve ilk biteni ilk gönder stratejileri de çözümleme prosedürüne dahil edilmektedir. Yukarıdaki kromozom kodlaması için kullanılan çözümleme prosedürünün sözde kodları Şekil 5.5'te ve çözümleme gerçekleştiğinde elde edilen çizelge ise Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

girdi: alt partilerin sıralı kümesi (F), araçların sıralı kümesi (R), bir parti içindeki alt parti sayısı (Δ), toplam alt parti sayısı ($|L| \times \Delta$), çalışan sayısı ve ürün türleri ile ilişkili çevrim süresi (ϵ), alt parti boyutları (δ), toplam çalışan sayısı ($|W|$), araç kapasitesi (τ)

başlangıç

$i = 1$; (iterasyon sayacı)

$i \leq |F|$ **iken**

- i. alt partiyi kromozomda verilen sıraya göre F kümesinden çıkar;
- i. alt partinin işlem süresini, alt parti boyutu ve çevrim süresi ϵ kullanılarak hesapla;
- i. alt partinin üretim sürecindeki olası başlangıç ve bitiş zamanlarını belirle;
- LS listesini, i. alt parti için olası başlangıç ve bitiş zamanlarını içerecek şekilde oluştur;

$j = 1$;

$j \leq |LS|$ **iken**

- i. alt parti ile çakışan daha önce atanmış alt partileri LS'ye göre belirle;
- LS listesindeki en küçük başlangıç zaman seçeneği için toplam işçi sayısını hesapla;

eğer $|W|$ aşılmadıysa **ise**

- i. alt partinin başlangıç zamanı olarak LS listesindeki en küçük seçeneği ata;
- i. alt partinin bitiş süresini hesapla;

döngüyü boz;

değilse

LS listesindeki en küçük başlangıç zamanını ve ilgili bitiş zaman seçeneğini sil;

eğer sonu

$j = j + 1$;

döngü sonu

Planlanmış alt partilerin başlangıç ve bitiş zamanlarını içeren LS listesini oluştur;

eğer rastgele atama yöntemi dağıtım planlamasında kullanılıyorsa **ise**

- i. alt partiyi R kümesindeki ilk araca ata;
- Araç kapasitesini (τ) güncelle;

değilse ilk biteni ilk gönder yöntemi dağıtım planlamasında kullanılıyor **ise**

LS listesindeki en küçük bitiş zamanına sahip alt partiyi R kümesindeki ilk araca ata;

Araç kapasitesini (τ) güncelle;

eğer sonu

eğer araç kapasitesi aşılsa **ise**

ilgili aracı R kümesinden çıkar;

eğer sonu

$i = i + 1$;

döngü sonu

Tüm alt partilerin üretim planlamasındaki başlangıç ve bitiş zamanlarını döndür;

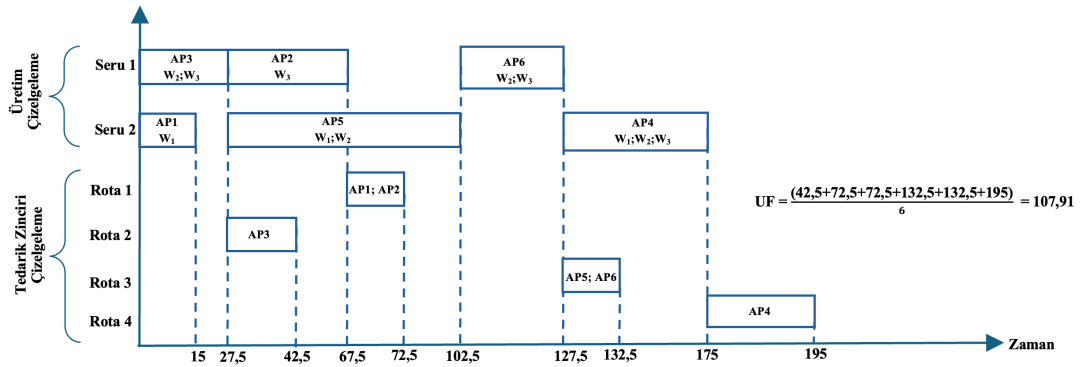
İlgili aracın kalkış zamanını, atanan alt partilerin en son üretim zamanına ayarla;

Tüm alt partiler için dağıtım planlamasının başlangıç ve bitiş zamanlarını hesapla;

bitiş

çıkıtı: Uygunluk (fitness) fonksiyon değeri

Şekil 5.5 : Kromozom çözümlemeye ait sözde kodlar.



Şekil 5.6 : Kromozom çözümleme sonucu elde edilen çizelge.

5.2 Başlangıç Popülasyonu Oluşturma

Başlangıç popülasyonu oluşturma, çözüm uzayının etkili bir şekilde keşfedilmesi ve probleme özgü stratejilerin doğru uygulanması için kritik bir adımdır. Bu nedenle alt parti büyüklüğü belirleme stratejileri ve çalışan transferi stratejileri başlangıç popülasyonu oluşturma operatöründe dikkate alınmaktadır. Burada eğer çalışan transferine izin veriliyorsa, seru modları rastgele oluşturulur ve belirli bir üst sınır ($|W|$) dikkate alınarak yapılandırılır. Eğer çalışan transferine izin verilmiyorsa, seru modları, aynı seru için modun değişmemesini sağlayacak şekilde sabit tutulur. Bunun yanı sıra eğer değişken alt parti boyutu stratejisi uygulanıyorsa, her partinin alt parti boyutları rastgele belirlenir ve parti büyüklüğü göz önünde bulundurularak doğru boyutlar oluşturulur. Eğer eşit alt parti boyutu stratejisi uygulanıyorsa, parti boyutu, alt parti sayısına (Δ) eşit şekilde bölünerek her bir alt partinin boyutu belirlenir.

Bunlara göre oluşturulan başlangıç popülasyonu oluşturma sözde kodları Şekil 5.7’de verilmektedir.

girdi: popülasyon boyutu (ps), her parti için izin verilen maksimum alt parti sayısı (Δ), tüm alt partilerin aile kümesi (F), parti kümesi (L), parti boyutları (V), toplam alt parti sayısı ($|F|=|L|\times\Delta$), seru kümesi (S), seru modları için üst sınır ($|W|$)

başla

$i = 1$: ps için

her partiyi Δ sayıda alt partiye böl;

alt partileri rastgele sırala ve tüm alt partilerin sıralı kümesini (F) elde et;

F'ye dayalı ilk bölümü oluştur;

alt partileri serulara rastgele ata, ikinci bölümü oluştur;

Şekil 5.7 : Başlangıç popülasyonu oluşturma operatörünün sözde kodları.

eğer çalışan transferine izin veriliyor **ise**
seru modlarını rastgele oluştur, $|W|$ 'yi dikkate alarak üçüncü bölümü oluştur;
değilse çalışan transferine izin verilmiyorsa
seru modlarını, aynı seru için modun değişmemesini sağlayacak şekilde oluştur;
eğer sonu
eğer parti büyüklüğü belirleme için değişken alt parti boyutu stratejisi uygulanıyor **ise**
ilgili partinin alt parti boyutlarını rastgele oluştur, L 'yi dikkate alarak dördüncü bölümü oluştur;
değilse eşit alt parti boyutu stratejisi uygulanıyorsa
ilgili partinin alt parti boyutlarını eşit olarak, parti boyutunu (V) Δ 'ye bölerek oluştur;
eğer sonu
beşinci bölüm için araç sıralarını oluştur;
 i 'inci kromozomu bölümleri birleştirerek oluştur;
döngü sonu
bitiş
çıkış: İlgili yaklaşım için başlangıç popülasyonu

Şekil 5.7 (devamı): Geliştirilen GA tabanlı algoritmalar için sözde kodlar

5.3 Algoritma Operatörleri

Seçim Operatörü: Rulet tekerleği seçim yöntemi hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlarda bireyleri seçmek için kullanılır. Bu yöntem, bireylerin uygunluk fonksiyon değerlerine dayalı olarak seçilmesini sağlayan olasılıksal bir yaklaşımdır. Rulet tekerleği yönteminde, her bireyin seçilme olasılığı, toplam popülasyondaki uygunluk fonksiyonuna göre belirlenir. Daha düşük uygunluk fonksiyon değerine sahip bireyler, yani daha iyi çözümler, daha yüksek seçilme olasılığına sahip olur (Körez, 2005).

GA'da, rulet tekerleği yöntemiyle seçilen bireyler çaprazlama işlemi için eşleşme havuzuna dahil edilir. Bu havuzdan seçilen bireyler arasında çaprazlama işlemi gerçekleştirilerek yeni nesil çözümler oluşturulur. YAK tabanlı yaklaşımlarda ise, rulet tekerleği yöntemi çalışan arı aşamasında elde edilen çözümler arasından gözcü arılar tarafından değerlendirilecek bireyleri seçmek için kullanılır. Gözcü arılar, seçilen bireyler üzerinde komşu çözümler oluşturarak mevcut çözümün geliştirilmesini hedefler. Bu süreç, çözümlerin küresel en iyiyi bulma yönünde optimize edilmesine yardımcı olur (Köksal, 2023).

Rulet tekerleği yöntemi, popülasyonun çeşitliliğini korurken en iyi çözümlerin ön plana çıkmasını sağlayan etkili bir seçim operatörüdür. Ancak, yalnızca en iyi çözümlerin sürekli seçilmesini önlemek için belirli bir seviyede rastgelelik içerir. Bu sayede, erken yakınsamanın önüne geçilerek çözüm uzayının daha geniş bir bölgesi keşfedilebilir (Ak, 2012).

Çaprazlama Operatörleri: Önerilen yaklaşımlar için çaprazlama operatörleri Şekil 5.10'da (a) ile gösterilmektedir. Hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlarda kullanılmıştır. GA tabanlı yaklaşımlarda bu operatör yeni bir popülasyon oluştururken, YAK tabanlı yaklaşımlarda mevcut çözümleri iyileştirmek için komşu çözümler üretir. Karşılaştırma amacıyla iki farklı çaprazlama operatörü geliştirilmiştir: (i) tek noktalı çaprazlama ve (ii) çift noktalı çaprazlama. İlk sekiz algoritma tek noktalı çaprazlama operatörünü kullanırken, son sekiz algoritma ise çift noktalı çaprazlama operatörünü uygulamaktadır.

Tek noktalı çaprazlamada, mevcut kesme noktalarından biri rastgele seçilir ve ebeveyn kromozomların ilgili bölümleri birleştirilerek iki yeni yavru kromozom oluşturulur. Alternatif kesme noktaları, özellikle kromozomun dördüncü bölümünden, yani alt parti boyutlarını içeren kısımdan seçilmektedir. Her kesme noktası belirli bir partiye karşılık geldiğinden, alternatif kesme noktalarının sayısı parti sayısına eşittir. Kesme boyutu ise her bir partinin alt parti bölme sayısına (Δ) eşittir. İki noktalı çaprazlamada ise prosedür yalnızca iki çaprazlama noktasının rastgele seçilmesi açısından farklılık gösterir. Bunun dışında, kalan adımlar tek noktalı çaprazlamada uygulananlarla aynıdır. Ayrıca her iki çaprazlama operatörü için çaprazlama noktası nerede olursa olsun, kromozomun alt parti sıralamasını temsil eden ilk bölümü her zaman ebeveynler arasında değiştirilerek yavru kromozomlar oluşturulur. Tüm kararlar birbiriyle ilişkili olduğundan, ilk bölümün değiştirilmesi ve çaprazlama noktasının dördüncü bölümden seçilmesi, çeşitli çözümler elde etmek için yeterlidir. Çaprazlama operatörlerinin sözde kodu Şekil 5.8'de verilmiştir.

Mutasyon Operatörü: Mutasyon operatörü, işlem boyunca ara popülasyonlardaki çeşitliliği korumaya yardımcı olur ve yürürlükteki parti büyüklüğü belirleme stratejilerini dikkate alınarak uygulanır. Eğer değişken boyutlu alt partilerle parti akışı kullanılıyorsa, rastgele seçilen aynı partiye ait iki alt partinin boyutları değiştirilir, yani mutasyon kromozomun 4. bölümünde gerçekleştirilir. Örnek mutasyon Şekil 5.10'da (b) ile gösterilmektedir. Ancak, eşit boyutlu alt partilerle parti akışı sağlanıyorsa, araç

sıralamasında rastgele seçilen iki araç yer değiştirir, yani mutasyon kromozomun 5. bölümünde uygulanır. Önerilen mutasyon operatörüne ait sözde kodlar ise Şekil 5.9'da sunulmaktadır.

Girdi: Alternatif kesme noktaları kümesi (P), ebeveynler (A ve B)

Başla

Yavru D'nin ilk bölümünü ebeveyn A'nın ilk bölümünden oluştur
Yavru D'nin ikinci, üçüncü ve beşinci bölümlerini ebeveyn B'den oluştur
Yavru C'nin ilk bölümünü ebeveyn B'nin ilk bölümünden oluştur
Yavru C'nin ikinci, üçüncü ve beşinci bölümlerini ebeveyn A'dan oluştur
1 ile |P| arasında rastgele bir sayı n seç

Eğer tek noktalı çaprazlama uygulanıyorsa **ise**

1 ile |P| arasında rastgele bir sayı n seç

i = 1' den n **için**

Yavru C'nin lot i alt parti boyutlarını ebeveyn A'dan al

Yavru C'nin alt parti sıralamalarını ebeveyn B ile tutarlı olacak şekilde düzenle

Döngü sonu

Eğer $n < |P|$ **ise**

j = n+1' den |P| **için**

Yavru C'nin lot j alt parti boyutlarını ebeveyn B'den al

Yavru C'nin alt parti sıralamalarını ebeveyn A ile tutarlı olacak şekilde düzenle

Döngü sonu

Eğer sonu

Aynı prosedürü yavru D için uygula

Değilse // İki noktalı çaprazlama uygulanıyorsa

1 ile |P| arasında rastgele iki sayı n ve m seç

i = 1' den n **için**

Yavru C'nin lot i alt parti boyutlarını ebeveyn A'dan al

Yavru C'nin alt parti sıralamalarını ebeveyn B ile tutarlı olacak şekilde düzenle

Döngü sonu

j = n+1' den m **için**

Yavru C'nin lot j alt parti boyutlarını ebeveyn B'den al

Yavru C'nin alt parti sıralamalarını ebeveyn A ile tutarlı olacak şekilde düzenle

Döngü sonu

i = m+1' den |P| **için**

Yavru C'nin lot i alt parti boyutlarını ebeveyn A'dan al

Yavru C'nin alt parti sıralamalarını ebeveyn B ile tutarlı olacak şekilde düzenle

Döngü sonu

Eğer sonu

Bitiş

Çıkış: Yavru C ve D

Şekil 5.8 : Çaprazlama operatörü için sözde kodlar.

Girdi: Kromozom

Başla

Eğer alt parti stratejisi dikkate alınıyorsa **ise**

Aynı lot içinde rastgele iki farklı alt parti seç

Kromozomun dördüncü bölümünde ilgili alt partilerin boyutlarını değiştir

Değilse eşit alt partiler stratejisi dikkate alınıyor **ise**

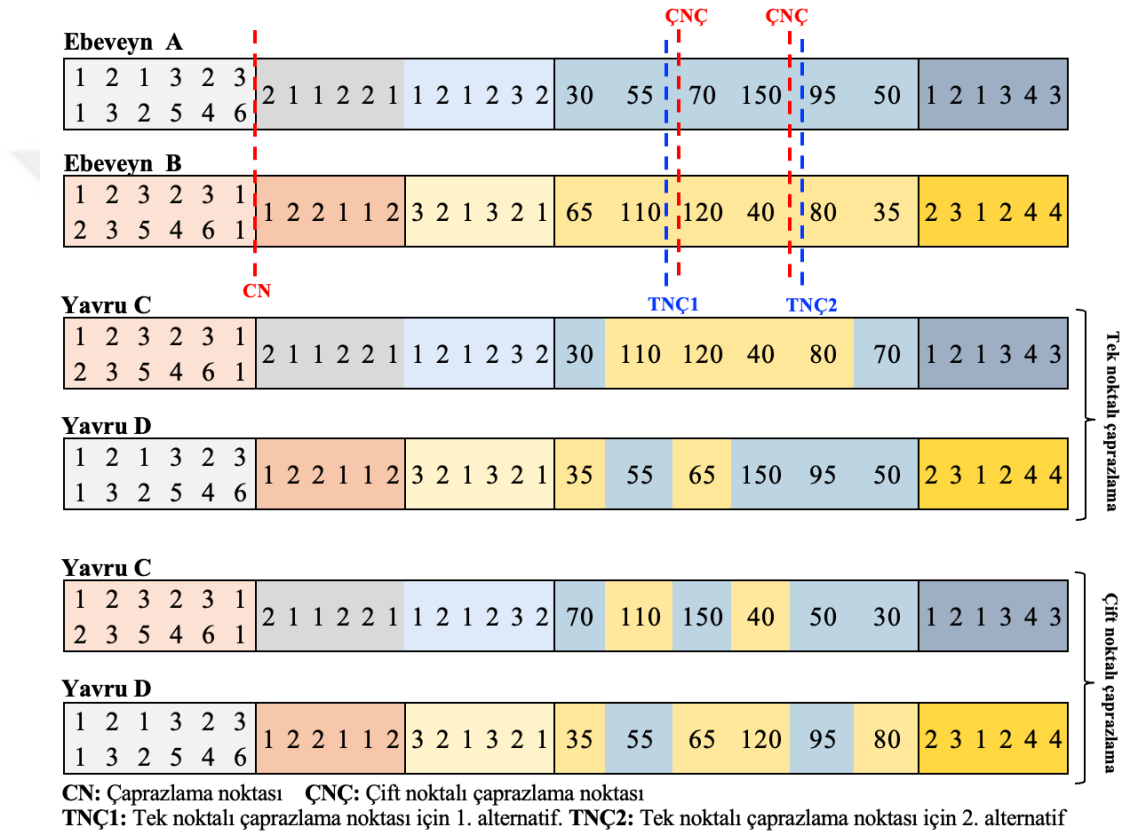
Rastgele bir araç sırası seç

İlgili sıradaki iki farklı aracı rastgele değiştir

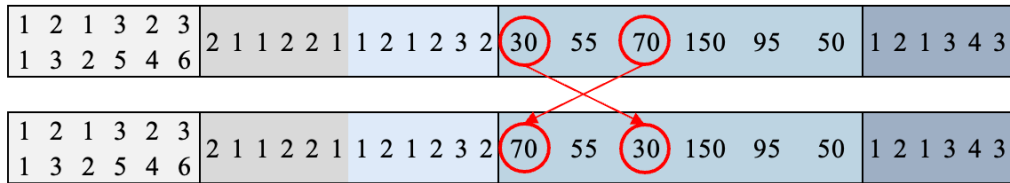
Eğer sonu

Bitiş

Şekil 5.9 : Mutasyon operatörü için sözde kodlar.



