ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ: MODELLEME VE HAVACILIK SEKTÖRÜNDE UYGULAMA ÇALIŞMASI

JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM: A MODELING AND AN APPLICATION STUDY IN AEROSPACE INDUSTRY

ECEM SENA KÜÇÜK

DR. ÖĞR. ÜYESİ BANU YÜKSEL ÖZKAYA
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2025

ÖZET

ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ: MODELLEME VE HAVACILIK SEKTÖRÜNDE UYGULAMA ÇALIŞMASI

ECEM SENA KÜÇÜK
Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Banu YÜKSEL ÖZKAYA
2025, 86 sayfa

Atölye tipi üretim sistemlerinde, sınırlı kapasiteli makinelere belirli sayıdaki parçaların ve bu parçalara ait operasyonların hangi sırayla atanacağı kararı, üretim planlamada sıkça karşılaşılan ve çözümü oldukça karmaşık olan bir çizelgeleme problemidir. Literatürde bu yapıdaki problemler Atölye Çizelgeleme Problemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Parçaların farklı proses ve rotalara sahip olması ile makine ve zaman kaynaklarının kısıtlılığı, teslimat takviminin yönetimini güçleştirmektedir. Ancak, uygun öncelik kuralları belirlenerek üretim süreçlerinin etkin bir şekilde yönetimi mümkündür.

Bu çalışmada, hava aracı üretimi gerçekleştiren ve makine kapasitesi ile parça rotaları açısından kısıtlar içeren bir atölyede, öncelik kurallarının dikkate alındığı bir atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Üretim sürecinde parçaların farklı rotalara ve işlem sürelerine sahip olması ile birlikte sınırlı makine kapasitesi, çizelgeleme problemini çözüm açısından daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu kapsamda, üretim performansını artırmak amacıyla çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller aracılığıyla üretim süreci optimize edilmeye çalışılmıştır. Modellerde en büyük gecikme/erken teslimat sürelerinin ve toplam üretim (akış) sürelerinin minimize edilmesi olmak üzere iki farklı amaç fonksiyonu

dikkate alınmıştır. Geliştirilen matematiksel modellerden elde edilen sonuçlar, mevcut üretim sisteminin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış; sistemdeki kapasite değişimlerinin ve teslimat sürelerinin çizelgeleme performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, belirli öncelik kuralları ile modeller ilişkilendirmiş ve farklı amaç fonksiyonlarına hizmet eden çizelgelerin oluşturulabildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, havacılık sektöründe operasyonel çizelgeleme konusunda literatüre özgün bir katkı sunmakta; öncelik kurallarıyla ilişkilendirilmiş farklı amaç fonksiyonlarına yönelik çözümler geliştirerek, gerçek üretim ortamlarında çizelgeleme performansının artırılması ve kaynak kullanımının etkinleştirilmesine yönelik somut çıktılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atölye Çizelgeleme, Öncelik Kuralları, Toplam Akış Süresi, En Büyük Gecikme/Erken Teslimat Süresi.

ABSTRACT

JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM: A MODELING AND AN APPLICATION STUDY IN AEROSPACE INDUSTRY

ECEM SENA KÜÇÜK

Master of Science, Department of Industrial Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Banu YÜKSEL ÖZKAYA
2025, 86 page

In job shop production systems, the decision regarding the assignment sequence of a limited number of parts and their respective operations to machines with constrained capacities is a frequently encountered and highly complex scheduling problem in production planning. In the literature, such problems are classified as Job Shop Scheduling Problems (JSSPs). The presence of parts with varying processes and routing paths, along with limited machine and time resources, complicates the management of delivery schedules. However, effective management of production processes is possible through the use of appropriate priority rules.

This study addresses a job shop scheduling problem in an aircraft manufacturing workshop characterized by constraints in machine capacity and part routing, where priority rules are taken into account. The existence of parts with different routing paths and processing times, combined with limited machine capacity, further increases the complexity of the scheduling problem. Within this context, several mathematical models have been developed with the aim of improving production performance, and the production process has been optimized through these models. Two different objective functions were considered in the models:

minimizing the maximum tardiness/earliness and minimizing the total production (flow) time. The results obtained from the developed mathematical models were compared with simulation results of the current production system, and the effects of capacity variations and delivery times on scheduling performance were evaluated. Furthermore, the models were associated with specific priority rules, and it was observed that schedules serving different objective functions could be generated.

This study provides an original contribution to the literature on operational scheduling in the aviation sector by developing solutions aimed at different objective functions associated with priority rules, thereby offering concrete outcomes for improving scheduling performance and enhancing resource utilization in real-world production environments.

Keywords: Job Shop Scheduling, Priority Rules, Total Flow Time, Maximum Tardiness and Earliness

TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasında emeği olan, desteğini ve varlığını hissettiren herkese gönülden teşekkür ederim.

Öncelikle, bilgi ve deneyimiyle her aşamada bana rehberlik eden, yapıcı ve ufuk açıcı geri bildirimleriyle tezime katkılar sunan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Banu YÜKSEL ÖZKAYA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Sabrı, anlayışı ve desteği, bu süreci benim için çok daha anlamlı ve kıymetli hale getirmiştir.

Tez süreci boyunca akademik gelişimime katkı sağlayan Hacettepe Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma ve lisans eğitimim süresince üzerimde emeği olan Başkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca, tez konumla ilgili bilgi ve verileri paylaşarak araştırmamın ilerlemesine destek olan TUSAŞ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her koşulda yanımda olan, sevgileri ve destekleriyle bana güç veren aileme sonsuz teşekkür ederim. Canım annem, babam ve kardeşlerime her zaman yanımda oldukları ve bana inandıkları için minnettarım.

Son olarak, fakat benim için en kıymetli teşekkür; bu sürecin her anında yanımda olan sevgili eşim Mustafa Küçük'e... Sonsuz desteğin, inancın ve sevgin benim için tarif edilemez bir değer taşıyor. Bu yolculukta varlığın en büyük gücüm oldu. Her koşulda yanımda olduğun için sana sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezin yalnızca bir akademik çalışma değil; sabrın, emeğin ve kararlılığın bir sonucu olduğunu belirtmek isterim. Bu süreçte yanımda olan herkese yürekten teşekkür ederim.

Ecem Sena Küçük
Haziran 2025

İÇİNDEKİLER

Page

ÖZET i

ABSTRACT i

İÇİNDEKİLER iv

ÇİZELGELER DİZİNİ vi

ŞEKİLLER DİZİNİ viii

1. GİRİŞ 1

1.1. Tezin Kapsamı 1

1.2. Katkı 2

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1. Atölye Çizelgeleme Problemleri 4

2.2. Atölye Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması 14

2.2.1. İş Atölye Çizelgeleme Problemi (JSSP) 14

2.2.2. Akış Tipi Çizelgeleme Problemi (FSSP) 15

2.2.3. Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi (FFSSP) 15

2.2.4. Hibrid Akış Çizelgeleme Problemi (HFSSP) 15

2.2.5. Tek Makine Çizelgeleme Problemi (SMSP) 15

2.2.6. Paralel Makine Çizelgeleme Problemi (PMSP) 16

2.2.7. Açık Atölye Çizelgeleme Problemi (OSSP) 16

2.2.8. Çok İşlemli Görev Çizelgeleme Problemi (MPTSP) 16

2.2.9. Çok Amaçlı Çizelgeleme Problemleri 16

2.2.10. Stokastik Çizelgeleme Problemleri 17

2.2.11. Dinamik Çizelgeleme Problemleri 17

2.3. Literatüre Katkı 19

3. PROBLEM TANIMI VE MODEL 21

3.1. Problem Karakteristikleri ve Model Varsayımları 21

3.2. Model Kurgusu 24

3.2.1. Karar Değişkenleri ve Parametreler 24

3.2.2. Kısıtlar 26
3.2.3. Amaç Fonksiyonu 29
3.2.4. Model Boyutu 33
4. SAYISAL ANALİZ 35
4.1. Sayısal Analizin Amacı 35
4.2. Veri Setleri 35
4.3. Model Doğrulama Senaryoları 41
4.3.1. En Büyük Gecikme/Erken Teslimat Amaç Fonksiyonu İle Yapılan Model Doğrulama Senaryoları 41
4.3.2. Parçaların Bitiş Zamanları Toplamının En Küçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İle Yapılan Model Doğrulama Senaryoları 47
4.4. Hipotetik Veri Seti (2. Veri Seti) İle Yapılan Çalışmalar 53
4.4.1. Hipotetik Veri ile Amaç Fonksiyonları Arasındaki İlişkinin Analizi 64
4.5. Gerçek Veri Seti (3.Veri Seti) İle Yapılan Çalışmalar 66
4.5.1. Mevcut Durumun Simülasyonu 67
4.5.2. Bitiş Zamanları Toplamının En Küçüklendiği Durum 70
4.5.3. En Büyük Gecikme/Erken Teslimatların En Küçüklendiği Durum 74
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 79
6. KAYNAKLAR 82

ÇİZELGELER

		Page
Çizelge 2.1	Matematiksel ve sezgisel yöntemler kullanılan çalışmalar	13
Çizelge 2.2	Atölye çizelgeleme problemi türlerine göre sınıflandırılmış makaleler	18
Çizelge 3.1	İndisler	25
Çizelge 3.2	Parametreler	26
Çizelge 3.3	Karar Değişkenleri	26
Çizelge 3.4	Gecikme/erken teslimat modeli kısıt boyutu	33
Çizelge 3.5	Gecikme/erken teslimat modeli değişken boyutları	34
Çizelge 3.6	Toplam bitiş zamanları modeli kısıt boyutu	34
Çizelge 3.7	Toplam bitiş zamanları modeli değişken boyutları	34
Çizelge 4.1	İşleme süreleri (P_{ijk})	36
Çizelge 4.2	Makine kapasiteleri(C_j)	36
Çizelge 4.3	Teslimat zamanları (D_i) ve üretim adetleri (n_i)	36
Çizelge 4.4	Operasyonların makinede yapılabilirliği (y_{ijk})	37
Çizelge 4.5	Deterministik ortalama işleme süreleri	38
Çizelge 4.6	CV ≈ 0.30 değeriyle ve Çizelge 4.5'deki ortalama işlem süreleri ile hesaplanan uniform dağılım aralıkları	38
Çizelge 4.7	Makine kapasiteleri(C_j)	38
Çizelge 4.8	Teslimat zamanları (D_i) ve üretim adetleri (n_i)	38
Çizelge 4.9	Gecikme/erken teslimat modeli kısıt boyutu	39
Çizelge 4.10	Gecikme/erken teslimat modeli değişken boyutları	39
Çizelge 4.11	Toplam bitiş zamanları modeli kısıt boyutu	40
Çizelge 4.12	Toplam bitiş zamanları modeli değişken boyutları	40
Çizelge 4.13	Atama veri çizelgesi - senaryo 1	43
Çizelge 4.14	Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri	43
Çizelge 4.15	Optimal veri atama çizelgesi - senaryo 2	44
Çizelge 4.16	Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri	45