(a) Çaprazlama Operatörleri



(b) Mutasyon Operatörü

Şekil 5.10 : Örnek çaprazlama ve mutasyon operatörleri



6. HESAPLAMALI ANALİZLER

Geliştirilen GA ve YAK tabanlı çözüm yaklaşımları, ele alınan SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini farklı operasyonel ve taktiksel stratejilerden oluşan durumlar için dikkate alınarak çözümleri elde edilmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımları MATLAB 2021a yazılımında kodlanmış ve 3.00 GHz hızında çalışan Intel(R) Xeon(R) Gold 5217 CPU ile 64 GB RAM donanımına sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak bu bölümde sunulmaktadır.

6.1 Deney Tasarımı

Bu bölümde, dört kontrol edilebilir faktöre odaklanarak kapsamlı hesaplamalı deneyler için tam faktöriyel bir tasarım oluşturulmuştur: seru sayısı ($|S|$), çalışan sayısı ($|W|$), müşteri sayısı ($|C|$) ve parti başına alt parti sayısı (Δ). Bu tasarım, SÜS için genelleştirilmiş sonuçlar üretmeyi amaçlamakta olup, parti büyüklüğü belirleme bağlamında SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele almaktadır.

Deneyi gerçekleştirmek için, kontrol edilen faktörlerin seviyeleri değiştirilerek 81 test problemi oluşturulmuş ve Çizelge 6.1’de detaylandırılmıştır. Her problem için üç farklı örnek üretilmiş ve her örnek 32 farklı çözüm yaklaşımı (16 GA, 16 YAK) kullanılarak çözülmüştür. Bu yapı, toplamda 7776 çalıştırma ile sonuçlanmıştır ($81 \times 3 \times 32$). Ek veriler arasında, ortalaması 300 ve standart sapması 100 olan normal dağılıma sahip sipariş büyüklükleri (V_1) gibi bilgiler de Çizelge 6.1’de sunulmuştur. Bir seru başına maksimum çalışan sayısı 3’tür ($N=3$). Ayrıca, toplam ürün tipi sayısı ($|P|$), müşteri sayısına ($|C|$) eşittir ve her müşteri üç sipariş verdiği için, toplamda $3 \times |C|$ parti ($|L|$) oluşmaktadır. Optimizasyon modeli, her müşterinin yalnızca bir ürün türüyle ilişkilendirildiğini varsayarak basitleştirilmiştir. Ancak, problem üretimi ve çözüm yaklaşımlarının uygulanması sırasında, bir müşterinin birden fazla ürün türü için sipariş verebileceği kabul edilmiştir.

Çizelge 6.1 : Seviyeleri ve diğer parametreleriyle birlikte kontrol edilebilir faktörler.

Faktör	Seviye		
	Düşük	Orta	Yüksek
S	2	4	6
W	6	12	18
C	2	4	6
N	1-2-4		
Parametreler	Genel Dağılım		
V_1	Normal dağılım [$\mu=300$; $\sigma=100$]		
N_1'	3		
P	C		
L	$3 \times C $		

Algoritmaların performansını değerlendirmek için genellikle farklı metrikler kullanılır. Bu bağlamda, algoritmaların çözüm kalitesini ve doğruluğunu karşılaştırmak amacıyla bağlı yüzde sapma (BYS) formülasyonu literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. BYS, elde edilen çözümler ile en iyi çözüme olan yakınlığı ölçen, gerçek değerlerin ölçeğini göz önünde bulunduran bir performans değerlendirme kriteridir ve gerçek değerlerin büyüklüğünden bağımsız olarak anlamlı kalır. BYS'den yararlanılarak bazı algoritmalarda oluşabilecek büyük sapmaların etkisi etkin bir şekilde azaltıldığı için tutarlı ve adil bir karşılaştırma elde edilir (Yılmaz ve Yılmaz, 2022). BYS, aşağıda Denklem (6.1)'deki gibi formüle edilmiştir:

$$BYS = 100 \times ((UF - EUF)/EUF) \quad (6.1)$$

Denklemde “UF” ilgili algoritmanın uygunluk fonksiyonunu ifade ederken “EUF”, ilgili problem örneği için algoritmaların elde ettiği minimum çözümü ifade etmektedir.

6.2 GA ve YAK için Parametre Değerlerinin Belirlenmesi

Önerilen çözüm yaklaşımlarının başarısı, yüksek kaliteli sonuçlar elde etmek için kritik olan giriş parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu bağlamda, popülasyon büyüklüğü (ps), mutasyon olasılığı (mp), çaprazlama olasılığı (cp) ve iyileşmeyen bir çözüm için izin verilen toplam iterasyon sayısı (lni) gibi hiper-parametrelerin doğru bir şekilde optimize edilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu

çalışmada, bu parametrelerin değerleri GA1 ve YAK1 algoritmaları aracılığıyla ayarlanmış ve performansları bu parametrelerin etkisi altında değerlendirilmiştir.

Hiper-parametrelerin optimizasyonu için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, tasarım parametrelerini minimum sayıda deneyle optimize etme yeteneği ile dikkat çeker ve bu sayede geniş çaplı testlere duyulan ihtiyacı ortadan kaldırır (Nourmohammadi ve Zandieh, 2011). Deney tasarımında ortogonal diziler kullanılarak, birden fazla parametrenin etkisi eşzamanlı olarak incelenmiş ve performansın dayanıklılığını ölçmek amacıyla Sinyal-Gürültü (S/N) oranı hesaplanmıştır (Shang et al., 2004). Bu yöntem, algoritmaların farklı parametre kombinasyonları altında ne kadar verimli çalıştığını belirlemek için etkili bir araç sunmaktadır. Bu çalışmada amaç, ortalama müşteri temin süresini en aza indirmektir ve bu nedenle S/N oranı, Denklem (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

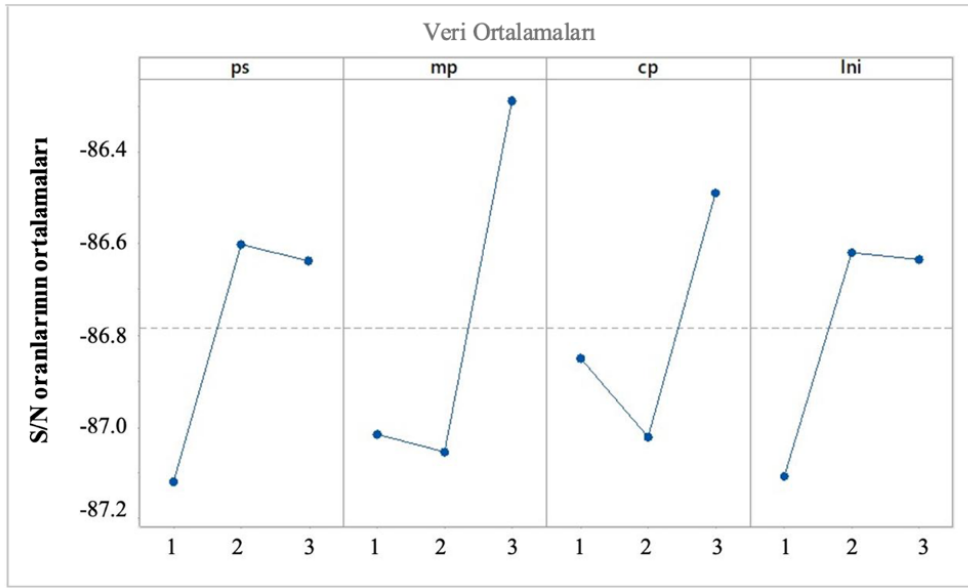
$$(S/N \text{ oranı})_{ij} = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum z_{ij}^2}{n} \right) \quad \forall i, j \quad (6.2)$$

Taguchi tasarımına göre elde edilen S/N değerleri ise Tablo Çizelge 6.2'de sunulmuştur. En uygun hiper-parametre kombinasyonları, ortalama UF değerlerinin analizi ile belirlenmiş olup, bu analiz sonucundaki ana etki grafiği Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Sonuç olarak, en iyi parametre ayarları $ps = 80$, $mp = 0.1$, $cp = 0.9$ ve $lni = 10$ olarak belirlenmiştir. Bu ayarlar, uygulanan yaklaşımların belirtilen problem örnekleri üzerinde verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, tekrar eden hesaplamalar sonucunda, uygunluk fonksiyonu değerinin 400 iterasyondan sonra en fazla %0.01 oranında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, maksimum iterasyon sayısı (mni) tüm yaklaşımlar için 400 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.2 : Seviyeleriyle birlikte hiperparametreler ve Taguchi tasarım sonuçları.

L_9	ps	mp	cp	lni	UF	S/N
1	40	0.01	0.7	5	24352	-87.73
2	40	0.05	0.8	10	23590	-87.45
3	40	0.1	0.9	20	20357	-86.17
4	80	0.01	0.8	20	22165	-86.91
5	80	0.05	0.9	5	22108	-86.89
6	80	0.1	0.7	10	19952	-85.99
7	120	0.01	0.9	10	20900	-86.4
8	120	0.05	0.7	20	21920	-86.81
9	120	0.1	0.8	5	21621	-86.69



Şekil 6.1 : S/N oranları için ana etki grafiği

6.3 Karşılaştırmalı Analizler

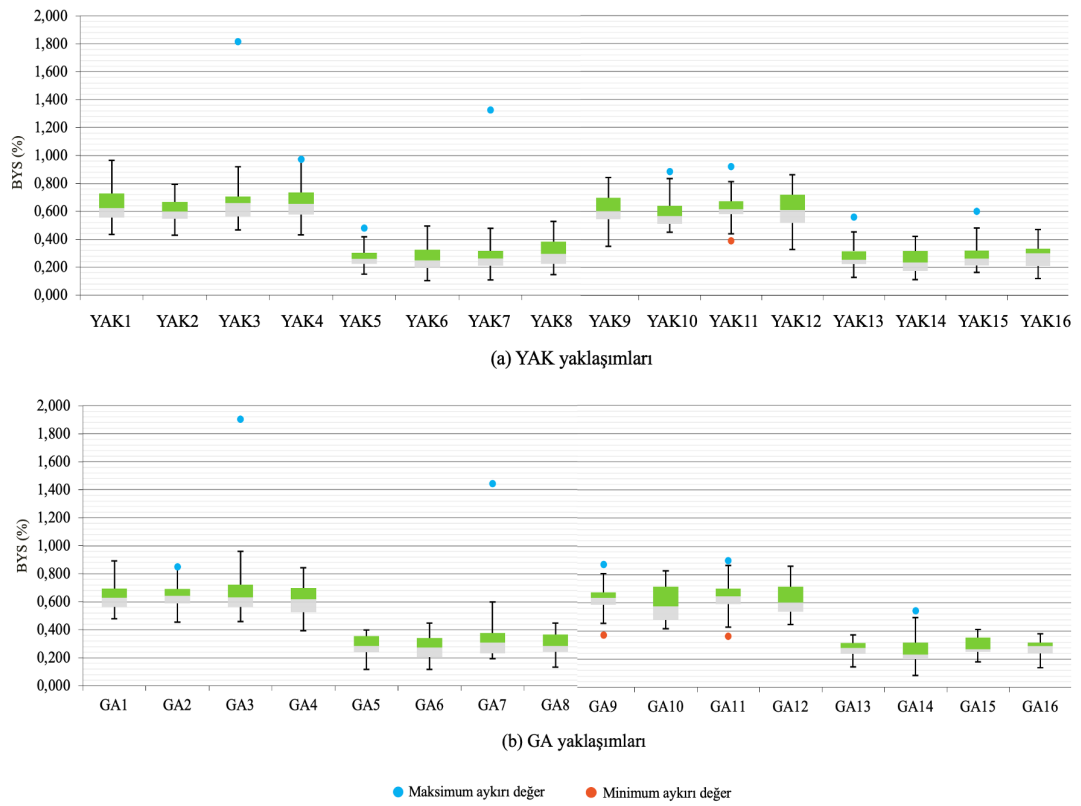
Bu bölümde, GA ve YAK tabanlı yaklaşımların etkinliği, farklı çaprazlama operatörlerinin performansları ve kullanılan strateji kombinasyonlarının uygunluğu BYS değerleri üzerinden karşılaştırılmakta ve yöntemler arasındaki performans farkları değerlendirilmektedir. Çalışmada ele alınan SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini çözmek için geliştirilen bu yaklaşımlar, farklı operasyonel ve taktiksel stratejiler doğrultusunda optimize edilmiş parametrelerle test edilmiştir. Yapılan hesaplamalı analizler neticesinde elde edilen sonuçlar, yaklaşımların çözüm performanslarını, işlem sürelerini ve çözüm çeşitliliğini detaylı bir şekilde ele almaktadır.

GA ve YAK tabanlı yaklaşımlar, yöntemler açısından karşılaştırıldığında, ortalama Δ değerlerine göre BYS değerlerinin kutu grafikleri Şekil 6.2’de sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, GA ve YAK tabanlı yaklaşımlar arasında anlamlı bir fark bulunmamakla birlikte, YAK tabanlı yaklaşımlar, GA tabanlı yaklaşımlara kıyasla daha dengeli dağılıma sahip çözümler sunmaktadır. Yaklaşımlar arasındaki performans farklılıkları, genellikle kullanılan parti büyüklüğü belirleme, çalışan transferi ve araç atama stratejilerinden kaynaklanmaktadır.

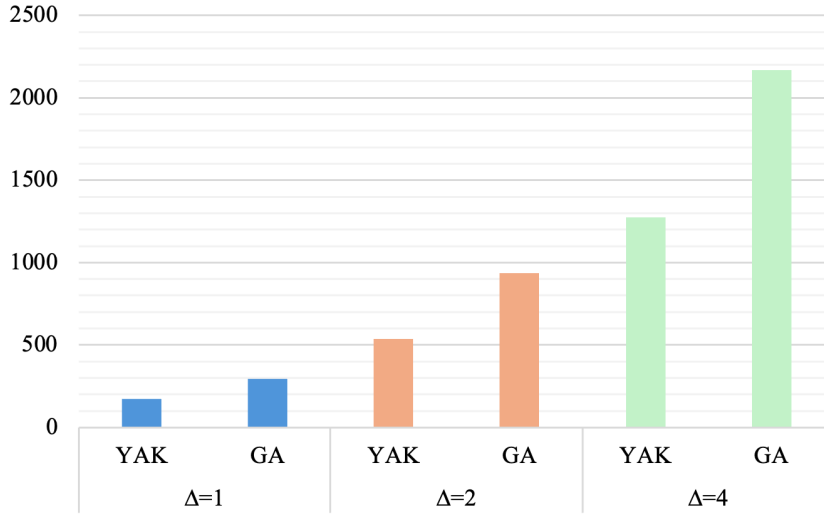
YAK tabanlı yaklaşımlar, özellikle ilk biteni ilk gönder araç atama stratejisini kullananlar, daha küçük yayılım ve sıfır çarpıklık göstererek daha dengeli sonuçlar üretmektedir. Buna karşılık, GA tabanlı yaklaşımlar daha geniş çeyrekler arası açıklık

sergileyerek, nispeten daha büyük bir yayılım göstermektedir. Bu durum, GA tabanlı yaklaşımların çözüm çeşitliliğinin daha fazla olduğunu ve çözüm uzayında daha fazla varyasyon sunduğunu göstermektedir.

Ayrıca, her bir Δ değeri için ortalama CPU süreleri Şekil 6.3'te karşılaştırıldığında, YAK tabanlı yaklaşımların daha kısa sürede çözüme ulaştığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, YAK tabanlı yaklaşımların işlem süresi açısından daha verimli olduğunu ve optimizasyon performansı bakımından da daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak hem işlem süresi hem de çözüm kalitesi açısından YAK tabanlı yaklaşımların üstün olduğu söylenebilir.

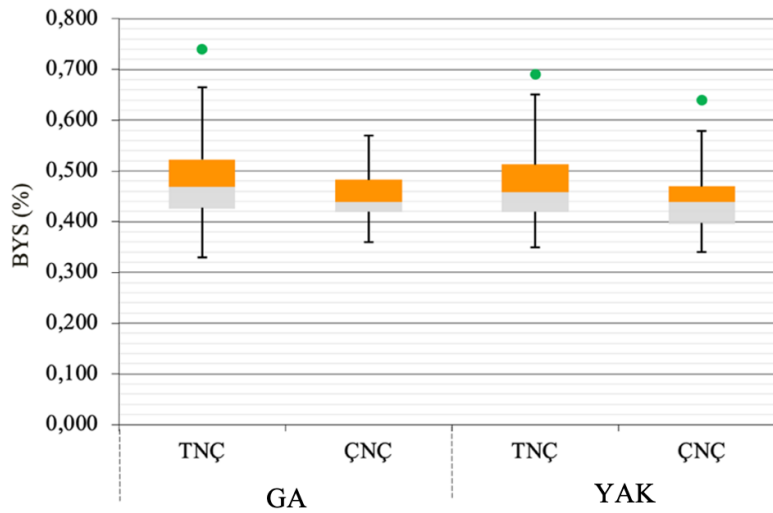


Şekil 6.2 : YAK ve GA yaklaşımlarının karşılaştırılması için kutu grafikleri.



Şekil 6.3 : CPU değerlerinin algoritmalar bazında karşılaştırılması.

GA ve YAK tabanlı yaklaşımlara çaprazlama operatörleri açısından da performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Hem GA hem de YAK tabanlı çözüm yaklaşımlarının ilk sekizi tek noktalı çaprazlama (TNÇ) operatörünü, son sekizi ise çift noktalı çaprazlama (ÇNÇ) operatörünü içermektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.4’ te kutu grafikleri üzerinden gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlarda çift noktalı çaprazlama operatörünün nispeten daha küçük varyans ve istikrarlı çözümler sağlaması nedeniyle çift noktalı çaprazlama operatörünün daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 6.4 : Çaprazlama operatörlerinin karşılaştırıldığı kutu grafikleri.

Bunların yanı sıra, seçilecek olan üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejilerinin sonuçlar üzerinde daha fazla etkisi bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu stratejiler açısından çözüm yaklaşımlarının karşılaştırdığımızda GA ve YAK yöntemlerinin farklı strateji kombinasyonları altında benzer performans gösterdiği gözlemlenmiştir. GA ve YAK tabanlı çözüm yaklaşımlarından elde edilen BYS sonuçları ve CPU süreleri Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de farklı Δ değerleri için sunulmaktadır.

Çizelge 6.3’e göre, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin devreye alınmadığı durum olan $\Delta=1$ seviyesinde, YAK7 ve YAK14 algoritmaları en düşük ortalama BYS değerine ulaşmaktadır. Parti bölmenin $\Delta=2$ ile başlamasıyla birlikte, YAK14 yaklaşımının diğer alternatiflere kıyasla daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Özellikle alt parti sayısının en yüksek olduğu $\Delta=4$ seviyesinde, yine YAK14 yaklaşımı, rastgele araç atama stratejisini kullanan alternatiflere kıyasla belirgin bir üstünlük sağlamaktadır.

Aynı şekilde Çizelge 6.4’e göre, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin devreye alınmadığı durum olan $\Delta=1$ seviyesinde, GA10 ve GA14 algoritmaları en düşük ortalama değerine ulaşırken, parti bölmenin $\Delta=2$ ile başlamasıyla birlikte, GA6 ve GA14 yaklaşımlarının diğer alternatiflere kıyasla daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Özellikle alt parti sayısının en yüksek olduğu $\Delta=4$ seviyesinde, GA14 yaklaşımı, rastgele araç atama stratejisini kullanan diğer yaklaşımlara kıyasla belirgin bir iyileşme sağlamaktadır.

Stratejilerin performans karşılaştırmalarını daha iyi analiz edebilmek adına, GA ve YAK tabanlı tüm yaklaşımlar için Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da kutu grafikleri oluşturulmuş ve BYS değerlerinin dağılımına yönelik kapsamlı bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

Bu analizler, ele alınan stratejilerin algoritmalar üzerindeki etkilerini daha iyi anlamayı sağlamaktadır. Hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlar için parti büyüklüğü belirleme stratejileri kendi içinde değerlendirildiğinde, değişken alt parti stratejisini benimseyen algoritmaların, eşit alt parti stratejisini kullanan algoritmalara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Öte yandan, parti akışı uygulanmadığında tüm yaklaşımların benzer performans gösterdiği görülmektedir. Ancak, partilerin daha küçük alt partilere bölünmesiyle birlikte performans farklarının belirginleştiği ve özellikle araç atama stratejilerinin hem GA hem de YAK tabanlı

algoritmelerde etkisinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. İlk tamamlanan alt partiye öncelik veren "ilk biteni ilk gönder" stratejisini kullanan yaklaşımlar rastgele araç atama stratejisini benimseyen yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu fark, alt parti sayısının artmasıyla daha da belirgin hale gelmekte ve daha küçük alt parti boyutlarına yönelim sağlamaktadır. Bu doğrultuda, ilk biteni ilk gönder stratejisinin, tedarik zinciri çizelgeleme performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı söylenebilir. Buna ek olarak, çalışan transfer stratejisi incelendiğinde, parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin uygulanmadığı senaryolarda yine tüm algoritmalar için benzer sonuçlar elde edildiği, ancak parti bölmenin gerçekleştirildiği durumlarda hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlarda çalışan transferine izin verilen algoritmaların daha iyi bir sonuç sağladığı görülmektedir. Çalışan transferine izin verilmesi, küçük partilerle dayalı üretim süreçlerinde performans açısından önemli bir faktör olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.3 : YAK yaklaşımlarının BYS değerleri.

Problem	S	W	C	Min	YAK 1	YAK 2	YAK 3	YAK 4	YAK 5	YAK 6	YAK 7	YAK 8	YAK 9	YAK 10	YAK 11	YAK 12	YAK 13	YAK 14	YAK 15	YAK 16	CPU	
Δ= 1																						
1	2	6	2	5082,1	0,53	0,10	0,67	0,45	0,76	0,85	0,63	0,50	0,56	0,77	0,47	0,44	0,57	0,03	0,43	0,34	11	
2	4	6	2	5083,9	0,46	0,46	0,40	0,48	0,61	0,37	0,51	0,11	0,34	0,28	0,60	0,55	0,43	0,50	0,19	0,41	46	
3	6	6	2	5137,1	0,17	0,33	0,26	0,32	0,28	0,34	0,11	0,53	0,32	0,24	0,37	0,47	0,21	0,23	0,35	0,39	105	
4	2	12	2	6017,3	0,12	0,30	0,20	0,41	0,16	0,29	0,25	0,30	0,31	0,44	0,24	0,12	0,25	0,39	0,28	0,39	10	
5	4	12	2	5735,3	0,31	0,23	0,24	0,28	0,31	0,07	0,27	0,28	0,35	0,20	0,18	0,34	0,31	0,19	0,22	0,11	43	
6	6	12	2	5189,6	0,34	0,37	0,25	0,50	0,28	0,28	0,11	0,49	0,19	0,19	0,28	0,45	0,08	0,46	0,50	0,23	104	
7	2	18	2	4746,9	0,58	0,60	0,26	0,23	0,37	0,41	0,41	0,57	0,55	0,59	0,53	0,45	0,21	0,38	0,69	0,88	11	
8	4	18	2	4967,2	0,28	0,20	0,47	0,44	0,33	0,33	0,32	0,22	0,21	0,19	0,28	0,18	0,31	0,51	0,28	0,16	46	
9	6	18	2	4784,6	0,47	0,26	0,34	0,54	0,10	0,45	0,23	0,35	0,45	0,31	0,19	0,34	0,28	0,68	0,31	0,51	107	
10	2	6	4	9876,0	0,28	0,23	0,21	0,19	0,19	0,16	0,21	0,21	0,23	0,19	0,20	0,32	0,19	0,27	0,21	0,46	25	
11	4	6	4	8406,3	0,36	0,41	0,31	0,55	0,27	0,57	0,42	0,23	0,43	0,58	0,33	0,44	0,34	0,30	0,27	0,46	121	
12	6	6	4	9760,8	0,40	0,12	0,23	0,43	0,20	0,38	0,40	0,18	0,20	0,27	0,29	0,11	0,19	0,32	0,21	0,37	316	
13	2	12	4	8704,5	0,56	0,23	0,45	0,74	0,37	0,30	0,32	0,80	0,34	0,78	0,56	0,16	0,39	0,16	0,59	0,24	22	
14	4	12	4	9478,7	0,32	0,25	0,29	0,55	0,29	0,26	0,15	0,35	0,21	0,12	0,32	0,51	0,29	0,12	0,23	0,25	114	
15	6	12	4	8840,5	0,16	0,18	0,27	0,49	0,30	0,08	0,18	0,30	0,36	0,14	0,19	0,26	0,36	0,25	0,31	0,27	317	
16	2	18	4	7904,6	0,35	0,46	0,61	0,49	0,53	0,23	0,51	0,53	0,59	0,30	0,41	0,14	0,51	0,86	0,33	0,79	22	
17	4	18	4	10140,6	0,22	0,26	0,25	0,36	0,24	0,24	0,16	0,38	0,32	0,28	0,18	0,40	0,29	0,24	0,26	0,03	130	
18	6	18	4	8054,5	0,54	0,32	0,46	0,46	0,48	0,33	0,38	0,70	0,33	0,57	0,56	0,28	0,41	0,12	0,47	0,33	341	
19	2	6	6	13788,3	0,20	0,21	0,31	0,23	0,32	0,14	0,22	0,43	0,34	0,28	0,17	0,22	0,19	0,14	0,22	0,34	42	
20	4	6	6	12573,1	0,27	0,47	0,38	0,32	0,36	0,65	0,34	0,51	0,25	0,13	0,41	0,32	0,37	0,34	0,48	0,33	227	
21	6	6	6	13200,8	0,19	0,44	0,37	0,38	0,34	0,26	0,23	0,41	0,18	0,55	0,30	0,25	0,38	0,25	0,28	0,04	625	
22	2	12	6	11441,0	0,48	0,46	0,52	0,47	0,49	0,20	0,42	0,15	0,66	0,39	0,49	0,56	0,70	0,33	0,34	0,35	42	
23	4	12	6	13206,4	0,22	0,54	0,29	0,47	0,32	0,31	0,37	0,18	0,22	0,26	0,39	0,15	0,23	0,38	0,17	0,34	220	
24	6	12	6	12535,2	0,33	0,31	0,48	0,38	0,16	0,39	0,32	0,34	0,31	0,20	0,22	0,17	0,25	0,05	0,09	0,46	808	
25	2	18	6	13521,3	0,22	0,30	0,26	0,12	0,23	0,39	0,19	0,20	0,28	0,18	0,17	0,52	0,26	0,32	0,19	0,26	36	
26	4	18	6	12405,6	0,62	0,49	0,58	0,80	0,66	0,64	0,32	0,62	0,54	0,63	0,54	0,75	0,41	0,10	0,38	0,55	172	
27	6	18	6	11592,1	0,27	0,18	0,16	0,44	0,17	0,57	0,40	0,39	0,35	0,50	0,44	0,24	0,44	0,56	0,23	0,50	633	
Ortalama				8969,4	0,34	0,32	0,35	0,43	0,34	0,35	0,31	0,38	0,35	0,35	0,35	0,34	0,33	0,31	0,32	0,36	174	

Çizelge 6.3 (devamı): YAK yaklaşımlarının BYS değerleri.

Problem	S	W	C	Min	YAK 1	YAK 2	YAK 3	YAK 4	YAK 5	YAK 6	YAK 7	YAK 8	YAK 9	YAK 10	YAK 11	YAK 12	YAK 13	YAK 14	YAK 15	YAK 16	CPU
$\Delta = 2$																					
1	2	6	2	4833,7	1,06	0,94	0,81	0,80	0,43	0,28	0,46	0,63	1,11	0,78	0,89	0,75	0,60	0,38	0,50	0,53	24
2	4	6	2	4959,0	0,72	0,95	0,70	0,65	0,56	0,30	0,47	0,38	0,82	0,82	0,88	0,26	0,26	0,36	0,55	0,46	101
3	6	6	2	6156,9	0,66	0,46	0,57	0,50	0,31	0,19	0,13	0,15	0,53	0,59	0,80	0,73	0,16	0,21	0,27	0,30	284
4	2	12	2	5496,4	0,77	0,73	0,91	1,08	0,38	0,43	0,28	0,57	0,53	0,65	0,87	0,46	0,37	0,22	0,30	0,28	23
5	4	12	2	6479,3	0,54	0,73	0,57	0,69	0,10	0,12	0,14	0,09	0,48	0,42	0,50	0,59	0,12	0,25	0,27	0,05	106
6	6	12	2	5995,5	0,26	0,45	0,44	0,60	0,12	0,07	0,12	0,18	0,45	0,67	0,50	0,56	0,10	0,17	0,34	0,31	272
7	2	18	2	4964,2	0,99	0,84	1,03	0,85	0,42	0,52	0,42	0,70	0,93	1,20	0,76	1,22	0,67	0,40	0,83	0,29	23
8	4	18	2	5891,1	0,86	0,73	0,46	0,55	0,24	0,50	0,35	0,06	0,62	0,36	0,76	0,61	0,27	0,24	0,21	0,14	114
9	6	18	2	5944,1	0,64	0,75	0,76	0,58	0,27	0,05	0,25	0,32	0,48	0,57	0,66	0,65	0,44	0,35	0,29	0,34	281
10	2	6	4	9167,4	0,93	0,59	0,91	0,76	0,27	0,50	0,31	0,12	0,86	0,71	0,80	0,47	0,19	0,23	0,40	0,40	61
11	4	6	4	9644,2	0,82	0,87	0,87	0,69	0,22	0,13	0,13	0,10	0,70	0,85	0,79	0,94	0,14	0,43	0,22	0,23	326
12	6	6	4	11140,3	0,32	0,29	0,47	0,49	0,06	0,21	0,08	0,08	0,54	0,53	0,59	0,52	0,03	0,12	0,18	0,08	882
13	2	12	4	10025,3	0,76	1,06	0,72	0,84	0,26	0,31	0,38	0,39	0,76	0,52	0,86	0,43	0,38	0,60	0,31	0,36	62
14	4	12	4	10693,1	0,64	0,74	0,69	0,78	0,30	0,02	0,31	0,36	0,88	0,62	0,57	1,00	0,32	0,32	0,28	0,18	235
15	6	12	4	9603,4	0,74	0,80	0,81	0,72	0,31	0,27	0,23	0,17	0,68	0,78	0,79	1,00	0,23	0,24	0,19	0,49	868
16	2	18	4	11452,3	0,55	0,58	0,58	0,40	0,30	0,39	0,16	0,22	0,68	0,31	0,53	0,48	0,08	0,10	0,11	0,13	61
17	4	18	4	9084,7	0,77	1,01	0,57	1,09	0,43	0,05	0,57	0,39	0,78	0,67	0,85	1,06	0,13	0,14	0,37	0,21	346
18	6	18	4	9481,8	0,74	0,87	1,16	0,99	0,34	0,40	0,38	0,42	1,05	1,23	0,90	0,99	0,43	0,20	0,18	0,19	922
19	2	6	6	15689,9	0,78	0,84	0,86	0,71	0,14	0,05	0,10	0,33	0,72	0,54	0,71	0,43	0,13	0,13	0,19	0,17	121
20	4	6	6	14132,1	0,68	0,87	0,90	0,79	0,24	0,26	0,17	0,12	0,80	0,68	0,80	0,67	0,16	0,19	0,16	0,33	479
21	6	6	6	15139,0	0,96	0,71	1,12	0,78	0,21	0,12	0,20	0,27	0,66	0,74	0,76	0,55	0,19	0,29	0,18	0,21	1815
22	2	12	6	15633,5	1,05	0,70	0,60	0,73	0,28	0,36	0,35	0,36	0,79	0,49	0,77	0,82	0,42	0,10	0,24	0,09	122
23	4	12	6	15467,1	0,59	0,63	1,05	1,10	0,17	0,20	0,09	0,12	0,65	0,67	0,74	0,43	0,27	0,22	0,14	0,08	640
24	6	12	6	13424,4	1,15	0,80	0,67	0,82	0,30	0,35	0,65	0,32	0,94	0,95	1,05	1,07	0,37	0,26	0,32	0,31	2107
25	2	18	6	16257,5	0,86	0,60	1,00	0,92	0,15	0,16	0,23	0,14	0,62	0,55	0,58	0,83	0,18	0,05	0,16	0,30	95
26	4	18	6	14495,3	0,74	0,44	0,57	0,54	0,13	0,18	0,18	0,03	0,73	0,63	0,47	0,56	0,13	0,15	0,19	0,26	1951
27	6	18	6	14162,1	0,71	0,58	0,61	0,57	0,24	0,33	0,34	0,28	0,36	0,44	0,40	0,53	0,24	0,25	0,25	0,20	2159
Ortalama				10200,5	0,75	0,73	0,76	0,74	0,27	0,25	0,28	0,27	0,71	0,67	0,73	0,69	0,26	0,24	0,28	0,26	536

Çizelge 6.3 (devamı): YAK yaklaşımlarının BYS değerleri.

Problem	S	W	C	Min	YAK 1	YAK 2	YAK 3	YAK 4	YAK 5	YAK 6	YAK 7	YAK 8	YAK 9	YAK 10	YAK 11	YAK 12	YAK 13	YAK 14	YAK 15	YAK 16	CPU	
Δ= 4																						
1	2	6	2	6203,2	0,72	0,64	0,82	0,59	0,26	0,36	0,33	0,20	0,74	0,77	0,75	0,67	0,21	0,22	0,30	0,05	61	
2	4	6	2	6925,2	0,64	0,69	0,57	0,58	0,17	0,27	0,07	0,09	0,48	0,43	0,55	0,63	0,08	0,06	0,18	0,28	296	
3	6	6	2	5938,2	0,48	0,84	0,78	0,46	0,26	0,07	0,08	0,42	0,62	0,57	0,63	0,81	0,27	0,16	0,18	0,19	838	
4	2	12	2	6631,0	0,74	0,76	0,88	0,54	0,27	0,05	0,26	0,29	0,94	0,75	0,80	0,40	0,35	0,39	0,42	0,31	63	
5	4	12	2	5747,6	0,84	0,70	0,88	0,87	0,32	0,12	0,43	0,36	1,04	1,03	0,87	1,08	0,27	0,08	0,38	0,42	314	
6	6	12	2	6112,4	0,83	0,47	0,71	0,89	0,16	0,11	0,10	0,22	0,69	0,71	0,68	0,62	0,20	0,01	0,23	0,35	854	
7	2	18	2	6330,1	0,56	0,83	0,60	0,78	0,22	0,27	0,31	0,23	0,68	0,87	0,72	0,66	0,26	0,23	0,28	0,24	65	
8	4	18	2	5812,0	0,82	0,63	0,75	0,86	0,17	0,14	0,15	0,15	0,77	0,91	0,68	0,72	0,16	0,23	0,10	0,28	314	
9	6	18	2	6678,0	0,49	0,63	0,57	0,38	0,19	0,24	0,06	0,09	0,56	0,66	0,59	0,75	0,10	0,16	0,15	0,25	831	
10	2	6	4	10332,6	1,02	0,83	0,88	0,52	0,25	0,09	0,26	0,30	0,90	0,76	0,73	0,90	0,26	0,19	0,43	0,14	195	
11	4	6	4	11604,5	0,77	0,71	0,75	0,51	0,06	0,15	0,05	0,10	0,67	0,54	0,74	0,80	0,06	0,19	0,09	0,21	1087	
12	6	6	4	9974,4	0,98	0,88	0,94	1,37	0,20	0,20	0,21	0,32	0,88	0,85	0,94	0,92	0,22	0,04	0,15	0,21	2888	
13	2	12	4	10775,5	0,92	0,76	0,84	0,62	0,31	0,36	0,35	0,39	0,80	0,42	0,98	0,55	0,25	0,50	0,25	0,09	198	
14	4	12	4	10504,3	1,17	1,35	0,99	1,02	0,28	0,29	0,36	0,47	1,10	1,01	0,96	1,07	0,29	0,27	0,29	0,04	780	
15	6	12	4	10989,5	0,83	0,77	0,79	0,76	0,30	0,17	0,17	0,19	0,74	0,80	0,81	0,96	0,15	0,05	0,29	0,32	3031	
16	2	18	4	12231,6	0,75	0,53	0,79	0,54	0,10	0,12	0,10	0,22	0,77	0,81	0,70	0,92	0,17	0,25	0,10	0,13	206	
17	4	18	4	11817,2	0,74	0,56	0,69	0,77	0,10	0,18	0,07	0,16	0,67	0,59	0,79	0,66	0,13	0,06	0,21	0,12	1099	
18	6	18	4	10882,7	0,71	0,80	0,79	0,48	0,06	0,29	0,10	0,12	0,72	0,60	0,75	0,77	0,16	0,09	0,12	0,09	2937	
19	2	6	6	12775,3	1,29	1,32	1,05	1,27	0,42	0,37	0,49	0,45	1,22	0,97	1,31	1,17	0,44	0,39	0,38	0,45	387	
20	4	6	6	15909,4	0,93	0,81	0,79	0,85	0,15	0,16	0,22	0,20	0,84	0,89	0,77	0,80	0,19	0,21	0,17	0,25	1562	
21	6	6	6	17251,4	0,58	0,66	0,67	0,54	0,23	0,13	0,16	0,24	0,69	0,58	0,69	0,79	0,21	0,17	0,12	0,29	3767	
22	2	12	6	13270,0	1,36	0,78	1,52	1,72	0,49	0,14	0,50	0,17	1,09	1,78	1,51	1,20	0,56	0,52	0,56	0,56	395	
23	4	12	6	16301,8	0,77	0,63	0,71	0,68	0,12	0,21	0,18	0,18	0,80	0,59	0,70	0,71	0,08	0,17	0,17	0,13	1602	
24	6	12	6	15385,0	0,85	0,87	0,82	1,64	0,21	0,31	0,20	0,48	0,92	0,53	0,96	0,97	0,37	0,03	0,30	0,30	3481	
25	2	18	6	14524,7	1,13	0,75	1,02	1,06	0,30	0,12	0,20	0,36	0,86	1,32	1,16	0,89	0,33	0,15	0,33	0,36	311	
26	4	18	6	14792,2	0,79	1,08	0,83	0,69	0,11	0,15	0,14	0,20	0,81	1,03	0,84	0,61	0,15	0,11	0,11	0,17	1679	
27	6	18	6	16794,0	0,52	0,65	1,68	0,45	0,22	0,29	1,84	0,23	0,34	0,41	0,33	0,49	0,25	0,15	0,12	0,12	5206	
Ortalama				10833,1	0,82	0,78	0,86	0,80	0,22	0,20	0,27	0,25	0,79	0,78	0,81	0,80	0,23	0,19	0,24	0,23	1276	