Çizelge 4.17 Optimal veri atama çizelgesi - senaryo 3 45
Çizelge 4.18 Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri 46
Çizelge 4.19 Atama veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 1 49
Çizelge 4.20 Optimal veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 2 51
Çizelge 4.21 Atama veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 3 52
Çizelge 4.22 Gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi 57
Çizelge 4.23 Bitiş zamanı amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi 58
Çizelge 4.24 Makine kapasiteleri artırıldığında gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu için 20 farklı senaryo analizi 62
Çizelge 4.25 Makine kapasiteleri artırıldığında bitiş zamanları amaç fonksiyonu için 20 farklı senaryo analizi 63
Çizelge 4.26 Parçaların teslimat zamanlarının uzatıldığı durumda gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi 64
Çizelge 4.27 Parçaların teslimat zamanlarının uzatıldığı durumda bitiş zamanları amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi..... 65
Çizelge 4.28 Matematiksel Modellerin Simülasyon Sonuçları 77

ŞEKİLLER

		Page
Şekil 3.1	Üretim süreci akış diyagramı	22
Şekil 4.1	Gannt chart - senaryo 1	42
Şekil 4.2	Gannt chart - senaryo 2	44
Şekil 4.3	Gannt chart - senaryo 3	46
Şekil 4.4	Gannt chart (operasyon sayısı 48) - senaryo 4	47
Şekil 4.5	Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 1	48
Şekil 4.6	Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 2	50
Şekil 4.7	Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 3	52
Şekil 4.8	Gannt chart (2. amaç fonksiyonu ve operasyon sayısı 48) - senaryo 6	53
Şekil 4.9	Makine doluluk oranlarının amaç fonksiyonları için karşılaştırılması	56
Şekil 4.10	Amaç fonksiyonu değerleri için istatistiksel özelliklerin karşılaştırılması	56
Şekil 4.11	Farklı performans kriteri değerlerine göre makine doluluk oranları	61
Şekil 4.12	Amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim - pareto frontier	66
Şekil 4.13	Normalizasyon kat sayısı kullanmanın çözüme etkisi	67
Şekil 4.14	Mevcut sistem simülasyonu ile elde edilen çizelge	69
Şekil 4.15	Makine yükleme oranları - En uzun işlem süresi modeli	70
Şekil 4.16	Üretim bitiş zamanlarının en küçüklemesi amaç fonksiyonu ile elde edilen çizelge	73
Şekil 4.17	Makine yükleme oranları - bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği model	74
Şekil 4.18	En büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklemesi amaç fonksiyonu ile elde edilen çizelge	75
Şekil 4.19	Makine yükleme oranları - en büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklendiği model	76

1. GİRİŞ

Havacılık sektörüne ait bir üretim sisteminde, üretilmesi gereken çok sayıda parça grubu ve her parça için farklı prosesler ve rotalar bulunur. Makine zamanı da sınırlı bir kaynak olduğunda, kaynakları ve teslimat takvimini yönetmek önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada ele alınan problemde mevcut durumda en uzun işlem süresine sahip parçaların önceliklendirildiği sezgisel ve manuel bir çizelgeleme yapılmaktadır. Bu çizelge ile çalışıldığında birçok parçanın teslimatı geç tarihlerde gerçekleştirilmiş ve müşteri cezalarına katlanılmıştır. Bu nedenle iki farklı amaç fonksiyonu ile daha iyi bir çözüm elde edilebilir mi sorusunu cevaplamak için bu çalışma ele alınmıştır. Havacılık sektöründe ele alınan bu problemde parçaların teslimat tarihinden gecikme süresinin en büyük olduğu durumun en küçüklenmesi ve toplam üretim akış zamanının en küçüklenmesi amaç fonksiyonlarıyla atölye çizelgeleme probleminin çözülmesi hedeflenmiştir.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez kapsamında havacılık sektöründe üretim yapan bir atölyede çizelgeleme problemi ele alınmaktadır. Her üretim sisteminde olduğu gibi ele alınan üretim sisteminde de birden fazla makine, kaynak ve zaman kısıtı yer almaktadır. Üretimi yapılan parçaların nihai durumda teslimat takvimini karşılayabilmesi oldukça önemlidir. Gecikmelerin ve erken teslimatların olması istenen bir durum değildir. Tam zamanında teslimat ve kısa sürede işlemlerin tamamlanma hedefi mevcuttur. Ele alınan problem kısıtlarıyla üretim atölyesinde üretimi yapılan parçaların teslimat takvimini destekleyecek şekilde üretilmesi beklenmektedir. Problem atölye çizelgeleme probleminin farklı öncelik kuraları ile ilişkilendirildiği iki ayrı amaç fonksiyonu ele alınmış ve ilgili problem için modeller oluşturulmuştur. Matematiksel modellerin, ilgili problemin çözümü için takvimi mevcut duruma göre iyileştiren bir çözüm ve üretim planını sunacak bir çizelge oluşturması hedeflenmektedir.

1.2. Katkı

Literatürde birden fazla uygulama ile atölye çizelgeleme problemi ve türleri farklı çözüm yöntemleriyle ele alınmıştır. Fakat havacılık sektörüne ait uzun parça rotaları, öncüllük ardıllık ilişkileri ile birbirine sıkı sıkıya bağlı bir yapıda ve nispeten büyük model boyutlu bir probleme ait atölye çizelgeleme çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışmada uzun ve karmaşık rotalara sahip parçalar yer alması, altı ay gibi uzun bir planlama periyoduna ait planlama yapılması ve modelde oluşturulan kısıtların literatürdeki benzer problemlerden farklı kurgulanması gibi sebeplerden oluşturulan matematiksel model özgündür. Literatürde benzer yapıda olup incelenen çalışmalarda öncüllük ardıllık kısıtları, operasyon çakışmalarını önleyici kısıtlar bu problemden farklı yapıda kurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada ele alınan amaç fonksiyonlarının farklı öncelik kurallarıyla olan ilişkisi incelenmiş ve farklı önceliklere sahip üretim çizelgeleri oluşturulabileceği gözlemlenmiştir. Ele alınacak modeller ile mevcut durumun analizi, en büyük gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu modeli ve toplam bitiş zamanları amaç fonksiyonu modeli ayrı ayrı incelenmiş ve birlikte uygunlukları yorumlanmıştır. Modelin gerçek bir veri setiyle gerçek hayat problemi için çözüm üretmesi de önem arz etmektedir.

Problem katkısında bahsedilen bazı öncelik kuralları ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

En Erken Teslim Tarihi (Earliest Due Date - EDD) : Görevlerin en erken teslim ediliş tarihine göre sıralanmasıdır. Bu kural, projenin geç kalma riskini en aza inditgemeyi amaçlamaktadır.

En Kısa İşleme Süresi (Shortest Processing Time - SPT) : En kısa sürede tamamlanacak olan işin veya görevin önceliklendirilmesidir. Görevlerin daha hızlı tamamlanmasının istendiği projeler için uygundur.

En Uzun İşleme Süresi (Longest Processing Time - LPT) : En uzun sürede tamamlanacak olan işe önceliğin verilmesidir. Önem verilen kaynakların öncelikli olarak uzun sürecek işler ya da görevler için ayrılması gerektiği durumlarda kullanılır.

Kritik Oran (Critical Ratio - CR) : Bir işin teslimine kalan sürenin kalan işlem süresine oranına göre önceliklendirilmesidir. CR= (Kalan Zaman) / (Kalan İş Süresi). CR oranı bir değerinden küçükse iş gecikmiş demektir.CR oranı bir değerinden büyükse iş beklenene göre çok daha iyi ilerliyor demektir. CR oranı bir değere eşitse iş çizelgelendiği şekliyle ilerlemektedir. Kısıtlı zaman ve kaynaklar içinde işlerin tamamlanması gerektiğinde, en kritik işin önceliklendirilmesi için kullanılır.

İlk Giren İlk Çıkar (First Come First Serve - FCFS) : İşlerin geldikleri sıraya göre önceliklendirilmesidir.

Kritik Yol (Critical Path) : Projedeki en uzun süren ve projeyi geciktirebilecek kritik işlerin önceliklendirilmesidir.

Kalan Serbest Zaman (Slack Time Remaining - STR) : Bir görevin tamamlanması için kalan serbest zamana göre önceliklendirir. Bu kural, bir görevin bitirilmesi için kalan zaman ile o görevin bitirilmesi için gereken süre arasındaki farkı hesaplamaktadır. Bu fark ne kadar az ise, ilgili görev o kadar öncelikli hale gelmektedir. Kalan serbest zamanı en az olan işler önceliklidir çünkü proje için kritik ve geciktirme potansiyeli yüksek olan işlerdir.

Operasyon Önceliği (Operation Priority - OP) : Belirli bir görevin veya operasyonun öncelik sırasını ifade etmektedir. Bu öncelik, genellikle projenin hedefleri ve zaman kısıtları göz önünde tutularak belirlenir. Görevler, proje planına veya üretim ihtiyaçlarına göre belirlenen öncelik derecelerine göre sıralanır. Örneğin, bir operasyonun tamamlanması diğer operasyonlar için kritikse, ilgili operasyona yüksek öncelik atanmaktadır.

Sıra Numarası (Sequence Number - SQNO) : Bir görev veya işlem için belirlenmiş olan sıra numarasını ifade etmektedir. Bu sıra, işlemlerin hangi sırayla tamamlanması gerektiğini ifade eder. Üretim hatlarında veya projelerde işlemlerin doğru sırada yapılmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

M adet makine ve n adet iş bulunan bir atölye olsun ve her iş önceden belirlenmiş birbirinden farklı rotaları takip ederek bir dizi makineyi ziyaret etsin. Bu atölyede belirli işleme süreleriyle belirli tezgah kısıtlarını kullanarak üretim yapılıyor olsun. İşlerin hangi makineler tarafından hangi zamanda yapılacağı birçok atölye için çözülmesi zor bir problemdir ve literatür de bu tür problemlere atölye çizelgeleme problemleri (JSSP) denmektedir. Literatüre bakıldığında üretim atölyelerinde operasyonların planlanmasında belirli öncelik kuralları uygulanır.