Çizelge 6.4 : GA yaklaşımlarının BYS değerleri.

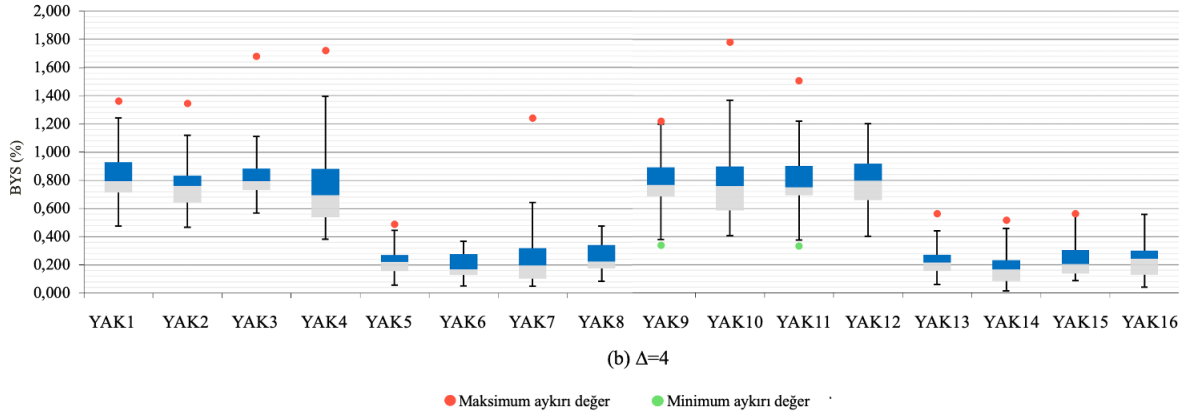
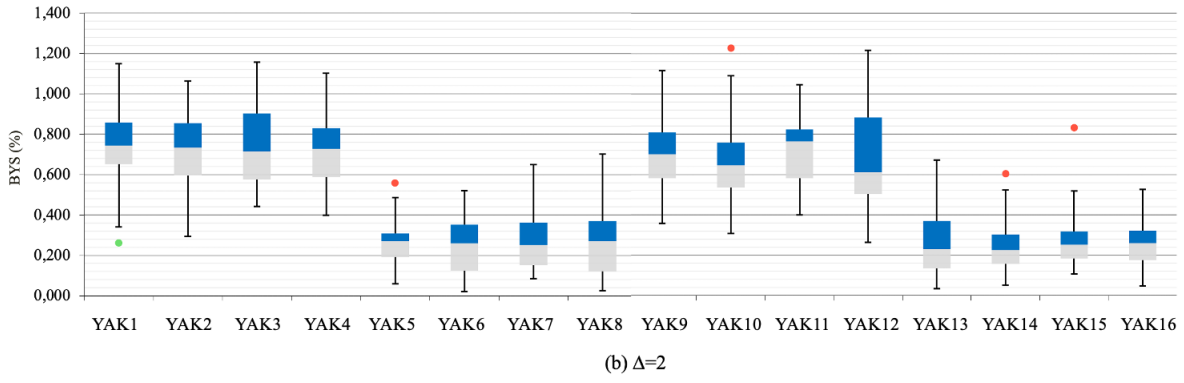
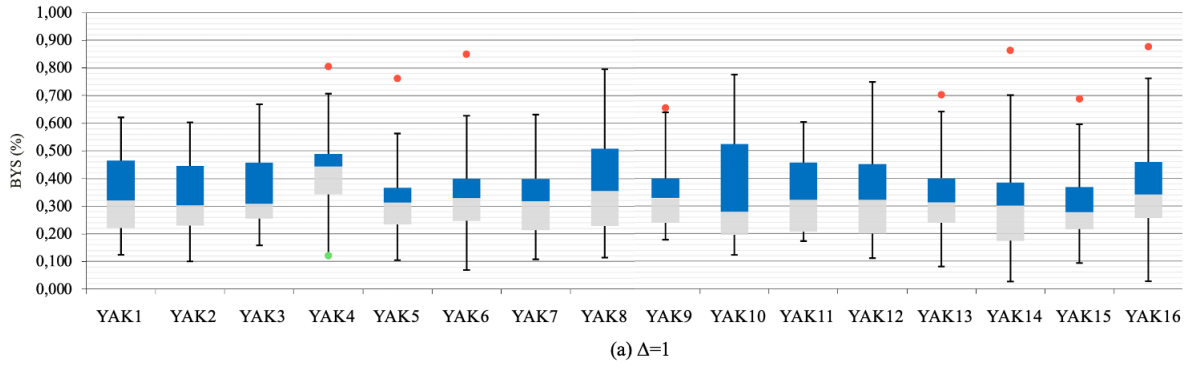
Problem	S	W	C	Min	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5	GA6	GA7	GA8	GA9	GA10	GA11	GA12	GA13	GA14	GA15	GA16	CPU	
Δ= 1																						
1	2	6	2	5046,08	0,39	0,59	0,27	0,36	0,51	0,71	0,69	0,58	0,31	0,07	0,52	0,30	0,31	0,84	0,60	0,17	21	
2	4	6	2	5671,37	0,30	0,41	0,34	0,15	0,40	0,15	0,12	0,29	0,25	0,36	0,08	0,21	0,28	0,37	0,30	0,34	92	
3	6	6	2	5009,12	0,45	0,52	0,32	0,22	0,28	0,14	0,17	0,36	0,49	0,09	0,45	0,28	0,26	0,17	0,42	0,42	213	
4	2	12	2	5298,91	0,41	0,50	0,35	0,51	0,41	0,59	0,39	0,69	0,66	0,09	0,46	0,36	0,36	0,23	0,38	0,50	20	
5	4	12	2	5676,60	0,23	0,42	0,16	0,34	0,21	0,22	0,22	0,36	0,22	0,25	0,18	0,32	0,21	0,33	0,20	0,36	85	
6	6	12	2	5096,77	0,34	0,07	0,23	0,61	0,55	0,60	0,61	0,40	0,49	0,09	0,34	0,42	0,34	0,56	0,58	0,57	201	
7	2	18	2	4690,36	0,44	0,64	0,58	0,73	0,31	0,28	0,54	0,07	0,51	0,54	0,63	0,76	0,54	0,70	0,55	0,37	21	
8	4	18	2	4767,95	0,47	0,59	0,50	0,48	0,26	0,09	0,34	0,55	0,52	0,54	0,37	0,53	0,25	0,32	0,39	0,54	85	
9	6	18	2	4415,25	0,52	0,48	0,61	0,61	0,40	0,30	0,40	0,75	0,29	0,63	0,56	0,57	0,42	0,46	0,53	0,69	204	
10	2	6	4	9759,33	0,30	0,22	0,24	0,19	0,24	0,44	0,35	0,40	0,27	0,24	0,30	0,09	0,29	0,12	0,22	0,54	50	
11	4	6	4	7797,39	0,49	0,70	0,57	0,59	0,48	0,89	0,58	0,51	0,41	0,23	0,46	0,47	0,57	0,07	0,54	0,39	243	
12	6	6	4	8754,57	0,47	0,52	0,45	0,21	0,42	0,10	0,38	0,33	0,32	0,47	0,39	0,56	0,35	0,34	0,40	0,04	521	
13	2	12	4	8140,32	0,68	0,45	0,54	0,32	0,62	0,81	0,61	0,65	0,59	0,62	0,52	0,88	0,42	0,41	0,55	0,48	47	
14	4	12	4	8866,31	0,58	0,53	0,32	0,41	0,49	0,55	0,50	0,02	0,45	0,48	0,55	0,39	0,50	0,44	0,30	0,30	251	
15	6	12	4	7902,61	0,76	0,52	0,38	0,31	0,33	0,20	0,40	0,41	0,40	0,54	0,53	0,53	0,52	0,19	0,50	0,23	534	
16	2	18	4	7612,56	0,60	0,77	0,54	0,60	0,40	0,53	0,44	0,47	0,44	0,34	0,41	0,54	0,53	0,39	0,55	0,08	46	
17	4	18	4	9851,12	0,26	0,65	0,45	0,34	0,25	0,43	0,11	0,30	0,36	0,04	0,15	0,22	0,26	0,48	0,34	0,36	243	
18	6	18	4	9091,72	0,20	0,26	0,11	0,24	0,19	0,40	0,21	0,38	0,19	0,09	0,17	0,29	0,24	0,20	0,30	0,39	657	
19	2	6	6	12716,84	0,20	0,42	0,36	0,29	0,47	0,45	0,28	0,35	0,41	0,27	0,31	0,18	0,37	0,14	0,22	0,55	89	
20	4	6	6	12508,13	0,27	0,44	0,37	0,22	0,19	0,33	0,41	0,51	0,26	0,34	0,29	0,12	0,26	0,39	0,21	0,16	467	
21	6	6	6	12339,40	0,40	0,42	0,40	0,53	0,39	0,14	0,32	0,29	0,51	0,29	0,46	0,41	0,44	0,25	0,30	0,34	1284	
22	2	12	6	12360,14	0,37	0,35	0,34	0,46	0,35	0,37	0,44	0,55	0,38	0,44	0,31	0,45	0,17	0,00	0,29	0,34	86	
23	4	12	6	12016,64	0,59	0,65	0,68	0,31	0,63	0,70	0,45	0,61	0,54	0,39	0,56	0,32	0,55	0,64	0,56	0,75	363	
24	6	12	6	12934,22	0,33	0,25	0,37	0,28	0,19	0,40	0,23	0,40	0,22	0,10	0,13	0,09	0,24	0,22	0,15	0,38	790	
25	2	18	6	12911,74	0,36	0,14	0,33	0,22	0,31	0,55	0,27	0,23	0,26	0,19	0,18	0,27	0,38	0,31	0,32	0,34	77	
26	4	18	6	13503,68	0,18	0,25	0,14	0,30	0,06	0,28	0,24	0,22	0,28	0,19	0,32	0,17	0,30	0,36	0,30	0,27	392	
27	6	18	6	10697,43	0,41	0,72	0,47	0,53	0,37	0,42	0,55	0,27	0,42	0,63	0,36	0,59	0,57	0,46	0,35	0,32	837	
Ortalama				8720	0,41	0,46	0,39	0,38	0,36	0,41	0,38	0,40	0,39	0,32	0,37	0,38	0,37	0,35	0,38	0,38	293	

Çizelge 6.4 (devamı): GA yaklaşımlarının BYS değerleri.

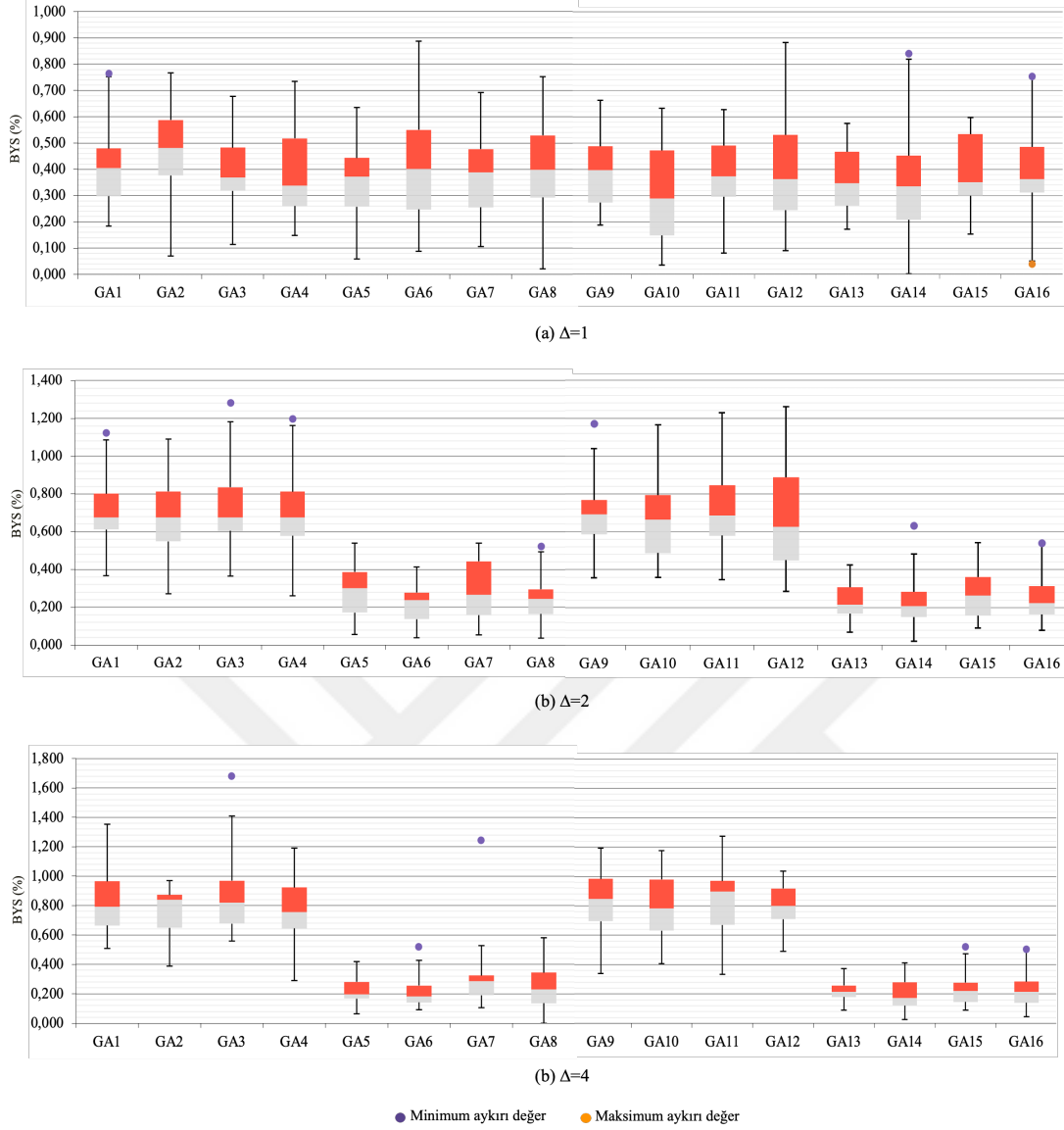
Problem	S	W	C	Min	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5	GA6	GA7	GA8	GA9	GA10	GA11	GA12	GA13	GA14	GA15	GA16	CPU	
$\Delta = 2$																						
1	2	6	2	5539,67	0,55	0,56	0,61	0,53	0,17	0,15	0,28	0,31	0,65	0,69	0,66	0,75	0,41	0,41	0,30	0,54	49	
2	4	6	2	5057,77	1,12	0,64	1,06	0,61	0,27	0,26	0,14	0,26	0,71	0,57	0,89	0,48	0,28	0,27	0,27	0,08	212	
3	6	6	2	6076,22	0,84	0,68	0,70	0,68	0,39	0,27	0,27	0,08	0,61	0,79	0,55	0,41	0,35	0,31	0,27	0,31	569	
4	2	12	2	5138,64	0,96	1,09	1,15	0,70	0,54	0,30	0,50	0,19	0,95	1,06	1,23	1,26	0,42	0,63	0,54	0,08	46	
5	4	12	2	6386,52	0,66	0,27	0,56	0,26	0,30	0,19	0,22	0,21	0,52	0,53	0,35	0,52	0,20	0,07	0,53	0,09	232	
6	6	12	2	5366,12	0,69	0,83	0,69	0,62	0,41	0,04	0,33	0,42	0,81	0,51	0,85	0,37	0,29	0,21	0,33	0,21	555	
7	2	18	2	5888,36	0,68	0,42	1,28	0,68	0,42	0,20	0,51	0,52	0,52	0,59	0,46	0,34	0,28	0,12	0,26	0,17	42	
8	4	18	2	6044,20	0,37	0,55	0,69	0,76	0,43	0,26	0,16	0,30	0,54	0,67	0,54	0,58	0,09	0,22	0,14	0,14	213	
9	6	18	2	5679,65	0,90	1,01	0,64	1,18	0,53	0,41	0,44	0,37	0,78	0,75	1,16	0,73	0,32	0,42	0,49	0,10	591	
10	2	6	4	9426,32	0,78	0,42	0,93	0,88	0,11	0,12	0,45	0,41	0,74	0,41	0,84	1,16	0,30	0,32	0,25	0,38	130	
11	4	6	4	9771,90	0,81	0,71	0,67	0,70	0,48	0,28	0,22	0,24	0,83	0,91	0,75	0,81	0,20	0,26	0,31	0,41	692	
12	6	6	4	10415,86	0,61	0,42	0,47	0,60	0,31	0,06	0,10	0,20	0,70	0,70	1,16	0,99	0,20	0,16	0,17	0,22	1988	
13	2	12	4	10431,34	0,71	0,74	0,64	0,41	0,35	0,32	0,26	0,21	0,69	0,79	0,76	0,43	0,17	0,30	0,16	0,15	130	
14	4	12	4	10746,91	0,47	0,56	0,75	0,92	0,25	0,38	0,38	0,27	0,85	0,88	0,71	0,99	0,34	0,02	0,38	0,32	519	
15	6	12	4	10398,12	0,66	0,81	0,61	0,41	0,06	0,17	0,14	0,12	0,67	0,80	0,63	0,29	0,16	0,18	0,17	0,29	1892	
16	2	18	4	10642,80	0,64	0,99	0,80	1,20	0,28	0,25	0,25	0,29	0,76	0,36	0,84	1,01	0,21	0,21	0,41	0,24	129	
17	4	18	4	9997,32	0,61	0,88	0,54	0,74	0,28	0,15	0,18	0,16	0,59	0,36	0,58	0,45	0,21	0,29	0,15	0,34	674	
18	6	18	4	9891,91	0,79	0,62	0,72	0,84	0,34	0,27	0,43	0,27	0,73	0,63	0,70	0,73	0,24	0,13	0,38	0,38	2001	
19	2	6	6	16545,03	0,52	0,32	0,40	0,26	0,13	0,13	0,10	0,11	0,59	0,38	0,61	0,63	0,14	0,25	0,16	0,30	269	
20	4	6	6	13991,14	0,77	0,77	0,68	0,79	0,18	0,27	0,49	0,07	0,71	1,01	0,69	0,59	0,09	0,15	0,24	0,50	1013	
21	6	6	6	15616,93	0,66	0,82	0,60	0,57	0,10	0,08	0,16	0,22	0,58	0,47	0,67	0,83	0,19	0,18	0,13	0,24	3869	
22	2	12	6	16342,99	0,72	0,57	0,67	0,42	0,18	0,16	0,11	0,13	0,60	0,83	0,58	0,90	0,09	0,19	0,10	0,09	267	
23	4	12	6	16562,28	0,67	0,50	1,08	0,61	0,38	0,05	0,05	0,17	0,42	0,71	0,68	0,45	0,12	0,15	0,09	0,18	1279	
24	6	12	6	13767,62	0,99	0,68	0,87	0,94	0,13	0,32	0,47	0,27	1,05	0,61	0,88	1,06	0,38	0,14	0,35	0,28	3420	
25	2	18	6	13632,43	1,01	0,54	0,88	1,00	0,31	0,34	0,49	0,36	1,17	1,16	1,03	0,88	0,39	0,15	0,39	0,19	215	
26	4	18	6	15449,63	0,46	0,87	0,36	0,58	0,14	0,04	0,43	0,04	0,62	0,45	0,39	0,41	0,07	0,04	0,14	0,18	2180	
27	6	18	6	14162,08	0,58	0,71	0,57	0,61	0,33	0,24	0,54	0,28	0,36	0,44	0,40	0,53	0,24	0,25	0,25	0,20	2159	
Ortalama				10332	0,71	0,67	0,73	0,69	0,29	0,21	0,30	0,24	0,69	0,67	0,73	0,69	0,24	0,22	0,27	0,25	938	

Çizelge 6.4 (devamı): GA yaklaşımlarının BYS değerleri.

Problem	S	W	C	Min	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5	GA6	GA7	GA8	GA9	GA10	GA11	GA12	GA13	GA14	GA15	GA16	CPU	
Δ= 4																						
1	2	6	2	6198,02	0,70	0,84	0,72	0,29	0,15	0,25	0,30	0,46	0,70	0,82	0,67	0,66	0,22	0,38	0,23	0,15	128	
2	4	6	2	6218,01	0,66	0,75	0,99	0,54	0,31	0,09	0,32	0,31	0,99	0,69	0,73	0,89	0,16	0,35	0,18	0,33	600	
3	6	6	2	6114,76	0,51	0,65	0,62	0,54	0,18	0,20	0,19	0,34	0,46	0,52	0,66	0,65	0,09	0,22	0,21	0,08	1744	
4	2	12	2	6890,43	0,68	0,39	0,68	0,78	0,20	0,27	0,16	0,19	0,72	0,48	0,72	0,76	0,16	0,30	0,13	0,42	135	
5	4	12	2	6224,87	0,81	0,68	0,65	0,63	0,06	0,15	0,19	0,00	0,80	0,60	0,67	0,80	0,26	0,31	0,35	0,36	682	
6	6	12	2	6237,79	0,59	0,87	0,65	1,19	0,14	0,21	0,11	0,39	0,75	0,67	0,64	0,85	0,18	0,09	0,25	0,10	1844	
7	2	18	2	5971,90	0,79	0,57	0,85	0,75	0,42	0,15	0,33	0,35	0,99	0,61	0,94	0,69	0,25	0,25	0,40	0,21	123	
8	4	18	2	5716,81	0,68	0,60	0,65	0,67	0,21	0,36	0,22	0,26	0,67	0,70	0,72	0,69	0,20	0,13	0,24	0,22	640	
9	6	18	2	6483,21	0,63	0,67	0,56	0,73	0,19	0,10	0,17	0,09	0,54	0,86	0,98	0,64	0,15	0,12	0,16	0,28	1797	
10	2	6	4	9947,34	1,07	0,84	0,96	1,09	0,37	0,10	0,36	0,35	0,88	0,99	0,90	1,03	0,31	0,36	0,29	0,22	418	
11	4	6	4	10629,13	1,04	0,80	0,92	0,75	0,18	0,18	0,30	0,13	0,94	0,96	1,04	0,73	0,20	0,10	0,22	0,17	2247	
12	6	6	4	9765,08	0,80	0,96	0,97	0,74	0,31	0,18	0,38	0,18	1,00	1,06	0,96	1,02	0,27	0,04	0,27	0,16	5908	
13	2	12	4	10641,89	1,03	0,91	1,03	0,84	0,16	0,13	0,31	0,41	1,00	0,78	0,97	0,95	0,18	0,41	0,26	0,29	407	
14	4	12	4	11581,06	0,75	0,84	0,76	0,64	0,09	0,26	0,24	0,11	0,68	0,82	0,67	0,85	0,19	0,09	0,13	0,04	1792	
15	6	12	4	11499,27	0,67	0,65	0,71	0,98	0,39	0,13	0,11	0,08	0,71	0,65	0,64	0,73	0,22	0,23	0,14	0,13	6102	
16	2	18	4	12306,22	0,59	0,79	0,66	0,62	0,17	0,17	0,22	0,17	0,67	0,65	0,64	0,61	0,14	0,27	0,09	0,16	440	
17	4	18	4	11150,06	0,81	0,89	0,77	0,65	0,28	0,25	0,35	0,05	0,85	1,07	1,27	0,85	0,24	0,15	0,22	0,21	2217	
18	6	18	4	10241,75	0,86	0,64	0,78	0,68	0,17	0,15	0,28	0,20	0,73	1,00	0,87	0,82	0,15	0,29	0,11	0,18	5140	
19	2	6	6	14404,35	1,10	0,61	1,07	1,01	0,26	0,52	0,41	0,58	0,98	1,18	1,07	0,80	0,26	0,22	0,33	0,09	867	
20	4	6	6	14453,48	1,06	0,87	0,98	0,84	0,28	0,34	0,29	0,11	1,00	1,10	1,02	0,77	0,30	0,13	0,26	0,22	3180	
21	6	6	6	17251,40	0,58	0,86	0,67	0,84	0,23	0,13	0,16	0,24	0,69	0,58	0,69	0,79	0,21	0,17	0,12	0,29	3894	
22	2	12	6	15451,03	0,90	0,94	0,92	0,98	0,19	0,16	0,21	0,14	0,96	0,97	0,95	1,04	0,18	0,06	0,20	0,24	905	
23	4	12	6	15530,26	0,81	0,85	0,85	1,11	0,18	0,19	0,16	0,31	0,90	0,79	0,92	0,99	0,22	0,17	0,16	0,11	3932	
24	6	12	6	15385,04	1,35	0,87	0,82	0,94	0,21	0,11	0,20	0,48	0,92	0,53	0,96	0,97	0,37	0,03	0,30	0,30	3556	
25	2	18	6	14338,19	1,21	0,97	1,21	0,91	0,37	0,35	0,38	0,21	1,19	1,12	1,18	0,94	0,35	0,21	0,52	0,50	729	
26	4	18	6	14086,25	0,79	0,96	0,97	0,86	0,16	0,19	0,28	0,24	1,01	0,70	0,94	0,86	0,18	0,15	0,33	0,25	3823	
27	6	18	6	16794,00	0,52	0,65	1,68	0,45	0,22	0,29	1,24	0,23	0,34	0,41	0,33	0,49	0,25	0,15	0,12	0,12	5281	
Ortalama				10797	0,82	0,77	0,85	0,78	0,23	0,21	0,29	0,25	0,82	0,79	0,84	0,81	0,22	0,20	0,23	0,22	2168	



Şekil 6.5 : YAK yaklaşımlarının farklı Δ değerleri için kutu grafikleri.



Şekil 6.6 : GA yaklaşımlarının farklı Δ değerleri için kutu grafikleri.

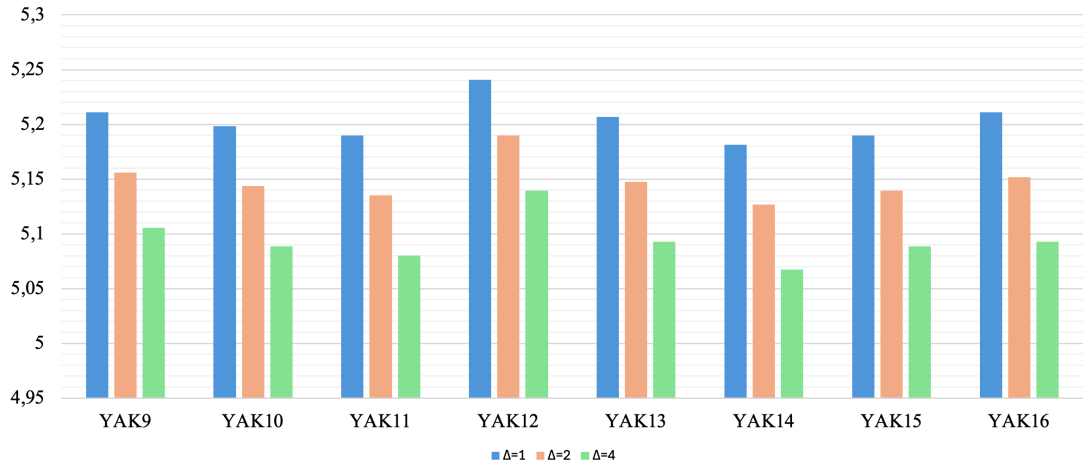
Tüm yaklaşımlarda kullanılan uygunluk fonksiyonu, ortalama müşteri temin süresine dayanmaktadır ve yaklaşımlar arasındaki karşılaştırma, bu uygunluk fonksiyonu değerlerinden hesaplanan BYS değerleri ile yapılmaktadır. Ancak, yaklaşımların kaynak kullanımı gibi farklı açılardan da değerlendirilmesi önemlidir. Bu amaçla, çift noktalı çaprazlama operatörünün kullanıldığı YAK tabanlı yaklaşımlar için ortalama araç sayısı ve ortalama çalışan sayısı hesaplanarak, uygulanan üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının kaynak kullanımı üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir.

Şekil 6.7'ye göre, tüm yaklaşımlar için sistemdeki alt parti sayısı arttıkça ortalama araç sayısı azalmaktadır. Bunun nedeni, partilerin daha küçük alt partilere bölünmesiyle araçlara sığdırılmalarının kolaylaşmasıdır. Ayrıca, en düşük araç kullanımı YAK14

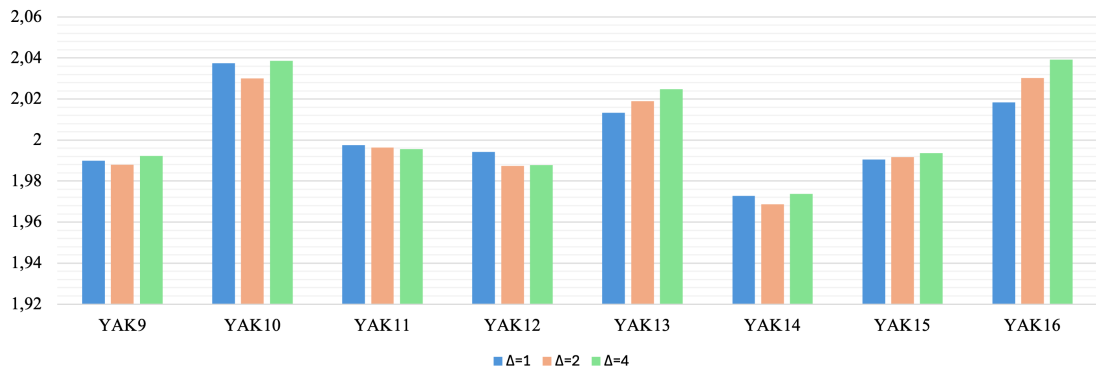
yaklaşımıyla sağlanmaktadır. Bu durum, YAK14 yaklaşımının yalnızca ortalama müşteri temin süresi açısından yüksek kaliteli sonuçlar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda araç kullanımını da azalttığını göstermektedir.

Şekil 6.8, tüm yaklaşımlar için ortalama çalışan sayısını göstererek, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejilerinin SÜS'teki çalışan kaynak kullanımına etkisini değerlendirmektedir. Elde edilen sonuçlar, farklı stratejilerin çalışan ihtiyacını nasıl şekillendirdiğini ortaya koyarken, özellikle YAK14 yaklaşımının tüm alt parti sayılarında diğer yaklaşımlara kıyasla en iyi performansı sergilediği görülmektedir.

Sonuç olarak, değişken alt parti stratejisinin benimsendiği, çalışan transferinin uygulandığı ve ilk biten alt partinin ilk gönderildiği YAK14 yaklaşımı, yalnızca ortalama temin süresi açısından yüksek kaliteli çözümler sunmakla kalmayıp, aynı zamanda ortalama araç ve çalışan sayısı bakımından da kaynak kullanımında önemli bir verimlilik sağlamaktadır.



Şekil 6.7 : Ortalama kullanılan araç sayısı.



Şekil 6.8 : Ortalama çalışan sayısı.

Son olarak, SÜS performansı üzerindeki kontrol edilebilir faktörlerin ve bunların etkileşimlerinin çeşitli metrikler açısından incelenmesi gerekmektedir. Çünkü bu faktörler, üretim süreçlerinin etkinliğini belirleyen temel unsurlar olup sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu bağlamda, faktörlerin ana etkilerini ve etkileşimlerini istatistiksel olarak değerlendirmek amacıyla üç yönlü ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. ANOVA, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini analiz ederek, hangi faktörlerin ve etkileşimlerin anlamlı olduğunu belirlemeye olanak tanımaktadır. Bu analiz, YAK14 yaklaşımıyla elde edilen BYS değerleri üzerinden gerçekleştirilmiş olup, uygunluk fonksiyonu ve kaynak kullanımı açısından yüksek kaliteli çözümler sunan bu yaklaşımın istatistiksel olarak üstünlüğünü değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. ANOVA sonuçları, Minitab 21.3 programı kullanılarak elde edilmiş ve faktörlerin etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Çizelge 6.5'te sunulan sonuçlar, parti büyüklüğü belirleme stratejisinin uygulanmadığı $\Delta=1$ değeri ve parti büyüklüğü belirleme stratejisinin uygulanmaya başladığı $\Delta=2$ seviyeleri için hiçbir faktörün veya etkileşimin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Fakat $\Delta=4$ için yani sistemde alt parti sayısı arttıkça S faktörü ve S*W etkileşimi p değeri 0,05'ten küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu etkileri daha iyi analiz etmek ve farklı kontrol edilebilir faktör seviyelerinin sonuçları nasıl etkilediğini anlamak adına ana etki ve etkileşim grafiklerinin incelenmesi önemlidir. Bu amaçla, ana etki ve etkileşim grafikleri Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da sunulurken kontrol edilebilir faktörlerin etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Ana etki grafiği, düşük ve orta seviyedeki alt parti sayıları için SÜS'te orta seviyede seru kullanımının daha düşük ortalama temin süreleri sağlamak için yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak, alt parti sayısı arttıkça, daha fazla seru kullanılması tercih edilmelidir. Buna karşın, alt parti sayısının en yüksek seviyeye ulaştığı durumlarda, çalışan sayısının orta seviyede tutulması daha uygun olmaktadır. Bu durum, başarının yüksek çalışan sayısına sahip olmaktan çok, çalışanları verimli kullanmaktan geçtiğini göstermektedir. Ayrıca, müşteri sayısındaki artışın ortalama temin süresini doğrudan artırmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, uygun parti büyüklüğü belirleme, çalışan transferi ve araç atama stratejileri ile müşteri ve sipariş sayısı yüksek olsa dahi ortalama temin süresinin kontrol altında tutulabileceği sonucuna varılabilir.