Atölye çizelgeleme problemlerini ele alan çalışmaları incelendiğinde farklı problem tipleri ve çözüm yöntemleri ile karşılaşılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

2.1. Atölye Çizelgeleme Problemleri

Abdullah (2004) makalesinde, En erken teslimat tarihi (EDD) ve kalan işlem başına gevşeklik (SRO) olan iki atama kuralının performansını değerlendirmiştir. Çizelgeler bu iki yönteme dayalı olarak oluşturulmuştur. Bu tekniklerin performansı temel olarak yerel aramayı baz alan açgözlü algoritma ile ölçülmüştür.

Guo vd. (2006) makalesinde, giysi montaj süreci için atölye çizelgeleme problemi çözümüne yönelik evrensel bir matematiksel model tasarlanmıştır. Bu modelin amacı, her bir siparişin üretimine ne zaman başlanacağına ve operasyonların makinelere nasıl atanacağına karar vererek, erken ve geç kalmanın toplam cezalarını minimize etmektir. Daha sonra bu modeli çözmek için genetik optimizasyondan yararlanılmıştır. Genetik algoritmaya dayanarak, sezgisel bir başlatma adımı geliştirildi. İlgili yöntemin performansını değerlendirmek için verileri kullanan üç deney oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar, karma ve çok ürünlü montaj ortamında atölye çizelgeleme problemini çözmek için önerilen algoritmanın etkin olduğunu göz önüne sermiştir. Bu makalede ele alınan planlama hedefi, hazır giyim işletmelerinin teslim tarihleri ve sınırlı kaynakların kullanımını optimize ederek stok azaltması konusunda faydalı olacaktır.

Low vd.(2009) çalışmalarında genetik algoritmaya dayanan bir yöntem kullanarak açık atölye çizelgelem probleminin çözümünde kurulum ve işlem sürelerinin ayrı ele alınmasının önemini göstermişlerdir. Bu çalışma, OSPP'nin çözüm sürecinde genetik algoritmanın ve sürelerin ayrılmasının etkinliğini vurgulamaktadır.

Pongchairerks (2009) çalışmasında atölye çizelgeleme problemini, çok amaçlı makinelerle atölye çizelgeleme problemini ve açık atölye çizelgeleme problemini çözmek için üç ayrı algoritma oluşturulmuştur. Önerilen Geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (GLN-PSOc) algoritması sürünün arama uzayının farklı bölümlerini eş zamanlı olarak gezip, optimali bulmaya çalıştığı için mevcut algoritmalardan daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyon algoritmasının çeşitli çizelgeleme problemlerini çözmekte etkin bir yöntem olduğu söylenebilir.

Ghadim vd. (2012), çalışmasında parçacık sürüsü optimizasyonu ile hibrid bir algoritma geliştirerek problemde iki kriteri aynı anda en küçüüklemeyi hedeflemiştir. Bu tür hibrid yaklaşımlar, daha karmaşık problemlere etkili çözümler sunma açısından yüksek potansiyele sahiptir.

Dağ (2013) yaptığı çalışmada maksimum tamamlanma zamanı, toplam akış zamanı ve makinelerin toplam boş bekleme zamanının en küçüklenmesi çizelgeleme problemlerini ele almıştır. Çalışmasında karınca koloni algoritması kullanılmıştır. Karınca koloni algoritmasında değişiklikler yapılarak yeni durumun sonuca etkisi incelenmiştir. Başlangıç popülasyonu için klasik sıralama yöntemlerinden en kısa işlem süresine öncelik verme ve en uzun işlem süresine öncelik verme yöntemleri ele alınmıştır, başlangıç popülasyonunun rastgele olmasıyla karşılaştırılmıştır. Başlangıç popülasyonu olarak öncelik tanıma yöntemlerinin kullanılması, popülasyonun rastgele seçilmesine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Hong vd. (2013), bulanık teslim tarihlerinin dikkate alındığı paralel makine çizelgeleme problemine yönelik çalışmalarında, toplam gecikmelerin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, müşteri taleplerinin zamanında karşılanması ve erken teslimatın önlenmesi açısından önemli bulgular elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, toplam gecikmeleri

azaltmak üzere geliştirilmiş simüle tavlama algoritması uygulanmış ve etkin sonuçlar raporlanmıştır.

Oral (2014) çalışmasında n-iş ve m-makineli akış tipi iş çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemde makine sayısının fazla olması nedeniyle sezgisel yöntem ile çözülme yoluna gidilmiştir. İşlerin gecikme zamanının minimize edilmesi için oluşturulan çizelgeleme de karınca kolonisi algoritması kullanılmıştır. İlgili algoritma akış tipi iş çizelgeleme probleminin çözümünde uygulanabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Hassanein vd. (2014) yaptığı araştırmanın amacı, gerçek hayattaki atölye çizelgeleme problemini simüle etmek için varsayımlardan bazılarını gevşetebilecek bir simülasyon modeli oluşturmaktır. Atölye çizelgeleme problemi, güçlü anlamda tipik bir NP-zor problemdir. Literatürün atölye çizelgeleme problemi ile ilgili araştırmalarla dolu olmasına rağmen, sorunu gerçek hayat probleminden uzaklaştıran varsayımlar nedeniyle uygulayıcılar için bu araştırmaların etkinliğinin yeterli olmadığına değinmiştir. Atölye çizelgeleme problemine ait modeli simüle etmek için Arena Simülasyon programı kullanılmıştır. Farklı büyüklükteki 9 modelin hesaplama sonuçları incelendiğinde önerilen modelin hem etkili hem de verimli olduğunu gözlemlemiştir.

Koruca vd. (2014) çalışmasında Faborg-Sim simülasyon ile on öncelik kuralına sahip, kural tabanlı bir üretim planlama aracı geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu çalışmada bir örnek çalışma modellenmiştir ve Faborg-Simülasyon ile üretim sistemi değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, yalnızca seçilen altı öncelik kuralı için çalıştırılmıştır. Simülasyonlar, üretim çizelgesinin en iyi performansını elde etmek hedefiyle her öncelik kuralı için tekrar edilmiştir. Simülasyonlar tekrar edildikten sonra performans ölçütleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre simülasyonlar kullanıcıya karar verme fırsatı sunmaktadır.

Ma (2014) çalışmasında açık atölye çizelgeleme problemlerinin temel özelliklerinden birisi NP-zorlu bir problem olarak sınıflandırılmasıdır, bu nedenle tam çözüm yöntemleri yerine meta-sezgisel ve yerel çözümler üzerine odaklanmak daha yaygındır. Bu araştırmada, yapay zeka gibi modern yöntemlerin açık atölye çizelgeleme problemlerinin çözümünde nasıl başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Lakehal vd. (2015) çalışmalarında atölyeyi engelleyen iki kritere sahip iş atölyesi planlama problemi ele alınmıştır. Amaç aynı anda iki kriteri de en aza indirgemektir: üretim süresi ve maksimum gecikme kriterleridir. İki model önerilmiştir. Bunlardan biri, bir kriterin sınırlıyken en küçüklenmesinden oluşan tabu arama, ikincisi ise kriterlerin doğrusal birleşiminin en küçüklenmesine dayalı bir tabu aramasıdır. Operasyonların makinelere atamasını yapmak için öncelik kurallarına dayanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu çalışma atölye literatüründeki diğer çalışmalar içinde test edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Sharma vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki makine üzerinde n işin çizelgelendiği, iki kriterli bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Araştırmada, maksimum gecikmenin minimize edilmesi temel hedef olarak belirlenmiş; bu doğrultuda, çizelgeleme sürecinde maksimum gecikmeden kaynaklanan problemlerin kontrol altına alınması amaçlanmıştır. Geliştirilen iki kriterli yaklaşım, hem maksimum gecikmeyi hem de gecikmiş iş sayısını azaltmaya yönelik çözüm önerileri sunmaktadır.

Zahmani vd. (2015) çalışmalarında görev dağıtım öncelik kurallarını kullanarak İş Atölyesi Planlama Problemi ele alınmıştır. Üretim süresi optimizasyonuna yönelik simülasyon modeli, atölyedeki her makine için farklı öncelik kuralları kullanmayı önermiştir. Toplanan sonuçlar temel üretim modelini öğrenmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, her yeni çizelge için en iyi öncelik kurallarını seçeceğini belirleyen bir çıkarım modeli için oluşturmak hedeflenmiştir. Şimdiye kadar yapılan deneyler, birden fazla öncelik kuralı kullanmanın, şu ana kadar yapılan çalışmaların aksine, üretim süresinin önemli ölçüde azaltılabileceğini kanıtlar niteliktedir. Asıl amaç ise herhangi bir simülasyon yapılmadan hangi öncelik kuralının kullanılması gerektiğine önceki verilere dayanarak karar veren ve yanıt verme süresini aza indiren bir karar destek sistemi oluşturmaktır.

İş atölyesi planlama problemlerinde genellikle tamamlama süresi, ortalama akış süresi, maksimum gecikme, geciken işlerin sayısı vb. gibi dikkate alınan birden fazla çelişkili amaç vardır. Birçok çalışmada, hedefler ayrı ayrı ele alınır veya tek bir hedefte toplayıp problemi tek amaçlı bir optimizasyon haline getirip ele alırlar. Çok az sayıda çalışmada ise, çok amaçlı atölye çizelgeleme problemini iki veya üç hedefle çözmeye çalışmışlardır. Masood

vd. (2016) makalesinde, tüm hedefleri dikkate alan çok amaçlı atölye çizelgeleme problemi ile çalışılmaktadır. Çok amaçlı atölye çizelgeleme probleminin çözümü için, baskın olmayan çizelgeler oluşturabilen bir dizi ödünleşim kuralının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla genetik programlama ve baskın olmayan sıralama genetik algoritmasını-III (NSGA-III) entegre eden yeni hibrit bir algoritma önerilmiştir. Hibrit algoritmada genetik algoritmanın başlatma, değerlendirme ve evrimsel davranışlarından yararlanırken Baskın olmayan sıralama genetik algoritmasının seçim şemasından yararlanılmaktadır. Deneysel sonuçlar, yeni önerilen algoritmanın test edilen atölye örnekleri üzerinde etkin olduğunu göstermiştir.