Kontrol edilebilir faktörler arasındaki etkileşimler incelendiğinde, çalışan sayısı ile serü sayısı arasındaki ilişkinin SÜS performansını belirlemede kritik bir rol oynadığı görülmektedir. Parti büyüklüğü belirleme stratejileri uygulanmadığında daha az çalışan kullanımı avantaj sağlarken, parti büyüklüğü stratejileri devreye alındıktan sonra orta seviyede çalışan sayısı ve yüksek seviyede serü sayısının en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Çalışan sayısı ile müşteri sayısı arasındaki etkileşim ise, çalışanların sistem performansı üzerindeki belirleyici rolünü daha iyi ortaya koymaktadır. Müşteri sayısı yüksek olsa dahi, SPS'in orta seviyede bir çalışan sayısı ile yönetilmesinin daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, etkin bir üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejisi uygulanırken, SÜS tasarımında çalışan ve serü sayısı arasındaki dengenin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Doğru denge sağlandığında, sistem performansı önemli ölçüde artırılabilir ve kaynak kullanımı optimize edilebilir.

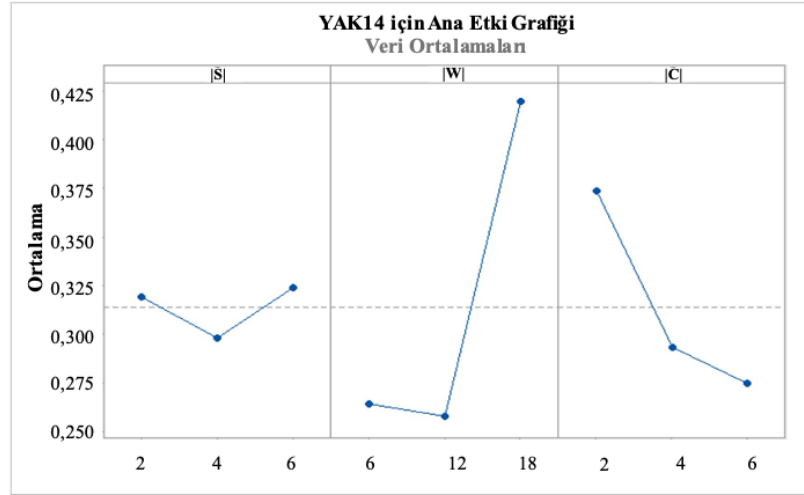
Çizelge 6.5 : YAK14 yaklaşımına göre üç yönlü ANOVA sonuçları.

Üç Yönlü ANOVA: $\Delta=1$ için BYS vs $ S $, $ W $, ve $ C $					
Kaynak	DF	Düzeltilmiş SS	Düzeltilmiş MS	F Değeri	P değeri
$ S $	2	0,003	0,002	0,03	0,966
$ W $	2	0,151	0,076	1,54	0,271
$ C $	2	0,050	0,025	0,51	0,618
$ S * W $	4	0,175	0,044	0,89	0,511
$ S * C $	4	0,141	0,035	0,72	0,603
$ W * C $	4	0,059	0,015	0,3	0,868
Hata	8	0,392	0,049		
Toplam	26	0,971			
R-kare	Düzeltilmiş R-kare				
0,5965	0,0000				

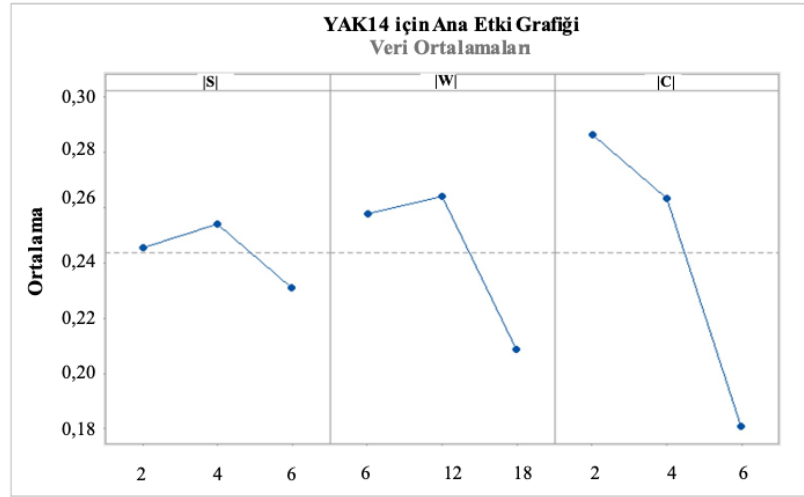
Üç Yönlü ANOVA: $\Delta=2$ için BYS vs $ S $, $ W $, ve $ C $					
Kaynak	DF	Düzeltilmiş SS	Düzeltilmiş MS	F Değeri	P değeri
$ S $	2	0,002	0,001	0,13	0,884
$ W $	2	0,017	0,008	0,84	0,465
$ C $	2	0,055	0,028	2,81	0,119
$ S * W $	4	0,045	0,011	1,15	0,399
$ S * C $	4	0,081	0,020	2,06	0,178
$ W * C $	4	0,100	0,025	2,54	0,122
Hata	8	0,105	0,014		
Toplam	26	0,630			
R-kare	Düzeltilmiş R-kare				
0,7927	0,3263				

Çizelge 6.5 (devamı): YAK 14 yaklaşımına göre üç yönlü ANOVA sonuçları.

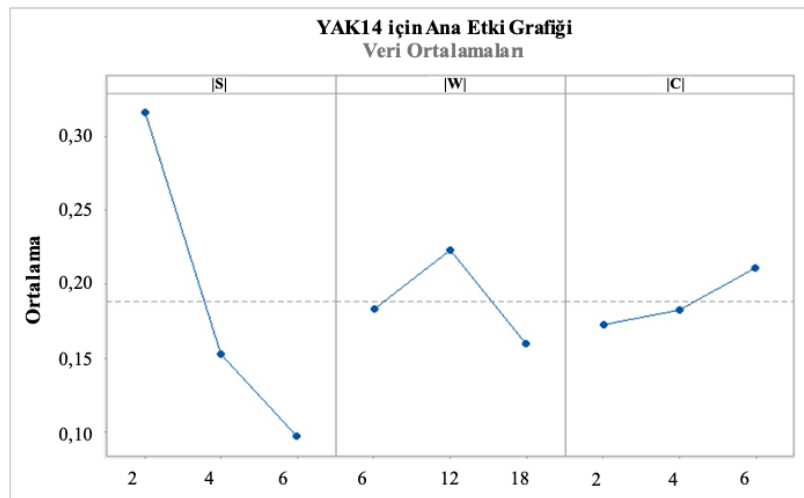
Üç Yönlü ANOVA: $\Delta = 4$ için BYS vs $ S $, $ W $, ve $ C $					
Kaynak	DF	Düzeltilmiş SS	Düzeltilmiş MS	F Değeri	P değeri
$ S $	2	0,233	0,117	28,51	0
$ W $	2	0,018	0,009	2,22	0,171
$ C $	2	0,007	0,004	0,86	0,458
$ S * W $	4	0,114	0,028	6,94	0,01
$ S * C $	4	0,011	0,003	0,66	0,639
$ W * C $	4	0,050	0,013	3,06	0,083
Hata	8	0,033	0,004		
Toplam	26	0,466			
R-kare	Düzeltilmiş R-kare				
0,9297	0,7716				



(a) $\Delta=1$

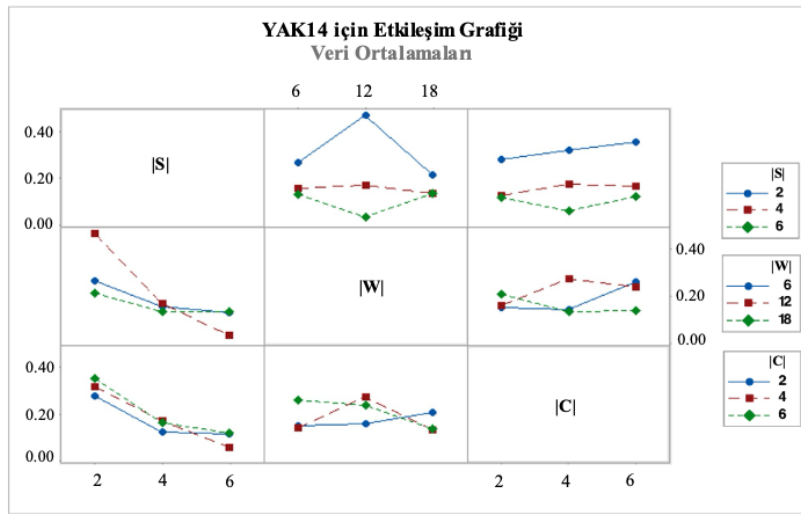
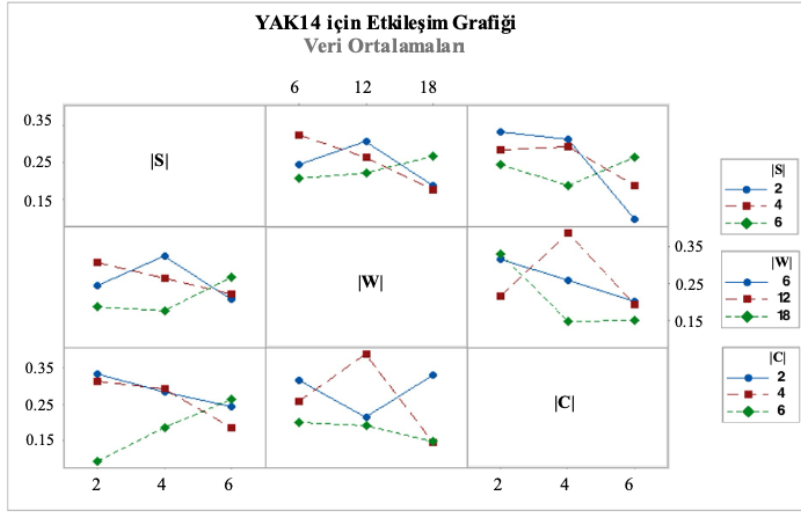
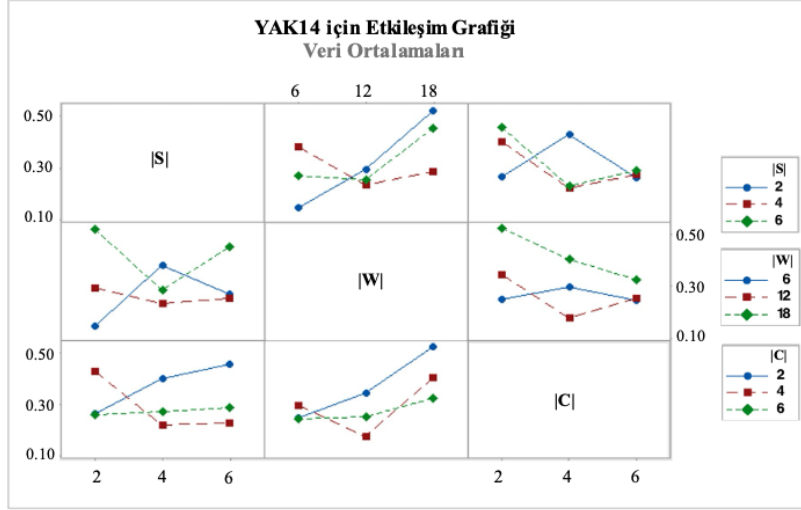


(b) $\Delta=2$



(c) $\Delta=4$

Şekil 6.9 : YAK14 için ana etki grafikleri.



Şekil 6.10 : YAK14 için etkileşim grafikleri.

6.4 Bulgular ve Yönetimsel Çıkarımlar

SÜS'te parti büyüklüğü belirleme stratejileri dikkate alırken üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararları arasındaki koordinasyon çeşitli açılardan analiz edilmiş ve sistem verimliliğini artırmaya yönelik önemli yönetsel içgörüler sağlanmıştır. Özellikle ortalama müşteri temin süresi ve kaynak kullanımı açısından elde edilen bulgular, bu çalışmanın pratik etkilerini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, Giriş bölümünde tanımlanan AS.1'den AS.3'e kadar olan araştırma sorularına ilişkin bulgular sunulmaktadır.

AS.1 ile İlgili Bulgular: SÜS'te üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejileri arasındaki koordinasyonun ortalama temin süresi ve kaynak kullanımı üzerinden etkilerine yönelik şu gözlemler yapılmıştır:

- Parti belirleme stratejileri uygulanmadığında, çalışan transferi ve araç atama stratejileri sonuçlar üzerinde belirgin bir etki yaratmamaktadır. Ancak, partiler küçük alt parçalara bölündüğünde performans farkları daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle ilk biteni ilk gönder araç atama stratejisinin uygulandığı YAK14 ve GA14 algoritmaları, en iyi sonuçları göstermektedir. Bu da doğru araç atama stratejisinin ve parti akışı yönetiminin SÜS sistemi optimizasyonunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir.
- Parti büyüklüğü belirleme stratejileri uygulandığında, yöntemler arasındaki performans farkları daha belirgin hale gelmektedir. Değişken alt parti stratejisi, çalışan transferine izin verilmesi ve ilk biteni ilk gönder araç atama stratejisinin kullanılması (GA14 ve YAK14 algoritmaları) ortalama temin süresinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.
- Parti büyüklüğü belirleme ve çalışan transferi stratejileri araç atama stratejilerine kıyasla daha az etkiye sahiptir. Ancak, kendi aralarında karşılaştırıldığında, değişken alt parti stratejisinin eşit alt parti stratejisine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışan transferine izin verilen durumlar, izin verilmeyenlere kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Bu sonuç, esnek parti akışlarının ve iş gücü yönetiminin, üretim ve tedarik zincirindeki verimliliği artırabileceğini göstermektedir.
- Araç atama stratejilerine bakıldığında, ilk biteni ilk gönder stratejisinin rastgele araç atama stratejisine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu,

doğru araç yönetiminin, teslimat süreçlerinin hızını ve kaynak kullanımını optimize etmedeki önemini ortaya koymaktadır.

- Araç kullanımı açısından stratejileri karşılaştırıldığımızda sistemdeki alt parti sayısı arttıkça ortalama araç sayısının azaldığı görülmektedir. Bu, partilerin daha küçük alt parçalara bölünmesinin, daha az sayıda araca yerleştirilmesini kolaylaştırması ile açıklanabilir. Bu durum, araç kullanımının daha verimli hale geldiğini ve kaynak israfının önlendiğini göstermektedir.
- Ortalama çalışan sayısını incelediğimizde, alt parti sayısı arttıkça ortalama çalışan sayısında kayda değer bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, stratejiler arasında anlamlı bir fark bulunmasa da YAK14 yaklaşımının en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Yani, değişken alt parti stratejisinin uygulanması, çalışan transferine izin verilmesi ve *ilk biteni ilk gönder* araç atamasının yapılması iş gücü kaynak kullanımında olumlu sonuçlar sağlamaktadır.
- Tüm sonuçlar incelendiğinde, YAK14 yaklaşımının ortalama temin süresi ve kaynak kullanımı açısından sürekli olarak yüksek kaliteli sonuçlar sağladığı görülmektedir. Bu bulgu, SÜS'te üretim ve tedarik zinciri süreçlerinde stratejik kararların etkinliğini vurgulamaktadır. Özellikle, değişken alt parti stratejisinin uygulanması, çalışan transferine izin verilmesi ve 'ilk biteni ilk gönder' araç atamasının kullanılması, sistem performansını optimize ederek operasyonel verimliliği artırmaktadır. Dolayısıyla, doğru strateji kombinasyonlarının belirlenmesi ve uygulanması, işletmelerin temin sürelerini azaltmasına, kaynak kullanımını iyileştirmesine ve kazandığı esneklik sayesinde rekabet avantajı elde etmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.
- Elde edilen yönetimsel çıkarımlar, esnek ve otonom yapısı nedeniyle SÜS için daha uygulanabilir olsa da, orta ve küçük boyutlu ürün montajı yapan karma montaj hatları gibi üretim sistemlerinde de adapte edilebilir bir yapıya sahiptir. Özellikle ürün çeşitliliğinin yüksek olduğu ve üretim hacminin orta düzeyde seyrettiği karma montaj hatlarında, alt parti stratejileri ve araç atama yaklaşımlarıyla üretim ve dağıtım senkronizasyonu güçlendirilebilir. Bununla birlikte, hücresel üretim sistemleri gibi modüler yapılarda da çalışan transferi ve esnek parti akışı stratejileri, iş yükü dengeleme ve kaynak kullanımı açısından benzer performans kazanımları sağlayabilir. Ayrıca, sabit konumlu

üretim sistemlerinde (örneğin ağır ekipman veya büyük ölçekli projelere dayalı üretimlerde), alt parti stratejilerinin doğrudan uygulanabilirliği sınırlı olsa da, teslimat planlaması ve araç yönetimi kararlarında benzer ilkelerden faydalanılarak lojistik etkinlik artırılabilir. Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen strateji kombinasyonları doğrudan SÜS'e özgü kurgulanmış olsa da, farklı üretim sistemlerinin yapısal özellikleri dikkate alınarak uyarlanabilir ve çeşitli ortamlarda benzer operasyonel iyileştirmeler elde edilebilir.

AS.2 ile İlgili Bulgular: Uygulanan çözüm yöntemlerinin ve çaprazlama operatörlerinin çözüm performanslarındaki farklılıklarına ilişkin şu gözlemler yapılmıştır:

- GA ve YAK tabanlı yaklaşımlar arasında genel performans açısından anlamlı bir fark bulunmamakla birlikte, YAK tabanlı yaklaşımların genellikle daha dengeli çözümler ürettiği ve çözüm süresi açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, YAK'ın keşif ve sömürü arasındaki dengeli yapısı sayesinde daha kararlı çözümler sunabilmesidir. Yerel ve küresel arama süreçlerini etkili bir şekilde yöneterek aşırı yerel çözümlere takılmadan daha dengeli sonuçlar üretir. Ayrıca, çözüm güncelleme mekanizmasının esnekliği, çözüm çeşitliliğini artırarak optimizasyon sürecini iyileştirir. Genetik algoritmalara kıyasla daha az hesaplama gerektirdiğinden, özellikle büyük ölçekli problemler için daha kısa çözüm süreleri sağlar. Özetle, büyük ölçekli üretim ve tedarik zinciri optimizasyonlarında yalnızca en iyi çözümü bulmaya odaklanmak yerine, çözümlerin dengeli ve makul sürelerde elde edilmesine de önem verildiğinden, YAK tabanlı yöntemlerin tercih edilmesi önerilebilir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, yöntemler arasındaki temel farkların yalnızca kullanılan sezgisel yöntemlerden değil, aynı zamanda uygulanan üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejilerinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu durum, işletmelerin yalnızca kullanılan yöntemleri değil, aynı zamanda çizelgeleme stratejilerini de dikkatle belirlemeleri gerektiğini ortaya koymaktadır.
- Hem GA hem de YAK tabanlı yaklaşımlarda çift noktalı çaprazlamanın tek noktalı çaprazlamaya kıyasla daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, çift noktalı çaprazlamanın ebeveyn çözümler arasındaki çeşitliliği daha iyi koruyarak çözüm uzayında daha geniş bir arama yapılmasını

sağlamasıdır. Bu durum, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık optimizasyon problemlerinde yerel minimumlara sıkışma riskini azaltmakta ve daha kaliteli çözümler bulunmasına katkı sağlamaktadır.