Kaya vd. (2016) çalışmalarında, esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta-sezgisel yöntemler aracılığıyla çözümüne yönelik bir inceleme gerçekleştirmiştir. Çalışmada, uzun işlem süreleri ile daha kısa tamamlanma süreleri arasında doğrudan bir ilişki olduğuna dikkat çekilmiştir. Ayrıca, her bir işin üretim işlem süresi ile makine kullanımı daha etkin bir şekilde yönetilmesi durumunda, atölye verimliliğinin artabileceği vurgulanmaktadır.

Yazdani vd. (2017) çalışmasında bahsedilen maksimum erken ve gecikme kriterlerinin toplamı, atölye çizelgeleme problemi için yeni bir amaç fonksiyonudur. Yeni amaç fonksiyonu ile atölye çizelgeleme problemi için karma tam sayılı doğrusal programlama formülü oluşturuldu. İlgili model farklı problem boyutları için doğrulanan birden fazla deney tasarımı ile test edilmiştir. Bu zor problemin çözümünde etkili bir komşu arama algoritmasına dayanan yeni bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın etkinliği deneysel bir değerlendirme ile ölçülmüştür. Model farklı problem boyutları için test edilmiş ve 7 iş ve 7 makineden daha büyük problemler için çözüm bulamamıştır. Bu sorunu çözmek için, komşuluk aramasını kullanan yeni bir hibrit emperyalist rekabetçi algoritma (HICA) geliştirmişlerdir. Hibrit emperyalist rekabetçi algoritmasının iş atölyesi planlama probleminde en gelişmiş teknolojiden daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemin farklı sayıda iş ve makine problemlerinde değerlendirilmesi sonucu, hibrit emperyalist rekabetçi algoritmasının farklı problem boyutlarında iyi performansı koruduğu gözlemlenmiştir.

Arık vd.(2018) çalışmasında bulanık bozulma ve öğrenme etkileri altındaki tek makine çizelgeleme problemlerini inceleyerek, ağırlıklı erken/geç tamamlanma maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan özgün bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışma, öncelik kurallarının optimize edilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmakta olup, belirsizliklerin ve değişken parametrelerin çizelgeleme sistemleri üzerindeki etkilerini dikkate alarak daha esnek ve uyarlanabilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Kaya vd. (2018) çalışmasında, esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde meta-sezgisel yöntemlerin uygulanmasını incelemektedir. Bu çalışma, öncelik kurallarının belirlenmesinin ve modele entegre edilmesinin sistemin verimliliği üzerindeki etkilerini vurgulayarak, çok sayıda olası çözümün algoritmalar aracılığıyla nasıl değerlendirileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür yaklaşımlar, kaynakların en etkin şekilde kullanılmasını ve bunun sonucunda probleme ait gecikmelerin minimize edilmesini hedeflemektedir.

Sel vd. (2018), makalesinde simülasyon tabanlı optimizasyon yaklaşımları kapsamında dinamik atölye çizelgelemesi için çeşitli çizelgeleme kuralları geliştirmiştir. Bu çalışmada, en uzun işlem süresini en küçüklemeye yönelik simülasyon senaryoları oluşturulmuş ve senaryolar aracılığıyla işlem sürelerinin etkin biçimde azaltılabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca, işlerin uygun bir sırayla planlanmasının toplam işlem süresini önemli ölçüde kısaltabileceğini vurgulamıştır.

Chen vd. (2019) makalesinde, iş atölyesi planlama problemini çözebilmek için Geliştirilmiş Yarasa Algoritması önerilmiş ve erken yerel optimuma yakınsamanın etkili bir şekilde önlenmesi amaçlanmıştır. Yarasa algoritması, parçacık sürü algoritması ile karşılaştırıldığında model için çalıştırılan simülasyon sonuçları, geliştirilmiş yarasa algoritmasının üretim süresini en aza indirmede ve en iyi çözümü bulma konusunda etkili olduğu gözükmektedir.

Toksarı vd.(2019) çalışmasında maksimum tamamlanma sürelerinin ve reddetme maliyetlerinin minimize edilmesi hedefine odaklanmıştır. Bunun gibi çoklu amaç fonksiyonlarının bir arada ele alınması, özellikle üretim planlama süreçlerinde zamanlama konularında yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Vazan vd. (2019) çalışmasında, operasyonların planlanması ve seçilen öncelik kurallarının üretim hedefleri üzerindeki etkisini ortaya koyan bir çalışmanın sonucunu sunmaktadır. Öncelik kurallarının etkisi, esnek üretim sistemine sahip yerler için simülasyon model ile incelenmiştir. Bu problemler atölye çizelgeleme problemleri olarak nitelendirilir. Çalışma, seçilen beş öncelik kuralının ilk giren ilk çıkar (FIFO), en erken teslimat tarihi (EDD), teslim tarihine kadar kalan süre (STR), işlem başına kalan boş zaman (STR/OP) ve bir sonraki operasyonda en kısa kuyruk (SQNO) üretim hedefleri üzerine etkilerini ele almaktadır. Uygulanan öncelik kuralının etkisi farklı bir üretim sisteminde incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi operasyonların planlanmasında bu öncelik kurallarının gerçek hayat problemlerinde kullanıma yardımcı olur.

Küpeli vd. (2020) çalışmalarında, dağıtık permütasyon akış tipi çizelgeleme problemlerini ele almış ve bu kapsamda maksimum tamamlanma süresinin en küçüklenmesine odaklanmışlardır. Çalışmada, doğadaki arıların besin arama davranışını temel alan Yapay Arı Koloni Algoritması kullanılmış, işlerin birden fazla fabrika arasında dağıtıldığı senaryolar değerlendirilmiştir. Söz konusu yaklaşım, maksimum zaman aşımlarını azaltarak üretim sistemlerinde genel verimliliğin artırılmasını hedeflemektedir.

Olgun vd. (2020) çalışmasında geliştirilen sistem sayesinde firmalar farklı öncelik kurallarına ilk giren ilk çıkar (FIFO), en kısa işlem süresi (SPT), en uzun işlem süresi (LPT) göre hazırlanan çizelgeleri kolayca kıyaslayıp, uygulayabilecektir. Program dört farklı yönteme göre kıyaslama yaparak en uygun olanı seçip, makine ataması yapmıştır. Uygulama sonucunda siparişler için en iyi atamaların, işlem süresi en uzun olan işlem görür yöntemiyle elde edildiği gözlemlenmiştir.

Ojstersek vd. (2020) makalesinde çok amaçlı esnek iş atölyesi planlama probleminde (FJSSP) evrimsel hesaplama yöntemleriyle son teslim tarihi optimizasyon parametresinin belirlenmesi için matematiksel yöntemlerin entegrasyonunun önemini vurgulamıştır. Teslim tarihi optimizasyonunun matematiksel modellenmesinde boş zaman ve toplam iş içeriğinin kullanımı, çok amaçlı sezgisel Kalman algoritmasına (MOHKA) entegre edilmiştir. Kalman algoritması ile ürün üretim süresi, makine kullanımı ve teslim tarih planlamasının çok

amaçlı optimizasyon sonuçları, algoritmayla karşılaştırıldı. Atölye çizelgeleme modeline göre hazırlanan optimizasyon sonuçlarının geleneksel öncelik kurallarına göre yapılan üretim sonuçları karşılaştırılmıştır. Kalman algoritmasının çözümleri ile geleneksel öncelik kurallarının çözümlerini karşılaştırmak amacıyla Kalman optimizasyon sonuçlarının Lekin yazılım ortamında iş planlama sonuçlarıyla karşılaştırılması yapıldı. Optimizasyon, MATLAB yazılım ortamında Kalman optimizasyon algoritması ve Lekin yazılım ortamında yedi optimizasyon yaklaşımı ile gerçekleştirildi. Yedi optimizasyon yaklaşımından altısı geleneksel öncelik kurallarıdır ve biri genel değişen darboğaz rutini (GSBR) adı verilen sezgisel bir algoritmadır. Sonuçlar, Kalman optimizasyon algoritması tarafından üretim işlerinin planlanmasının yüksek düzeyde güvenilir olduğunu göstermektedir. Kalman algoritmasının sonuçlarına kısmen yaklaşan tek algoritma, sezgisel genel değişen darboğaz rutini algoritmasıdır.

Saraç vd.(2020) çalışmalarında iki kriterli çok amaçlı permütasyon akış tipi çizelgeleme problemini ele almış ve toplam tamamlanma süresi ile toplam gecikme sürelerini minimize etmeyi amaçlayan bir askın olmayan sıralama genetik algoritmasını-II (NSGA-II) önermektedirler. Bu tür yaklaşımlar, problemlerin çözümünde önemli bir esneklik sağlamaktadır. Özellikle, işlerin önemini dikkate alan modellerin oluşturulması, öncelik kurallarının ve gecikme ile erken teslimat sürelerinin en düşük seviyeye çekilmesine olanak tanımaktadır.

Romanuke (2020; 2021) çalışmalarında, tek makine kullanılan atölyede gecikmelerin etkin bir şekilde yönetilmesine yönelik sezgisel yöntemler geliştirmiştir. Bu kapsamda, ağırlıklı toplam gecikmenin minimize edilmesi temel hedef olarak belirlenmiş ve farklı öncelik ağırlıkları dikkate alınarak çok kriterli çizelgeleme problemlerine yönelik sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda çeşitli öneriler sunulmuş ve söz konusu yaklaşımların, maksimum gecikmelerin azaltılmasında pratik ve uygulanabilir çözümler sunduğu açıkça ortaya konmuştur.

Červeňanská vd. (2021) çalışmalarında çok kriterli karar verme ile seçilen beş farklı birbiriyle çelişen üretim hedefinin belirli öncelik kuralları simule edilerek optimize

edilmesini değerlendirmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre en erken teslimat tarihi (EDD) ve teslim tarihine kadar kalan süre (STR) öncelik kuralları ilk giren ilk çıkar (FIFO) kuralından daha iyi performans göstermiştir.

Zarif vd. (2021) makalesinde, dinamik atölye çizelgeleme probleminde üretim süresini en aza indirmek için Levy uçuş algoritmasına (CMABCLA) sahip yeni bir yapay arı kolonisi optimizasyonu önerilmektedir. Bu çalışmada ele alınan dinamik durumlar makine arızaları, rastgele iş gelişleri ve işlem süresi değişkenleridir. Dinamik iş atölyesi planlama, NP-zor kombinatoryal optimizasyon problemidir. Bu algoritmada gerçek durum için yakın bir tahmin yapmaktadır. Ayrıca mevcut sistemde yapılan bir değişiklik sonrasında önceki sistem bilgileri kullanılarak yeni sistemin hızlı adaptasyonunu sağlamıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini incelemek için Moving Peaks Benchmark kullanılmıştır. Deney sonuçları, önerilen yöntemin birçok algoritmaya karşı üstünlüğünü kanıtlanmıştır.

Son yıllarda yapılan paralel makine çizelgeleme çalışmaları, yalnızca işlerin hangi kaynaklarla gerçekleştirileceğini belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda önceliklerin nasıl belirleneceğine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Dikmen vd. (2023) çalışmasında paralel makine çizelgeleme problemlerinde farklı performans kriterleri altında mevcut çözüm yöntemlerini detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, işlerin önceliklendirilmesi ve kaynak kullanımının etkin bir biçimde optimize edilmesi sayesinde, hem gecikmelerin hem de erken teslimatların kontrol altına alınmasına olanak sağlamıştır.

İpek vd. (2025) makalesinde, dinamik iş atölyesi planlamasında teslim tarihi belirleme yöntemlerine alternatif olarak daha iyi sonuçlar ürettiği düşünülen bir yapay sinir ağı yaklaşımı sunmuş ve uygulanabilirliği gösterilmiştir. Farklı öncelik kuralları altında yapay sinir ağları çeşitli performans ölçütleri açısından incelenmiş ve en kısa işlem süresi ile en erken teslim tarihi öncelik kurallarının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Literatürde yer alan atölye çizelgeleme problemi ile ilgili çalışmalar incelenip Çizelge 2.1'de çözüm yöntemlerine göre sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1 Matematiksel ve sezgisel yöntemler kullanılan çalışmalar

Yöntem Türü	**Çalışma**	**Yıl**	**Yöntem**
Matematiksel Yöntemler	Sharma vd.	2015	Paralel makinelerdeki işlerin en uygun sırasını bulan model
	Kaya vd.	2016	Makine atama, operasyon sıralama
	Yazdani vd.	2017	Karma tam sayılı doğrusal programlama, HICA
	Arık vd.	2018	Karma tam sayılı doğrusal olmayan bulanık programlama
	Toksarı vd.	2019	Atama problemi
	Dikmen vd.	2023	Karma tamsayılı programlama modeli
Sezgisel Yöntemler	Abdullah	2004	Açgözlü algoritma, yerel arama
	Guo vd.	2006	Evrensel matematiksel model, genetik optimizasyon
	Pongchairerks	2009	Geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu
	Low	2009	Genetik algoritma
	Ghadim vd.	2012	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
	Dağ	2013	Karınca koloni algoritması
	Oral	2014	Karınca kolonisi algoritması
	Hassanein vd.	2014	Arena simülasyon programı
	Koruca vd.	2014	Faborg-Sim simülasyon ve öncelik kuralları
	Ma	2014	Meta sezgisel yöntemler, yapay zeka
	Lakehal vd.	2015	Tabu arama yöntemleri
	Zahmani vd.	2015	Simülasyon modeli ve öncelik kuralları
	Masood vd.	2016	Genetik programlama, NSGA-III
	Hong vd.	2018	Simüle edilmiş tavlama algoritması
	Kaya vd.	2018	Meta sezgisel yöntemler, yerel arama, çok amaçlı optimizasyon
	Sel vd.	2018	Simüle edilmiş tavlama algoritması, öncelik kuralları
	Chen vd.	2019	Geliştirilmiş yarasa algoritması
	Vazan vd.	2019	Simülasyon modeli ve öncelik kuralları
	Olgun vd.	2020	Farklı öncelik kuralları ile makine ataması
	Küpeli	2020	Yapay arı kolonisi optimizasyonu
	Saraç vd.	2020	Genetik programlama, NSGA-II
	Ojstersek vd.	2020	Çok amaçlı sezgisel kalman algoritması
	Romanuke	2020, 2021	Ağırlıklı toplam gecikmenin minimize edildiği model, öncelik ağırlıkları
	Zarif vd.	2021	Levy uçuş algoritması, yapay arı kolonisi optimizasyonu
	Červeňanská vd.	2021	Simülasyon modeli, öncelik kuralları
	İpek vd.	2025	Yapay sinir ağları, öncelik kuralları

Matematiksel ve sezgisel modeller, atölye çizelgeleme problemleri gibi birçok karmaşık problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır ve her iki yaklaşımın da kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Matematiksel modeller, doğrusal programlama, karma tam sayılı programlama ve dinamik programlama gibi yöntemler aracılığıyla problemleri kesin ve teorik olarak doğru çözüme ulaştırma yeteneğine sahiptir. Bu modeller, belirli kısıtlara dayalı olarak optimal veya alt-optimal çözümler sunabilmektedir. Ancak, matematiksel modellerin dezavantajları arasında, büyük ve karmaşık problemler için yüksek maliyetler ve kısıtlayıcı varsayımlar yer almaktadır.

Bu durum, gerçek dünyadaki belirsizlikler ve dinamik koşullar karşısında modellerin uygulanabilirliğini ve esnekliğini sınırlamaktadır.

Sezgisel modeller ise, daha hızlı ve esnek çözümler sunan yöntemler olarak ön plana çıkmakta ve tercih edilmektedir. Genetik algoritmalar, tabu arama, parçacık sürü optimizasyonu ve karınca koloni algoritması gibi sezgisel yöntemler, büyük ve karmaşık problemlerde kısa sürede uygun çözümler sunabilmektedir. Ayrıca, bu yöntemler değişken ve belirsiz koşullarda iyi uyum sağlama yeteneğine sahiptir. Buna karşın, sezgisel modeller optimal çözümleri garanti etmez ve genellikle yerel optimum sonuçları sunma riski taşımaktadır. Optimalin aranmadığı, iyi bir sonucun yeterli olduğu büyük ölçeklim problemlerin ele alındığı senaryolarda başarılı sonuçlar sunabilmektedir. Bu yöntemlerin performansı, parametrelerin doğru şekilde seçilmesine bağlıdır ve bu durum parametrelerin doğru seçilmesi konusunda ayrıca bir optimizasyon süreci gerektirebilir.

Sonuç olarak, matematiksel modeller kesinlik ve teoriye dayalı çözümler sunarken, sezgisel modeller pratikte hız ve esneklik gerektiren problemlerde uygun çözümler sağlamaktadır. Bu bağlamda, karmaşık ve büyük ölçekli problemler için her iki yaklaşım da, problem karakteristiğine göre etkili çözümler sunabilmektedir.

2.2. Atölye Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Atölye çizelgeleme, üretim süreçlerinde işler ve makineler arasındaki ilişkilerin en verimli şekilde düzenlenmesi amacıyla yapılan planlama işlemlerini ifade eder. Pinedo (2012), kitabında atölye çizelgeleme problemlerini şu şekilde sınıflandırmaktadır:

2.2.1. İş Atölye Çizelgeleme Problemi (JSSP)

İş atölye çizelgeleme problemi, her işin sırasıyla bir dizi işleme tabi tutulduğu bir üretim modelidir. Her işin her aşaması, belirli bir makine üzerinde gerçekleştirilmelidir. Bu tür problemler genellikle esneklikten yoksundur ve çok sayıda makine ile işleme sıralamalarının optimize edilmesi gereklidir. JSSP, NP-zor bir problem olup, çözüm genellikle sezgisel veya

meta-sezgisel yöntemlerle yapılır. Hedef, tüm işler tamamlandığında geçen çevrim süresini en küçüklemektir.

2.2.2. Akış Tipi Çizelgeleme Problemi (FSSP)

Akış tipi çizelgeleme probleminde, her iş belirli bir sıraya göre makinelerden geçer. Yani tüm işler, aynı makine sırasını takip eder. Bu modelde makineler arasındaki işlem sırası sabittir, ancak her işin her aşaması için belirli bir makine gereklidir. FSSP, daha az karmaşık bir problem olup, çözümü genellikle çevrim süresini minimize etmeye yönelik yapılır.

2.2.3. Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi (FFSSP)

Esnek akış tipi, akış tipi çizelgeleme modelinin daha esnek bir versiyonudur. Bu modelde makineler arasındaki işlem sırası esnektir ve her iş farklı alternatif makinelerde işlenebilir. Bu esneklik, çözüm alanını genişletir ve daha karmaşık algoritmalar gerektirir. Amaç genellikle çevrim süresini minimize etmek veya diğer hedefleri optimize etmektir.

2.2.4. Hibrid Akış Çizelgeleme Problemi (HFSSP)

Hibrid Akış, Akış Tipi ve Esnek Akış Tipi modellerinin birleşimidir. Bu modelde bazı makineler arasındaki işlem sıralamaları sabitken, diğer makinelerde alternatif işleme sıraları bulunmaktadır. HFSSP, her iki modelin zorluklarını taşır ve daha esnek, karmaşık çözüm yöntemleri gerektirir. Çözüm, genellikle karmaşık algoritmalar ve optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılır.

2.2.5. Tek Makine Çizelgeleme Problemi (SMSP)

Tek Makine Çizelgeleme problemi, yalnızca bir makinenin bulunduğu sistemlerde işlerin sıralanmasını konu alır. Diğer çizelgeleme problemlere kıyasla daha basit olup, her işin

yalnızca bir makinede işleme alınacağı durumları ifade eder. Çözüm, işlerin sıralanması ve zamanlaması üzerine yoğunlaşır ve hedef genellikle işlerin tamamlanma süresini minimize etmektir.

2.2.6. Paralel Makine Çizelgeleme Problemi (PMSP)

Paralel Makine Çizelgeleme problemi, birden fazla paralel makinenin bulunduğu sistemlerde işlerin nasıl dağıtılacağını optimize etmeye yönelik bir problemdir. Bu tür problemler, makineler arasındaki yük dengelemesini sağlamayı hedefler. Çözüm, makineler arasında eşit yük dağılımı yaparak çevrim süresini en küçüklemektir.

2.2.7. Açık Atölye Çizelgeleme Problemi (OSSP)

Açık atölye çizelgeleme probleminde, makineler arasındaki işlem sırası tamamen esnektir. Her işin işleme sırası özgürdür ve belirli bir sıralama yoktur. Bu tür problemler, yüksek esneklik sunduğu için çözümü karmaşık olabilir. Ancak esneklik bazı durumlarda çözümün bulunmasını kolaylaştırabilir. Amaç genellikle çevrim süresini minimize etmek olsa da başka hedefleri optimize etmekte olabilir.