AS.3 ile İlgili Bulgular: Kontrol edilebilir faktörlerin sistem performansına etkisine yönelik şu gözlemler yapılmıştır:

- Parti bölme stratejisinin uygulanmadığı veya başlangıç seviyesinde olduğu durumlarda, hiçbir faktörün sistem üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak, alt parti sayısının artmasıyla birlikte ($\Delta=4$), seru sayısı (S) ve seru-çalışan etkileşimi ($S*W$) önemli hale gelmektedir. Bu durum, düşük ve orta alt parti seviyelerinde belirli bir seru sayısının yeterli olduğunu, ancak alt parti sayısı arttıkça sistemin verimli çalışabilmesi için daha fazla seruya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ancak, gereğinden fazla seru kullanımı da kaynak israfına neden olabileceğinden, bu denge dikkatle değerlendirilmelidir.
- Alt parti sayısı en yüksek seviyeye ulaştığında, en iyi performansın orta seviyede çalışan sayısı ile elde edildiği görülmüştür. Bu, sadece fazla çalışan istihdam etmenin verimliliği artırmadığını, aksine çalışanların etkili bir şekilde yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, çalışan transferinin izin verildiği sistemlerde, iş gücünün daha verimli kullanılabildiği ve operasyonel sürelerin iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çok sayıda müşteri olmasına rağmen sistemin yine orta düzeyde çalışan sayısı ile en verimli şekilde yönetilebildiği görülmüştür. Bu nedenle daha fazla çalışan istihdam etmek yerine, çalışan transferi mekanizmaları kullanılarak mevcut iş gücünü etkili kullanmak önerilmektedir.
- Müşteri sayısındaki artışın ortalama temin süresini doğrudan uzatmadığı belirlenmiştir. Doğru parti büyüklüğü belirleme, çalışan transferi ve araç atama stratejileri sayesinde, yüksek müşteri ve sipariş hacimlerinde bile temin süresi kontrol altında tutulabilmektedir.
- SÜS'ün etkinliği, doğru stratejilerin belirlenmesi ve çalışan ile seru sayısının dengeli yönetilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Verimliliğin artırılması için, aşırı çalışan veya seru kullanımından kaçınılarak operasyonel ihtiyaçlara uygun bir planlama yapılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, kaynak kullanımını optimize ederken sistem performansını da sürdürülebilir hale getirmektedir.

Elde edilen bulgular ve çıkarımlar doğrultusunda, işletmelerin SÜS uygulamalarını ve önerilen stratejileri benimsemeleri, işletmelere aşağıdaki faydaları sunacaktır:

- Öncelikle SÜS kullanan işletmeler üretim sürecini daha küçük modüllere ayırarak sistemin daha esnek ve yönetilebilir olmasını sağlar. Bu modüler yapı, üretim tasarımını ve planlamasını kolaylaştırırken, aynı zamanda işletmelere esneklik kazandırarak hızlı adaptasyonu mümkün kılar. Bu durum, özellikle talep dalgalanmalarına ve değişken üretim gereksinimlerine hızlı bir şekilde yanıt verilebilmesini sağlar. Ayrıca serular, küçük üretim alanları ile taşıma ve beklemleri minimize ederek, malzeme hareketlerini optimize eder ve ilk biten ürünlerin hızla elde edilmesini sağlar. Böylece, temin sürelerinin kısalmasına ve genel verimliliğin artmasına yardımcı olur.
- İşletmelerin SÜS'te küçük ve değişken alt parti büyüklükleriyle üretimi benimsemesi, üretim hattındaki darboğazların önlenmesine ve talep dalgalanmalarına daha hızlı yanıt verilmesine olanak tanır. Daha esnek bir üretim süreci sayesinde, işletmeler müşteri taleplerine daha verimli ve zamanında karşılık verebilir, bu da müşteri memnuniyetini artırır. Ayrıca, bu strateji ürünlerin izlenebilirliğini artırarak üretim hatalarının daha kolay tespit edilmesini ve gerektiğinde hızlı müdahale edilmesini sağlar. Böylece, kalite kontrol süreçleri daha etkin bir şekilde yönetilebilir ve kalite standartlarının korunmasına katkıda bulunur.
- Serularda çalışan transferine izin verilmesi, iş gücü kullanımında esneklik sağlayarak genel verimliliği artırır. Çalışanlar farklı süreçlere uyum sağlayabilir ve gerektiğinde kritik noktalara yönlendirilerek darboğazlar önlenir. Ayrıca, çalışanların farklı süreçlerde deneyim kazanması ile çalışan yetkinliği artar ve işletmelere uzun vadede daha esnek bir iş gücü kazandırır. Bu durum, gereksiz iş gücü maliyetlerini azaltarak işletmelere maliyet avantajı da sağlar. Üretim ihtiyacına bağlı olarak çalışan transferi yapılması, fazla çalışan istihdam etme gereksinimini minimize eder ve iş gücü kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır.
- SÜS ile tedarik zinciri kararlarının entegrasyonu, sistemin genel verimliliğini önemli ölçüde artırır. Üretim ve dağıtım süreçleri arasındaki bilgi akışının hızlanması ve bölümler arası koordinasyonun artması sayesinde beklemler ve gecikmeler minimize edilir, müşteri temin süreleri kısaltılır.

Özellikle ilk biteni ilk gönder stratejisi, tamamlanan ürünlerin hızlı bir şekilde sevk edilmesini sağlayarak teslimat süreçlerini optimize eder ve rastgele atama stratejisine kıyasla beklemleri önemli ölçüde azaltır.

Bununla birlikte, küçük alt partilerle üretim, araç kullanım verimliliğini artırarak daha az araç gereksinimi doğurur ve lojistik maliyetleri düşürür. Böylece, işletmeler hem operasyonel verimliliklerini artırabilir hem de kaynak israfını en aza indirerek maliyet tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca, müşteri temin sürelerinin kısalması ve tedarik zinciri boyunca daha hızlı bir tepki süresi sağlanması, işletmelerin müşteri taleplerine daha hızlı ve etkin yanıt vermesini mümkün kılar. Bu da sistemin dayanıklılığını artırarak rekabet avantajı sağlamasına katkıda bulunur.

- Doğru strateji kombinasyonunun (Değişken alt parti stratejisi + Çalışan transferi + İlk biteni ilk gönder stratejisi) uygulanması, işletmelere müşteri sayısındaki artışa rağmen operasyonlarını verimli bir şekilde sürdürebilme yeteneği kazandırır. Özellikle yüksek talep dönemlerinde, bu stratejiler temin sürelerini optimize ederek üretim sürecindeki darboğazları önler ve kaynak kullanımını dengeleyerek operasyonel sürdürülebilirliği artırır. Böylece, müşteri taleplerine zamanında ve etkin bir şekilde yanıt vererek müşteri memnuniyetini yüksek tutmak mümkün hale gelir.

Bununla birlikte, SÜS'ün pratik olarak tasarlanması ve uygulamaya geçilmesi belirli zorlukları da beraberinde getirebilmektedir.

- Farklı üretim sistemlerinden SÜS'e geçiş süreci, yalnızca fiziksel alanların yeniden yapılandırılmasıyla sınırlı değildir. Bir serunun etkin işletilmesi, çok becerili çalışanlara dayandığı için iş gücü yetkinliklerinin artırılması, çalışanların çok işlevli rollere hazırlanması ve organizasyonel kültürün bu esnek yapıya uyum sağlayacak şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak bu süreçte; çalışan direnci, planlama sistemlerinin yetersizliği ve üretim akışındaki düzensizlikler gibi faktörler uygulama başarısını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, çalışanlar için sistemli eğitim programlarının geliştirilmesi, görev rotasyonlarının uygulanması ve işe alımda yetkinlik temelli değerlendirme yöntemlerinin benimsenmesi kritik öneme sahiptir.
- Bunun yanı sıra, işletmelerde yüksek hazırlık süreleri SÜS'ün etkin biçimde uygulanmasında önemli bir engel teşkil edebilmektedir. Serularda istenen

Üretim esnekliğinin sağlanabilmesi için bu srelerin ihmal edilebilir düzeye indirgenmesi kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, hazırlık süresi düşürme analizi gibi yalın üretim tekniklerinin uygulanması, ekipman tasarımlarının sadeleştirilmesi ve standartlaştırılması sistemin yeteneğinin artırılması açısından belirleyici rol oynamaktadır.

Özetle, bu alışma, SS'n kullanılması ve bu üretim sistemlerinde uygulanan stratejik kararların doğru şekilde bir araya getirilmesinin, işletmelerin operasyonel verimliliğini artırmada ve rekabet gücü kazanmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, esnek üretim yapıları, etkin iş gücü yönetimi ve optimize edilmiş tedarik zinciri süreçleriyle işletmelerin değişken talep koşullarına daha hızlı ve verimli yanıt verebileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, doğru üretim ve dağıtım stratejilerinin benimsenmesi, sürdürülebilir büyüme ve müşteri memnuniyetinin sağlanması temel bir unsur olacaktır. SS'n uygulamaya başarıyla aktarılabilmesi için sistem geçişinin kademeli olarak planlanması, pilot çalışmalarla doğrulanması ve üst yönetim desteğiyle yönlendirilmesi gerekmektedir. Böylece, teorik olarak sunulan avantajların pratikte de elde edilmesi mümkün hale gelebilir.



7. SONUÇLAR VE GELECEK ARAŞTIRMALAR

Günümüzde hızlı değişen talep yapısı ve artan tüketim hızı, işletmeleri değişkenliğe ayak uydurabilecek üretim sistemleri oluşturmaya itmektedir. Bu bağlamda, yüksek yeniden yapılandırılabilirliğe, ürün çeşitliliği ve hızlı talepleri karşılama kapasitesine sahip yeni üretim sistemleri ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerden biri de Japonya’da geliştirilen ve uygulamaya alınan SÜS’tür. SÜS, atölye tipi üretimin esnekliğini ve montaj hatlarının üretim hızını birleştirerek işletmelere esneklik ve rekabet avantajı sağlamaktadır.

Bu tür üretim sistemlerinde esnekliği artırmak için parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin kullanılması oldukça önemlidir. Parti büyüklüğü belirleme stratejileri, partileri daha küçük alt partilere bölerek daha fazla esneklik, yanıt verme yeteneği ve verimlilik sağlamaktadır. Aynı zamanda, SÜS’ün en önemli özelliklerinden biri olan çalışan transferi (Shojinka) de üretim sistemlerine esneklik kazandırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu yöntem dinamik müşteri taleplerine uyum sağlamak için iş gücü kullanımını etkili ve verimli bir şekilde yöneterek üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır.

Bu doğrultuda, yüksek esneklik ve karmaşıklığa sahip üretim sistemlerinde doğru çizelgeleme yapılması ve tedarik zinciri kararlarının üretim sistemleriyle entegre edilmesi oldukça önemli bir noktadır. Literatürde SÜS çizelgeleme ve dağıtım kararlarının birlikte ele alınmasına yönelik çalışmalar olsa da üretim ve tedarik zincirini birlikte ele alıp çizelgeleyen ve bunu yaparken parti büyüklüğü belirleme stratejilerinin göz önünde bulunduran çalışmaların eksik olduğu gözlemlenmektedir.

Bu motivasyonla bu tez çalışması, parti büyüklüğü belirleme stratejileri bağlamında SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemini ele almaktadır. Ortalama müşteri temin süresini minimize etmeyi amaçlayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel model beş farklı modülden oluşarak parti büyüklüğü belirleme (eşit alt parti ve değişken alt parti) ve çalışan transferi (Transfere izin verilir ve

verilmez) stratejilerinin araç atama kararlarıyla birlikte sistem üzerindeki performansını da ölçmeyi sağlamaktadır.

Problemin NP-zor yapısı göz önüne alındığında, büyük boyutlu problemlerin çözüm sürecinin etkin yönetilmesi için Genetik Algoritma (GA) ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) tabanlı iki farklı sezgisel yöntem uygulanmıştır. Üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının doğru kombinasyonlarının ortalama müşteri temin süresi ve kaynak kullanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için parti büyüklüğü belirleme (eşit alt parti ve değişken alt parti), çalışan transferi (transfere izin verilir ve verilmez) ve araç atama (rastgele atama ve ilk biteni ilk gönder atama) stratejilerinden oluşan sekiz adet strateji kombinasyonu geliştirilmiştir. Ayrıca her strateji kombinasyonu tek noktalı ve çift noktalı olmak üzere iki farklı operatörlerle donatılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak ortalama müşteri temin süresi açısından, sistem performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, dört farklı kontrol edilebilir faktör ve her birinin üç farklı seviyesi üzerinde deneysel tasarım (DoE) gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kullanılan çözüm yöntemleri arasında anlamlı bir fark olmadığı, ancak daha dengeli çözümler ve daha iyi çözüm süreleri sağladığı için YAK yönteminin tercih edilmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, kullanılan çaprazlama operatörlerinden çift noktalı çaprazlama operatörünün, çeşitliliği daha iyi sağladığı için daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak asıl performans farkının, kullanılan stratejilerden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Özellikle, ilk biteni ilk gönder araç atama stratejisinin diğer stratejilere kıyasla sistem performansını daha fazla etkilediği görülmüştür. Bu durum, araç yönetiminin doğru bir şekilde yapılmasının temin sürelerini kısaltmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, kaynak kullanımının optimizasyonu ve temin süresi minimizasyonu için doğru strateji kombinasyonlarının önemini vurgulamış ve bu kombinasyonların sistem performansını artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, değişken alt parti stratejisi, çalışan transferi ve ilk biteni ilk gönder araç atama stratejilerinin birleşimiyle daha verimli ve etkili sonuçlar elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme kararlarının entegrasyonunun önemini vurgulayarak SÜS üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme problemine dair değerli bulgular sunmaktadır. Ayrıca uygulanan stratejilerde kontrol edilebilir faktörlerden serü sayısının ve çalışan sayısının etkileşiminin sistem performansı

üzerinde etkili olduğu ortaya konmuştur. Bu doğrultuda seru sistemlerinin tasarlanırken seru sayısının dengeli belirlenmesi ve çok fazla çalışan istihdam etmek yerine iş gücünün etkili planlanması ve esnek yönetiminin daha önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Mevcut çalışma, SÜS içinde üretim ve tedarik zinciri çizelgeleme stratejilerinin entegrasyonu açısından önemli bulgular sunmuş olsa da bu çalışmanın sınırlamaları ve daha ileriye götürülmesi gereken bazı yönler bulunmaktadır. Gelecek araştırmalar için aşağıda bazı önerilen araştırma yönleri, mevcut çalışmanın genişletilmesi ve sınırlamalarının ele alınması amacıyla açıklanmıştır:

(i) Talep Belirsizliğinin Modellenmesi: Çalışmada müşteri taleplerinin kesin olduğu varsayılmıştır. Ancak, gerçek dünyada talep belirsizliği yaygın bir durumdur. Bu nedenle, stokastik programlama veya sağlam optimizasyon yöntemleri kullanılarak belirsizlik altında daha dayanıklı çizelgeleme modelleri geliştirilebilir.

(ii) Tedarik Zinciri Tasarım Kararlarının Entegrasyonu: Mevcut model, üretim ve dağıtım aşamalarına odaklanmaktadır. Ancak, tedarikçi seçimi, depo konumlandırma ve envanter yönetimi gibi üst seviye tedarik zinciri tasarım kararlarının da entegrasyonu, sistemin genel performansını daha iyi değerlendirmeye olanak sağlayacaktır.

(iii) İç Lojistik ve Hat Besleme Kararlarının Analizi: Üretim süreçlerinde iç lojistik ve hat besleme stratejileri, operasyonel verimliliği doğrudan etkilemektedir. Üretim alanındaki malzeme akışı, taşıma sistemleri ve hat içi dağıtım kararlarının optimizasyonu, SÜS'ün performansını daha da iyileştirebilir.

(iv) Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımlarının Geliştirilmesi: Mevcut çalışma tek amaçlı bir hedef fonksiyona dayanmaktadır. Ancak gelecekteki araştırmalarda müşteri temin süresi, kaynak kullanımı, iş gücü dengesi ve enerji tüketimi gibi performans göstergelerinin eşzamanlı olarak optimize edildiği çok amaçlı modeller geliştirilebilir. Bu yaklaşım, karar vericilere daha dengeli ve uygulanabilir çözümler sunacaktır.

(v) Karma Model Montaj Hatları ile Seru Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Gelecek araştırmalarda, önerilen üretim ve dağıtım stratejilerinin farklı üretim sistemlerinde nasıl performans gösterdiği incelenebilir. Özellikle karma model montaj hatları ile seru sistemlerinin karşılaştırmalı analizi, strateji-temelli yaklaşımların hangi sistem yapılarında daha etkili sonuçlar doğurduğunu ortaya koyabilir. Seru sistemleri,

alışan merkezli ve yeniden yapılandırılabilir yapısıyla yüksek esneklik sunarken; karma model montaj hatları, ürün çeşitliliğini standart iş akışları içinde yönetmeye odaklanmaktadır. Bu iki sistemin dinamikleri farklı olduğu için, benzer stratejilerin performans etkileri de farklılaşabilir.