2.2.8. Çok İşlemli Görev Çizelgeleme Problemi (MPTSP)

Çok İşlemli Görev Çizelgeleme problemi, birden fazla makinenin olduğu sistemlerdeki görevlerin nasıl çizelgeleneceğini ifade eder. Bu tür problemler, görevlerin işlemciler arasında nasıl dağıtılacağına ve her görev için en uygun makine ile işleme süresine karar verilmesini gerektirir.

2.2.9. Çok Amaçlı Çizelgeleme Problemleri

Çok Amaçlı Çizelgeleme problemleri, birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesini gerektiren problemlerdir. Örneğin, bir işin tamamlanma süresi minimize edilirken, makineler

arasındaki yük dengelemesi veya enerji tüketimi de optimize edilebilir. Bu tür problemlerde farklı hedefler arasında denge kurmak ve çok sayıda hedefi optimize etmek amaçlanır.

2.2.10. Stokastik Çizelgeleme Problemleri

Stokastik Çizelgeleme problemleri, belirsizliklerin ve rastgeleliğin etkili olduğu çizelgeleme problemlerdir. Örneğin, makinelerin arızalanması veya işleme sürelerindeki belirsizlikler, çizelgeleme sürecini etkileyebilir. Bu tür problemlerde, belirsizliklerin azaltılması ve güvenilir bir çizelgeleme yapılması hedeflenir.

2.2.11. Dinamik Çizelgeleme Problemleri

Dinamik Çizelgeleme problemleri, zamanla değişen koşullar altında çözülmesi gereken problemlerdir. Örneğin, makinelerin arızalanması veya sisteme yeni işlerin dinamik olarak girmesi gibi faktörler zaman içinde değişebilir. Bu tür problemlerde çözüm, sürekli değişen verilere göre yapılması gereken çizelgeleme işlemlerini ifade eder.

Çizelge 2.2'de araştırılan makalelerin Pinedo (2012) kitabındaki sınıflandırmaya uygun şekilde sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.2 Atölye çizelgeleme problemi türlerine göre sınıflandırılmış makaleler

Akademik Çalışmalar	**Yazarlar**	**Yıl**
İş Atölye Çizelgeleme Problemi		
The job shop scheduling problem	Abdullah	2004
Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry	Guo	2006
Particle swarm optimization algorithm applied to scheduling problems	Pisut	2009
Solving the Job-Shop Scheduling Problem by Arena Simulation Software Productivity View project Solving the Job-Shop Scheduling Problem by Arena Simulation Software	Hassanein	2013
A Priority Rule Based Production Scheduling Module On Faborg-Sim Simulation Tool	Koruca	2014
Bi-Criteria Scheduling on Parallel Machines under Fuzzy Processing Time	Sharma vd.	2015
An Improved Bat Algorithm for Job Shop Scheduling Problem	Chen vd.	2019
Bir Metal Fabrikası İçin İş Çizelgeleme Yazılımı Hazırlanması	Olgun vd.	2020
Akış Tipi Çizelgeleme Problemi		
An Application on Flow Shop Scheduling	Dağ	2013
Karınca Kolonisi Algoritması İle Akış Tipi İş Çizelgeleme	Oral	2014
Çok Amaçlı Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemi İçin Bir NSGA-II Algoritması	Saraç vd.	2020
Dağıtık Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Yapay Arı Koloni Algoritması İle Çözümü	Küpeli vd.	2020
Öncelik Kuralları Bazlı Atölye Çizelgeleme		
New Algorithm of Scheduling Based on Priority Rules on Machines to Solve Bi-Criteria Blocking Job Shop Scheduling Problem	Lakehal	2015
Multiple Priority Dispatching Rules for the Job Shop Scheduling Problem	Zahmani	2015
The Impact of Selected Priority Rules on Production Goals	Vazan	2019
Esnek Akış Tipi Atölye Çizelgeleme Problemi		
Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik bir inceleme	Kaya vd.	2016
Multi-criteria optimization in operations scheduling applying selected priority rules	Cerveňanská	2021
Due date optimization in multi-objective scheduling of flexible job shop production	Ojstersek	2020
Çok Amaçlı Çizelgeleme Problemi		
Using Improved Particle Swarm Optimization to Solve Open Shop Scheduling Problem with Two Criteria	Ghadim vd.	2012
Many-Objective Genetic Programming for Job-Shop Scheduling	Masood	2016
Optimising the Sum of Maximum Earliness and Tardiness of the Job Shop Scheduling Problem	Yazdani	2017
Under Position Dependent Learning and Nonlinear Deterioration Effect on a Single Machine Scheduling Problem with Job Rejection	Toksarı vd.	2019
Dinamik Atölye Çizelgeleme Problemi		
A simulated annealing approach based simulation-optimisation to the dynamic job-shop scheduling problem	Sel vd.	2017
Chaotic Multi-population ABC Algorithm Based on Memory and Levy Flight for Solving Dynamic Job Shop Scheduling Problems	Zarif	2021
Due Date Determination in Dynamic Job Shop Scheduling with Artificial Neural Network	İpek vd.	2025
Tek Makine Çizelgeleme Problemi		
Bulanık bozulma ve öğrenme etkileri altında tek makine erken/geç tamamlanma probleminin bulanık şans kısıtlı programlama tekniği ile incelenmesi	Arık vd.	2018
Tight-Tardy Progressive Idling-Free 1-Machine Preemptive Scheduling by Heuristic's Efficient Job Order Input	Romanuke	2020
A Sorting Improvement in the Heuristic based on Remaining Available and Processing Periods to Minimize Total Tardiness in Progressive Idling-Free 1-Machine Preemptive Scheduling	Romanuke	2021
Paralel Makine Çizelgeleme Problemi		
Parallel Machine Scheduling with Fuzzy Due Date Using Improved Simulated Annealing in Lean Production	Hong vd.	2013
Farklı performans kriterleri altında paralel makine çizelgeleme problemi	Dikmen vd.	2023
Açık Atölye Çizelgeleme Problemi		
Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Scheduling Problems	Pongchairerks	2009
Genetic Algorithm-Based Heuristics for an Open Shop Scheduling Problem with Setup, Processing, and Removal Times Separated	Low vd.	2009
The Similar Algorithm Research of Concurrent Open-Shop Scheduling	Ma	2014

2.3. Literatüre Katkı

Literatürde atölye çizelgeleme problemi, çeşitli sektörlerde ve farklı uygulama alanlarında sıklıkla ele alınmış olup, özellikle farklı dinamiklere sahip üretim sistemleri için birçok farklı çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Literatürde incelenen çalışmalardan elde edilen izlenime göre, problem boyutu bu çalışmaya göre nispeten küçük atölye çizelgeleme problemlerine rastlanmıştır. Bu çalışmada havacılık sektörüne özgü uzun-karmaşık rotalı parçalar ve model boyutunun büyük olduğu üretim süreçlerine sahip atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan matematiksel modelde öncüllük ardıllık kısıtları ve operasyon çakışmalarını önleyici kısıtların literatürdeki benzer çalışmalardan farklı kurgulanmış olması modele ayrıca özgünlük katmaktadır.

Bu çalışmada parçaların üretim süreçlerinin karmaşıklığı, çizelgeleme probleminin çözümünde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu doğrultuda geliştirilen matematiksel model, sadece üretim sırasının optimizasyonunu değil, aynı zamanda parçaların teslimat zamanlarına uygun şekilde ele alması gibi zaman odaklı performans kriterlerini de gözetmektedir. Çalışmada, birden fazla amaç fonksiyonu ayrı ayrı ele alınıp kıyaslanmış, sistemin önceliklerine göre hangi yaklaşımın daha etkin olduğu değerlendirilmiştir. En büyük gecikme/erken teslimat süresinin en küçüklenmesi ve toplam bitiş zamanlarının en küçüklenmesi olmak üzere iki temel amaç fonksiyonu üzerinden yapılan karşılaştırmalar sayesinde, farklı öncelik kurallarının performans kriterleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Literatürde her iki amaç fonksiyonunun ayrı ayrı ele alındığı çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, bu fonksiyonların öncelik kurallarıyla ilişkilendirilerek aynı çalışma kapsamında karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmesine yönelik örneklere oldukça sınırlı sayıda rastlanmaktadır. Ayrıca, mevcut problemin karmaşıklığı dikkate alındığında, bu düzeyde operasyon içeren ve kısıtların literatürde incelenen çalışmalardan farklı bir yapıda kurgulanmasıyla matematiksel modelin oluşturulması ve çözüm sonuçlarının analiz edilmesi, çalışmanın özgünlüğünü ve literatüre olan katkısını artırmaktadır. Uzun bir planlama dönemine hizmet eden matematiksel bir formülasyon önermesi de oldukça önemlidir.

Bu yönüyle söz konusu çalışma, hem havacılık sektörüne özgü üretimin çizelgelenmesi noktasında bir bakış açısı sunmakta hem de öncelik kurallarının performans etkilerini analiz eden yöntemsel bir katkı sağlamaktadır.

3. PROBLEM TANIMI VE MODEL

Atölye tipi üretim sistemlerinde, üretilen parçaların nihai ürün haline gelebilmesi için ardışık bir dizi işlemin belirli önceliklerle yapılarak tamamlanması gerekmektedir. Bu çalışmada farklı rotalara sahip çok sayıda parçanın aynı atölye tipi üretim sisteminde üretilmesi ele alınmaktadır. Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde parça rotaları, makine ve zaman kısıtları göz önünde bulundurulduğunda teslimat takvimini yönetmek zor hale gelmekte ve teslimat takvimine uyma amacından uzaklaşılabilmektedir. Üretim atölyelerinde, parçaların belirli işlemlerinin belirli makinelerde farklı öncelik kurallarına göre çizelgeleme çalışmaları yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise farklı parçaların tamamlanma zamanının, teslimat zamanına göre olan gecikmelerden en büyük olanının minimize edilmesi ve toplam üretim sürelerinin minimize edilmesi olmak üzere iki farklı amaç fonksiyonuyla ele alınan sistem en iyi şekilde çizelgelenmeye çalışılmıştır. İki amaç fonksiyonu için sonuçlar değerlendirilmiştir.

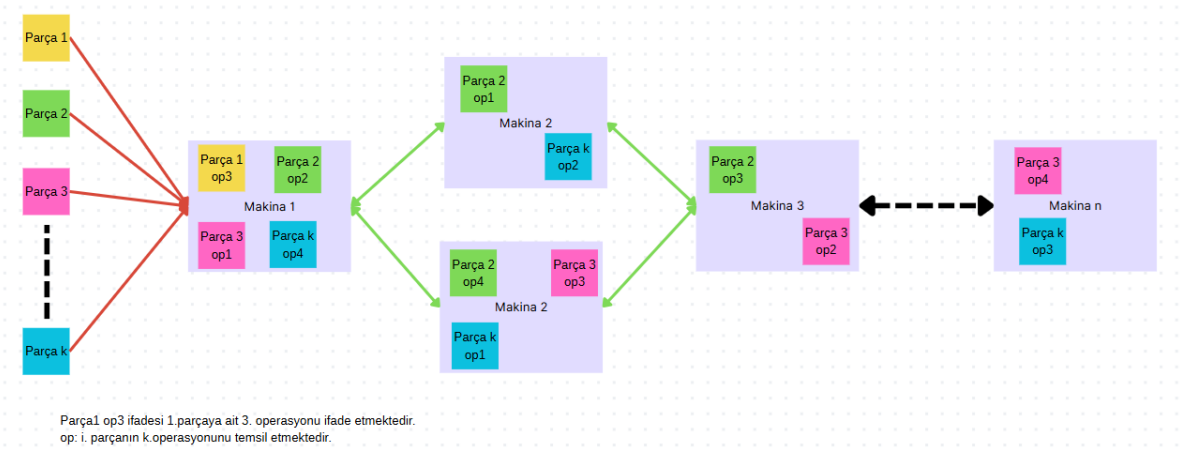
3.1. Problem Karakteristikleri ve Model Varsayımları

Hemen her sektörde gerçekleştirilen projelerde, müşteri ile ortak belirlenmiş teslimat takvimlerini yönetmeye çalışmak oldukça zordur. Proje dinamiğine göre değişkenlik gösteren kısıtlar devreye girdiğinde teslimat takvimini yönetmek daha da zorlaşmaktadır. Modelin uygulama çalışmasının yapıldığı havacılık sektöründe kalitenin üst düzey tutulmaya çalışıldığı kritik parça üretimiyle beraber müşteri taleplerinin zamanında yerine getirilmeye çalışılması teslimat takviminin yönetimi daha da önemli hale gelmektedir.

Çok sayıda havacılık parçasının farklı makinelere uğrayarak, farklı rotalardan geçerek nihai ürün haline gelmesi de atölye çizelgelemesini zorlaştıran bir unsurdur. Havacılık sektöründe uygulaması yapılacak atölye çizelgeleme probleminin çözümü için makine kapasite kısıtları altında maksimum gecikme zamanlarını minimize etmek ve toplam üretim sürelerinin minizime edildiği iki amaç fonksiyonuna hizmet etmek üzere bir matematiksel model

oluşturulacaktır. Oluşturulan model iki farklı amaç fonksiyonu ile çözdürülecek ve farklı öncelik kurallarında amaç fonksiyonlarının nasıl davrandığı karşılaştırılacaktır.

Bu kapsamda, ele alınan problemdeki üretim sürecine ait akış diyagramı Şekil 3.1' de yer almaktadır. Parçaların ilk operasyonları birbirinden farklı olduğu için farklı makinelerde başlamaktadır. Parça rotasına göre farklı rotalarda tüm makineleri dolaşarak parçaların son ürün haline geldiği görülmektedir. Aynı işlemi yapabilen birden fazla makine olabileceği gibi tek bir makine de olabilir. Bir parça rotası boyunca aynı makineyi birden fazla ziyaret edebilmektedir. Örneğin Şekil 3.1'de Parça 2'nin rotasına bakıldığında aynı makineyi farklı zaman ve farklı operasyonlar için birden fazla kez kullandığı görülmektedir.



Şekil 3.1 Üretim süreci akış diyagramı

Ele alınan üretim sürecinin kısıtları dikkate alındığında, oluşturulacak matematiksel model için varsayımlar aşağıda yer almaktadır.

- Çalışmada, iki farklı amaç fonksiyonundan bahsedilecektir. Bu amaç fonksiyonları teslimat takvimine göre toplam gecikmenin en küçüklenmesi ve toplam üretim sürelerinin en küçüklenmesidir. İlk amaç fonksiyonu, teslimat takvimine uyum sağlanabilmesi için toplam gecikmenin minimize edilmesini hedeflemektedir; bu sayede müşteri memnuniyeti artırılmakta ve zamanında teslimat sağlanmaktadır. İkinci amaç fonksiyonu ise üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak toplam üretim

sürelerinin minimize edilmesini amaçlamakta olup, böylece maliyetlerin düşürülmesi ve kaynak kullanımının daha verimli hale getirilmesi sağlanmaktadır.

- Herhangi bir parça için üretim rotası birbiri ardına gerçekleşen sıralı operasyonlardan oluşmaktadır ve öncül olan işlem yapılmadan ardıl işlemin yapılamayacağı varsayılmaktadır.

- Her parçanın her bir makinede geçirdiği operasyon süreleri farklıdır ve iş analizi yöntemiyle hesaplandığı varsayılmıştır. Parçalara ait operasyonlar ve operasyon sürelerinin deterministik olduğu kabul ve sürelerde sapma olmadığı varsayılmıştır.

- Makineler için yapılan periyodik bakım, arıza ve insan kaynaklı duruş süreleri modele dahil edilmemiştir. Ayrıca, bir parçanın bir makinedeki operasyonu başladığında parçanın ilgili makinedeki işlemi tamamlanıncaya kadar kesintiye uğramayacağı varsayılmıştır.

- Makinelerin kapasitelerinin sabit olduğu ve fazla mesai gibi kapasiteyi artıran durumların olmadığı varsayılmıştır.

- Yarı mamül durumunda olan parçalar bir sonraki operasyon için makine boş duruma gelinceye kadar makine önündeki sırada beklemektedir. Makine önünde işleme alınmayı bekleyen yarı mamül parçalar için depolama problemi yoktur ve problem bu varsayımla ele alınmıştır.

- Bir parça tüm üretim sürecinde rotası boyunca aynı makineye birden fazla kez uğrayabilmekte ve aynı makinede farklı işlemler gerçekleştirebilmektedir. Yalnızca aynı makinede yapılabilen farklı operasyonlarda öncüllük ve ardıllık durumu önemlidir. Öncül operasyon yapılmadan ardıl operasyon yapılamaz.

- Herhangi bir parça için üretim rotası birbiri ardına gerçekleşen sıralı operasyonlardan oluşmaktadır. Parçaların rotası gereğince öncüllük ve ardıllık kuralları yer almaktadır ve öncül olan operasyon gerçekleştirilmeden ardıl operasyonunun gerçekleştirilmeyeceği varsayılmıştır.

- Her parçanın ilgili makinedeki operasyonuna başlamadan önce ilgili operasyona uygun makine kurulumu yapılması gerekmektedir. Tüm parçaların operasyonları birbirinden bağımsızdır. Ayrıca, her makinede her parçaya ait makine kurulum süreleri farklıdır. Ancak makinelerdeki bu kurulum süreleri önceki parçadan ve önceki işlemden bağımsız olduğu için makine kurulum sürelerinin parçaların operasyon sürelerine dahil edildiği varsayılmıştır.

- Bazı makinelerde parçalar partiler halinde işleme alındığı için operasyon süresi parça sayısı arttıkça değişkenlik göstermeyecektir bu nedenle sabit alınmıştır. Örneğin bir partide 12 parça 3 saatte üretilebiliyorsa kapasitenin altında parça geldiğinde de çalıştırılabilir fakat partinin üretim süresi parça sayısından bağımsız şekilde sabittir.

3.2. Model Kurgusu

Çalışmada ele alınan problem, varsayımlar bölümünde tanımlanan durumlar çerçevesinde matematiksel olarak modellenmiştir. Bu kapsamda, ilgili parametreler ve karar değişkenleri tanımlanıp, ilgili kısıtlar oluşturularak probleme özgü matematiksel model yapılandırılmıştır.

3.2.1. Karar Değişkenleri ve Parametreler

Matematiksel modelde her $i \in I = \{1, 2, 3, \ldots, |I|\}$ parametresi parça indisini göstermektedir. Her $j \in J = \{1, 2, 3, \ldots, |J|\}$ makine indisini ifade etmektedir. Her $i \in I$ parçasının rotası $K_i = \{1, 2, 3, \ldots, |K_i|\}$ operasyon indislerinden meydana gelmektedir ve $k \in K_i$ ile ifade edilmektedir. n_i ise *i.* parçaya ait üretim talep miktarını göstermektedir. D_i ifadesi *i.* parçanın teslimat zamanıdır. C_j ifadesi *j.* makinenin süre cinsinden kapasitesidir. P_{ijk} ifadesi *i.* parçanın *k.* operasyonunun *j.* makinede işlem süresidir. y_{ijk} ikili ifadesi *i.* parçanın *j.* makinede *k.* operasyonun yapılabilirliğini temsil etmektedir. 0 değeri ilgili makinede operasyonun yapılamadığını gösterirken, 1 değeri ise makinede operasyonun yapılabileceğini göstermektedir. Burada D_i, C_j ve P_{ijk} aynı zaman birimi cinsinden tanımlanmaktadır.

Ele alınan problemde iki farklı karar değişkeni bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, hangi iş merkezine hangi parçanın hangi operasyonunun atanacağının kararını verdiren X_{ijk} ikili karar değişkenidir. $\forall\, i \in I, \quad \forall\, j \in J, \quad$ ve $\forall\, k \in K_i$ için X_{ijk} aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{, } i\text{.parçanın } k\text{. operasyonu } j \text{ makinesinde yapılıyorsa} \\ 0 & \text{, diğer durumlarda} \end{cases}$$

İkinci karar değişkeni ise, bir parçanın ilgili operasyonunun atanan ilgili makinede hangi zaman diliminde başlayacağının kararını verdiren t_{ijk} karar değişkenidir, ve reel değer alır. $\forall\ i \in I, \quad \forall\ j \in J$ve $\forall\ k \in K_i$ için tanımlanan t_{ijk} eğer *i.* parça için *k.* operasyon *j.* makinede yapılacaksa negatif olmayan bir değer almaktadır. Diğer durumlarda, t_{ijk} sıfır değerini almaktadır.