Bu neriler doğrultusunda yapılacak alışmalar, SS ve tedarik zinciri entegrasyonu alanındaki araştırmalara katkı sağlayarak, değişken talep ortamlarında daha esnek ve verimli üretim sistemleri geliştirilmesine yardımcı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Ak, B.**, (2012). *Seçilmiş bir endüstriyel tesiste üretim çizelgeleme problemi ve genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi), Ondokuzmayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Amirteimoori, A., Mahdavi, I., Solimanpur, M., Ali, S. S., & Tirkolaee, E. B.** (2022). A parallel hybrid PSO-GA algorithm for the flexible flow-shop scheduling with transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108672, 1-16.
- Bortolini, M.** (2023). Analytic model to predict productivity in divisional Seru production environment. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109058, 1-12.
- Ceylan, Z., Tozan, H., Bulkan, S.** (2021). A coordinated scheduling problem for the supply chain in a flexible job shop machine environment. *Operational Research*, 21, 875-900.
- Chen, Z. L.** (2024). Online Integrated Production and Distribution Scheduling: Review and Extensions. *INFORMS Journal on Computing*.
- Çalışkan, E., İşleyen, S. K., & Çerçioğlu, H.** (2021). A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 793-806.
- Edis, E. B., & Oguz, C.** (2012). Parallel machine scheduling with flexible resources. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 433-447.
- Fujita, Y., Izui, K., Nishiwaki, S., Zhang, Z., & Yin, Y.** (2022). Production planning method for seru production systems under demand uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107856, 1-7.
- Gai, Y., Yin, Y., Tang, J., & Liu, S.** (2022). Minimizing makespan of a production batch within concurrent systems: seru production perspective. *Journal of Management Science and Engineering*, 7(1), 1-18.
- Gürsoy, B., Kara, S. S.** (2021). Modelling of just-in-time distribution network under raw material quality and time constraints. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(3), 313-321.
- Gürsoy Yılmaz, B., Yılmaz, Ö. F., & Çevikcan, E.** (2023). Lot streaming in workforce scheduling problem for seru production system under Shojinka philosophy. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109680, 1-23.
- Gürsoy Yılmaz B., Yılmaz, Ö. F., Akçalı, E., & Çevikcan, E.** (2025). Seru scheduling problem with lot streaming and worker transfers: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 177, 106967, 1-25.

- Holland, J. H.** (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 66-73.
- Jiang, Y., Zhang, Z., Gong, X., & Yin, Y.** (2021). An exact solution method for solving seru scheduling problems with past-sequence-dependent setup time and learning effect. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107354, 1-20.
- Kaku, I.** (2017). Is seru a sustainable manufacturing system?. *Procedia Manufacturing*, 8, 723-730.
- Kaku, I., Gong, J., Tang, J., & Yin, Y.** (2009). Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems. *International Journal of Production Research*, 47(8), 2055-2078.
- Karaboga, D., & Akay, B.** (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108-132
- Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C., & Karaboga, N.** (2014). A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial intelligence review*, 42, 21-57.
- Kaya, E., Gorkemli, B., Akay, B., & Karaboga, D.** (2022). A review on the studies employing artificial bee colony algorithm to solve combinatorial optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 105311, 1-30.
- Kramer, O., Kramer, O.** (2017). *Genetic algorithms* (pp. 11-19). Springer International Publishing.
- Köksal, S.** (2023). *Soğuk hava deposunda yeşil sipariş sıralama probleminin yapay arı kolonisi algoritması ve genetik algoritma ile çözülmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Körez, M. T.** (2005). *Sıralı akış tipi çizelgeleme problemlerinde genetik algoritma uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lei, D., & Guo, X.** (2013). Scheduling job shop with lot streaming and transportation through a modified artificial bee colony. *International Journal of Production Research*, 51(16), 4930-4941.
- Li, B., & Wu, Y.** (2024). Integrated optimization of worker assignment, batch splitting and scheduling for a hybrid assembly line-seru production system. *Computers & Industrial Engineering*, 194, 110399, 1-19.
- Li, D., Jin, H., & Zhang, Y.** (2025). Dynamic worker allocation in Seru production systems with actor-critic and pointer networks. *European Journal of Operational Research*.
- Li, D., Jiang, Y., Zhang, J., Cui, Z., & Yin, Y.** (2023). An on-line seru scheduling algorithm with proactive waiting considering resource conflicts. *European Journal of Operational Research*, 309(2), 506-515.
- Li, X., Yu, Y., & Huang, M.** (2022a). Multi-objective cooperative coevolution algorithm with a Master-Slave mechanism for Seru Production. *Applied Soft Computing*, 119, 108593, 1-15.
- Li, X., Yu, Y., Sun, W., & Tang, J.** (2022b). Reducing tardy batches by seru production: Model, exact solution, cooperative coevolution solution, and insights. *Computers & Operations Research*, 160, 106048, 1-15.

- Li, X., Zhang, Z., Sun, W., Liu, Y., & Tang, J.** (2024). Parallel dynamic NSGA-II with multi-population search for rescheduling of seru production considering schedule changes under different dynamic events. *Expert Systems with Applications*, 238, 121993, 1-20.
- Li, Y., & Zhang, Z.** (2025). Principles on balancing divisional seru with cross-trained workers. *Computers & Industrial Engineering*, 200, 110793, 1-21.
- Lian, J., Liu, C., Li, W., & Yin, Y.** (2018). A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems considering the worker heterogeneity. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 366-382.
- Liu, C., Dang, F., Li, W., Lian, J., Evans, S., & Yin, Y.** (2015). Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures. *Journal of Cleaner Production*, 105, 285-299.
- Liu, C., Li, W., Lian, J., & Yin, Y.** (2012). Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3), 312-325.
- Liu, C., Yang, N., Li, W., Lian, J., Evans, S., & Yin, Y.** (2013). Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 937-959.
- Liu, F., Fang, K., Tang, J., & Yin, Y.** (2022). Solving the rotating seru production problem with dynamic multi-objective evolutionary algorithms. *Journal of Management Science and Engineering*, 7(1), 48-66.
- Liu, F., Niu, B., Xing, M., Wu, L., & Feng, Y.** (2021). Optimal cross-trained worker assignment for a hybrid seru production system to minimize makespan and workload imbalance. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107552, 1-15.
- Luo, L., Zhang, Z., & Yin, Y.** (2017). Modelling and numerical analysis of seru loading problem under uncertainty. *European Journal of Industrial Engineering*, 11(2), 185-204.
- Miao, Q., Bai, Z., Liu, X., & Awais, M.** (2022). Modelling and numerical analysis for seru system balancing with lot splitting. *International Journal of Production Research*, 61(21), 7410-7433.
- Moon, I. K., Cha, B. C., & Bae, H. C.** (2006). Hybrid genetic algorithm for group technology economic lot scheduling problem. *International journal of production research*, 44(21), 4551-4568.
- Muthiah, A., & Rajkumar, R.** (2014). A comparison of artificial bee colony algorithm and genetic algorithm to minimize the makespan for job shop scheduling. *Procedia Engineering*, 97, 1745-1754.
- Nourmohammadi, A., & Zandieh, M.** (2011). Assembly line balancing by a new multi-objective differential evolution algorithm based on TOPSIS. *International Journal of Production Research*, 49(10), 2833-2855.
- Pei, J., Liu, X., Pardalos, P. M., Fan, W., Yang, S., & Wang, L.** (2014). Application of an effective modified gravitational search algorithm for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 335-348.

- Reiter, S.** (1966). A system for managing job-shop production. *The Journal of Business*, 39(3), 371-393.
- Ren, Y., Tang, J., Yu, Y., & Li, X.** (2024). A two-stage stochastic programming model and parallel Master-Slave adaptive GA for flexible Seru system formation. *International Journal of Production Research*, 62(4), 1144–1161.
- Sadegheih, A.** (2006). Scheduling problem using genetic algorithm, simulated annealing and the effects of parameter values on GA performance. *Applied Mathematical Modelling*, 30(2), 147-154.
- Shang, J. S., Li, S., & Tadikamalla, P.** (2004). Operational design of a supply chain system using the Taguchi method, response surface methodology, simulation, and optimization. *International Journal of Production Research*, 42(18), 3823-3849.
- Shen, L., Zhang, Z., & Yin, Y.** (2021). An improved genetic algorithm for seru scheduling problem with worker assignment considering lot-splitting. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 14(6), 710-730.
- Sun, W., Li, Q., Huo, C., Yu, Y., & Ma, K.** (2016). Formulations, features of solution space, and algorithms for line-pure seru system conversion. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 9748378, 1-14.
- Sun, W., Yu, Y., Lou, Q., Wang, J., & Guan, Y.** (2020). Reducing the total tardiness by Seru production: model, exact and cooperative coevolution solutions. *International Journal of Production Research*, 58(21), 6441-6452.
- Tao, L., Tao, R., & Xie, N.** (2025). Optimization of the seru production system with demand fluctuation: A Mean-CVaR model. *Computers & Industrial Engineering*, 199, 110760.
- Tüzemen, A.** (2020). Yeni bir üretim sistemi: Seru. *Cumhuriyet üniversitesi iktisadi ve idari bilimler dergisi*, 21(2), 334-351.
- Torkul, O., Selvi, İ. H., & Şişci, M.** (2022). Smart seru production system for Industry 4.0: a conceptual model based on deep learning for real-time monitoring and controlling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(4), 385-407.
- Wang, L., Zhang, Z., & Yin, Y.** (2019). Order acceptance and scheduling considering lot-splitting in seru production system. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1305-1309). IEEE.
- Wu, Y., Wang, L., & Chen, J. F.** (2021). A cooperative coevolution algorithm for complex hybrid seru-system scheduling optimization. *Complex & Intelligent Systems*, 7(5), 2559-2576.
- Wu, Y., Wang, L., Chen, J. F., Zheng, J., & Pan, Z.** (2024a). A reinforcement learning driven two-stage evolutionary optimisation for hybrid seru system scheduling with worker transfer. *International Journal of Production Research*, 62(11), 3952-3971.
- Wu, Y., Wang, L., Li, R., & Chen, J. F.** (2024b). A reinforcement learning-driven adaptive decomposition algorithm for multi-objective hybrid seru system scheduling considering worker transfer. *Swarm and Evolutionary Computation*, 88, 101602.

- Wu, Y., Wang, L., Zhuang, X., Wang, J. J., Chen, J. F., & Zheng, J.** (2023). A cooperative coevolutionary algorithm with problem-specific knowledge for energy-efficient scheduling in seru system. *Knowledge-Based Systems*, 274, 110663, 1-15.
- Yilmaz, Ö. F.** (2020b). Attaining flexibility in seru production system by means of Shojinka: An optimization model and solution approaches. *Computers & Operations Research*, 119, 104917, 1-21.
- Yilmaz, Ö. F.** (2020a). Operational strategies for seru production system: a bi-objective optimisation model and solution methods. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3195-3219.
- Yilmaz, Ö. F., & Pardalos, P. M.** (2017). Minimizing average lead time for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain with multiple customers and multiple manufacturers. *Computers & Industrial Engineering*, 114, 244-257.
- Yilmaz, B. G., & Yilmaz, Ö. F.** (2022). Lot streaming in hybrid flowshop scheduling problem by considering equal and consistent sublots under machine capability and limited waiting time constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108745, 1-17.
- Ying, K. C., & Tsai, Y. J.** (2017). Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems. *International Journal of Production Research*, 55(10), 2978-2989.
- Yin, Y., Stecke, K. E., Swink, M., & Kaku, I.** (2017). Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment. *Journal of Operations Management*, 49, 67-76.
- Yurtkuran, A., & Emel, E.** (2016). A discrete artificial bee colony algorithm for single machine scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 54(22), 6860-6878.
- Yu, Y., Gong, J., Tang, J., Yin, Y., & Kaku, I.** (2012). How to carry out assembly line–cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5259-5280.
- Yu, Y., Sun, W., Tang, J., Kaku, I., & Wang, J.** (2017). Line-seru conversion towards reducing worker (s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions. *International journal of production research*, 55(10), 2990-3007.
- Yu, Y., Wang, J., Ma, K., & Sun, W.** (2018). Seru system balancing: Definition, formulation, and exact solution. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 318-325.
- Yu, Y., Wang, S., Tang, J., Kaku, I., & Sun, W.** (2016). Complexity of line-seru conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi-objective optimization. *SpringerPlus*, 5, 1-26.
- Yu, Y., & Tang, J.** (2019). Review of seru production. *Frontiers of Engineering Management*, 6(2), 183-192.

- Yu, Y., Tang, J., Sun, W., Yin, Y., & Kaku, I.** (2013). Reducing worker (s) by converting assembly line into a pure cell system. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 799-806.
- Zhang, G., Hu, Y., Sun, J., & Zhang, W.** (2020). An improved genetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem with multiple time constraints. *Swarm and evolutionary computation*, 54, 100664.
- Zhang, X., Zhang, Z., Gong, X., & Yin, Y.** (2023a). An exact branch-and-bound algorithm for seru scheduling problems with sequence-dependent setup time. *Soft Computing*, 27(10), 6415-6436.
- Zhang, Z., Gong, X., Song, X., Yin, Y., Lev, B., & Chen, J.** (2022a). A column generation-based exact solution method for seru scheduling problems. *Omega*, 108, 102581.
- Zhang, Z., Gong, X., Song, X., Yin, Y., Lev, B., & Zhou, X.** (2024a). An effective two-phase heuristic for synchronized seru production scheduling and 3PL transportation problems. *International Journal of Production Economics*, 268, 109126.
- Zhang, Z., Song, X., Gong, X., Yin, Y., Lev, B., & Zhou, X.** (2023b). An effective heuristic based on 3-opt strategy for seru scheduling problems with learning effect. *International Journal of Production Research*, 61(6), 1938-1954.
- Zhang, Z., Song, X., Gong, X., Yin, Y., Lev, B., & Zhou, X.** (2024b). Coordinated seru scheduling and distribution operation problems with DeJong's learning effects. *European Journal of Operational Research*, 313(2), 452-464.
- Zhang, Z., Song, X., Huang, H., Yin, Y., & Lev, B.** (2022c). Scheduling problem in seru production system considering DeJong's learning effect and job splitting. *Annals of Operations Research*, 312, 1119-1141.
- Zhang, Z., Song, X., Huang, H., Zhou, X., & Yin, Y.** (2022b). Logic-based Benders decomposition method for the seru scheduling problem with sequence-dependent setup time and DeJong's learning effect. *European Journal of Operational Research*, 297(3), 866-877.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Beren GÜRSOY YILMAZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2021, Yıldız Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gürsoy Yılmaz, B., Çevikcan, E., Yılmaz, Ö. F.**, Optimizing Workforce and Sub-Lot Scheduling in Seru Production Systems. *International Conference on Engineering, Natural Sciences, and Technological Developments*, July 19-21, 2024, Balıkesir, Turkey.
- **Gürsoy Yılmaz, B., Yılmaz, Ö. F., Çevikcan, E.** (2023). Lot streaming in workforce scheduling problem for seru production system under Shojinka philosophy. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109680.
- **Gürsoy Yılmaz B., Yılmaz, Ö. F., Akçalı, E., Çevikcan, E.** (2025). Seru scheduling problem with lot streaming and worker transfers: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 177, 106967.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Büyüközkan, K., Gürsoy Yılmaz, B., Özçelik, G., Yılmaz, Ö. F.** (2025). An optimization model and customized solution approaches for in-plant logistic problem within the context of lean management. *Computers & Industrial Engineering*, 200, 110832.
- **Gürsoy, B., Kara, S. S.** (2021). Modelling of just-in-time distribution network under raw material quality and time constraints. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(3), 313-321.
- **Gürsoy, B., Kara, S. S.** (2021). Veri Analizi ve Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Tam Zamanında Yaklaşımının Ağ Tasarım Modeline Uygulanması. *Veri Bilimi*, 4(2), 40-48.
- **Gürsoy Yılmaz, B., Yılmaz, Ö. F.** (2024, October). Climate Risk Management for Aquaculture Industry: Robust Programming Approach vs Random Forest

Algorithm. In *International Conference on Artificial Intelligence: Towards Sustainable Intelligence* (pp. 127-140). Cham: Springer Nature Switzerland.

- **Gürsoy Yılmaz, B., Yılmaz, Ö. F.** (2022). Lot streaming in hybrid flowshop scheduling problem by considering equal and consistent sublots under machine capability and limited waiting time constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108745.
- **Gürsoy Yılmaz, B., Yılmaz, Ö. F., Yeni, F. B.** (2024). Comparison of lot streaming division methodologies for multi-objective hybrid flowshop scheduling problem by considering limited waiting time. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 20(11), 3373-3414.
- **Öksüz, E., Yılmaz, Ö. F., Öksüz, M. K., Gürsoy Yılmaz, B.** (2024). Integrated multi-manned disassembly line balancing problem with reverse supply chain design strategies by considering lot sizing. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1-24.
- **Yeni, F. B., Gürsoy Yılmaz, B., Özçelik, G., Yılmaz, Ö. F., Kalaycıoğlu O.** (2025). Revealing risk mitigation strategies for supply chain resilience in aquaculture industry through a methodology equipped with lean tools and stochastic programming. *Computers & Industrial Engineering*, 205, 111157.
- **Yılmaz, Ö. F., Guan, Y., Gürsoy Yılmaz, B.** (2025). A hybrid risk management framework for resilient medical supply chain design in the post-pandemic era. *Journal of Cleaner Production*, 144854.
- **Yılmaz, Ö. F., Guan, Y., Gürsoy Yılmaz, B.** (2025). Designing a resilient humanitarian supply chain by considering viability under uncertainty: A machine learning embedded approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 194, 103943.
- **Yılmaz, Ö. F., Guan, Y., Gürsoy Yılmaz, B., Yeni, F. B., Özçelik, G.** (2025). A comprehensive methodology combining machine learning and unified robust stochastic programming for medical supply chain viability. *Omega*, 133, 103264, 1-28.
- **Yılmaz, Ö. F., Gürsoy Yılmaz, B.** (2024, October). Supplier Selection for Agriculture Industry Under Uncertainty: Machine Learning Based Sample Average Approximation Method. In *International Conference on Artificial Intelligence: Towards Sustainable Intelligence* (pp. 184-195). Cham: Springer Nature Switzerland.
- **Yılmaz, Ö. F., Gürsoy Yılmaz, B., Yeni, F. B., Bal, A.** (2025). Investigating the impact of strategic warehouse design and product clustering on supply chain viability: A unified robust stochastic programming approach. *International Journal of Production Economics*, 285, 109621.
- **Yılmaz, Ö. F., Yeni, F. B., Gürsoy Yılmaz, B., Özçelik, G.** (2023). An optimization-based methodology equipped with lean tools to strengthen medical supply chain resilience during a pandemic: A case study from Turkey. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 173, 103089.