Ayrıca bahsedilen X_{ijk} ve t_{ijk} karar değişkenkeri dışında $Z_{ii'jkk'}$ ikili karar değişkeni bazı kısıtları pasif ya da aktif duruma getirerek varsayımların yansıtılmasında kullanılacaktır. Bu karar değerleri 1 olursa ilgili kısıt pasif hale getirirken, 0 değeri ilgili kısıtı aktif hale getirir.

Bahsedilen indisler Çizelge 3.1, parametreler Çizelge 3.2 ve karar değişkenleri Çizelge 3.3'te çizelgeler halinde verilmiştir.

Çizelge 3.1 İndisler

Tanım	**Açıklama**
Parça İndisi	$i \in I, \qquad I = \{1, 2, \ldots, \lvert I \rvert\}$
Makine İndisi	$j \in J, \qquad J = \{1, 2, \ldots, \lvert J \rvert\}$
Operasyon İndisi	$k \in K_i, \qquad K_i = \{1, 2, \ldots, \lvert K_i \rvert\}$

Çizelge 3.2 Parametreler

Sembol	**Tanım**	**Açıklama**
n_i	Parça talep miktarı	i. parçanın üretim miktarı
D_i	Teslimat zamanı	i. parçanın teslim tarihi
C_j	Makine kapasitesi	j. makinenin kapasitesi
P_{ijk}	İşlem süresi	i. parçanın k. operasyonunun j. makinedeki süresi
y_{ijk}	İşlem yapılabilirliği	$\begin{cases} 1, & \text{eğer } i. \text{ parçanın } k. \text{ operasyonu } j \text{ makinesinde yapılırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$

Çizelge 3.3 Karar Değişkenleri

Sembol	**Tanım**	**Açıklama**
t_{ijk}	Başlangıç zamanı	*i*. parçanın *k*. operasyonunun *j*. makinede başlayacağı zaman
X_{ijk}	Atama değişkeni	$\begin{cases} 1, & \text{eğer } i. \text{ parçanın } k. \text{ operasyonu } j \text{ makinede yapılırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$
$Z_{ii'jkk'}$	İkili karar değişkeni	Kısıtların aktif/pasif olmasını sağlar

3.2.2. Kısıtlar

Bu bölümde, ele alınan problemin ve sistemin Bölüm 3.1.'de bahsedilen varsayımlar doğrultusunda ele alınmasıyla oluşturulan kısıtlardan bahsedilecektir.

1. **Operasyonların Tek Makineye Atanma Kısıtı:** Bir parçanın bir operasyonu yalnızca bir makinede işleme alınmalıdır. Bir operasyon birden farklı makine ya da aynı grup makine kümesinde birden fazla makineye atanamaz. (1) kısıt kümesi sayesinde yapılacak işlemin tek bir makinede yapılacağı garanti altına alınırken, birden fazla

makineye atanması yani işlemin tekrarlanması durumu önlenecektir.

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} = 1 \qquad \forall\, i \in I, \forall\, k \in K_i; \tag{1}$$

2. **Makine Operasyon Uyum Kısıtı:** Bu kısıt, her makinede o makinenin teknik özellikleri ile uyumlu operasyonların yapılmasını sağlar. Ele alınan problemde, her makine üretim alanında ilerleyen parçalara ait her operasyonu gerçekleştirememektedir. Her makine farklı işleme hassasiyeti ve işleme kapasitesi gibi teknik özelliklere sahiptir. Eğer bir operasyon belirli bir makinede yapılamıyorsa, operasyon o makineye atanmamalıdır. Bu özellikleri dikkate almak ve uygun makineye uygun parça operasyonunu atamak önemli hale gelmektedir. (2) kısıt kümesi makine operasyon uyumunun olmadığı atamaların engellenmesini sağlamaktadır.

$$X_{ijk} \leq y_{ijk} \qquad \forall\, i \in I, \qquad \forall\, j \in J, \qquad \forall\, k \in K_i \tag{2}$$

3. **Kapasite Kısıtı:** Her makinenin çalıştığı vardiya sayısı birbirinden farklıdır bu nedenle vardiya sayısına göre makinelerin toplam çalışma süreleri de farklılık göstermektedir. Bir makinede üretimi gerçekleştirilecek parçaların toplam üretim süresi planlama dönemi boyunca makinelerin toplam çalışma kapasitesini aşmaması gerekmektedir. Bu kısıt her makine için geçerlidir. Burada C_j ifadesi j tipi makinelerin (aynı işlemi yapabilen makineler) kapasitesidir ve atanan bir iş aynı tip makinelerden birinin kapasitesi yetmediğinde işlem, aynı tip ikinci bir makineye bölünerek devam etmektedir. Makine kapasitesi dikkate alınarak, planlama dönemi boyunca gerçekleştirilecek işlemlerin toplam süresi (3) numaralı kısıt kümesi ile sınırlandırılır.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} n_i \cdot P_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq\ C_j \qquad \forall\, j \in J \tag{3}$$

4. **Operasyon Başlama Zamanlarının Kontrol Kısıtı:** Bu kısıt, bir operasyonun başlama zamanının yalnızca o operasyonun bir makineye atandığında anlamlı olmasını sağlamaktadır. Eğer operasyonun atanmadığı bir durum varsa, operasyon başlama

zamanı sıfıra atanır ve böylece kısıtın çalışmasını engelleyecek atamalar yapılması önlenir. Literatürü incelediğimizde Yazdani(2017) çalışmasında, atama yapılmayan operasyonlar için başlangıç zamanlarına dair bir kontrol kısıtı eklememiştir. Ancak bu çalışmada kurulan modelin kurgusu nedeniyle kontrol kısıtı eklenmediği durumda atama olmayan makinelerinde atama değeri aldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle ilgili kısıt modele dahil edilmiştir. *M* çok büyük bir sayı olmak üzere (4) numaralı kısıt, t_{ijk} değişkenlerinin yalnızca atama yapılan operasyonda aktif olmasını sağlamaktadır.

$$t_{ijk} \leq M \cdot X_{ijk} \qquad \forall\, i \in I, \forall\, j \in J, \forall\, k \in K_i \tag{4}$$

5. **Öncüllük - Ardıllık Kısıtı:** İlgili kısıt, üretim sürecinde her parçanın operasyonlarının belirli bir sıra izleyerek gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu kısıt kapsamında *i.* parçanın rotasının sırasıyla 1,2,3,...,$|K_i|$ numaralı operasyonlardan oluştuğu varsayılmaktadır. Bir operasyon tamamlanmadan sonraki operasyon(lar) başlatılamaz, böylece her parçanın üretim rotasına uygun şekilde işlenmesi sağlanır. Bu kısıt, üretim sürecinde öncüllük ve ardıllık ilişkilerinin dikkate alınmasını ve operasyonların doğru sırayla yapılmasını zorunlu tutmaktır. Problemin doğası gereği, her parçanın bir rotası bulunmaktadır ve bu rotadaki operasyonlar birbiriyle ilişkilidir. Bir önceki operasyon tamamlanmadan sonraki operasyona geçilmesi mümkün olmadığından, her parça kendi rotası içinde operasyonlar için öncüllük ve ardıllık ilişkilerine sahiptir. Literatür incelendiğinde birden fazla çalışmada öncüllük ardıllık kısıtlarının göz önünde bulundurulduğu görülmüştür. Guo(2006), Kaya(2016) ve Yazdani (2017)'nin çalışmaları incelendiğinde bu çalışmadan farklı olarak öncüllük ardıllık kurgulanırken büyük bir sayıdan yararlanmadn modeli kurguladıkları gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise (5) numaralı kısıt kümesi, modelin öncüllük ve ardıllık ilişkilerini göz önünde bulundurulmasını sağlayarak, rotaya uygun atamalar yapılmasını ve öncülü bulunan operasyonların öncülü tamamlandıktan sonra başlamasını büyük bir sayı ile kontrol ederek garanti etmektedir.

$$t_{ijk} + n_i \cdot P_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq t_{ij'(k+1)} + M \cdot (1 - X_{ij'(k+1)}) \tag{5}$$
$$\forall\, i \in I, \quad \forall\, j, j' \in J \quad \text{ve} \quad j \neq j', \quad \forall k \in K_i$$

6. **Operasyon Çakışmalarını Engelleyici Kısıtlar:** Bir makinedeki operasyon başladıktan sonra ilgili parçanın veya başka bir parçanın aynı makinedeki farklı bir operasyonunun başlayabileceği ilk zaman önemlidir. Diğer operasyonlar makinenin ilk boş olduğu zaman dikkate alınarak atanmalıdır. Böylece aynı anda aynı makineye farklı atamaların yapılmasının önüne geçilmelidir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde birden fazla çalışmada kısıtları kurgularken büyük bir sayıdan yararlanıldığı fark edilmiş ancak ikili bir değişkenle kısıtların aktif pasif kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yazdani (2017) çalışmasında büyük bir sayı ile operasyon çakışmalarının kontrol edildiği bir kısıt kullanmıştır. Bu çalışmada ise (6) ve (7) numaralı kısıt kümeleri makinelerdeki ardışık olması gereken operasyonlar arasında bir düzen sağlamak ve çakışmaları önlemek için hem büyük bir sayı kullanılmış hem de aktif ve pasif kısıtlardan yararlanmıştır.

$$t_{ijk} + n_i \cdot P_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq t_{i'jk'} + M \cdot Z_{ii'jkk'} \tag{6}$$
$$t_{i'jk'} + n_{i'} \cdot P_{i'jk'} \cdot X_{i'jk'} \leq t_{ijk} + M \cdot (1 - Z_{ii'jkk'}) \tag{7}$$
$$\forall\, i, i' \in I \quad \text{ve} \quad i \neq i', \quad \forall\, j, j' \in J, \quad \forall k, k' \in K_i, \quad \text{ve} \quad k \neq k'$$

3.2.3. Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu, matematiksel modellerde belirli bir hedefe ulaşılmasını sağlayan önemli bir bileşendir. Atölye çizelgeleme problemleri kapsamında, amaç fonksiyonu genellikle aşağıda verilmiş olan hedeflerden bir veya birkaçını içermektedir Pinedo (2012).

- Tüm işlerin tamamlanması için geçen süreyi (çevrim süresi)en küçüklemek

- İşlerin toplam tamamlanma süresini en küçüklemek
- Toplam geç teslimatları en küçüklemek
- En büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklemek
- Maliyetleri en küçüklemek
- Makine kullanımını en iyilemek

Amaç fonksiyonu, belirlenen kısıtlar çerçevesinde hedeflere ulaşmak için modelin yönlendirilmesini sağlayarak karar verme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu anlamda seçilen amaç fonksiyonları belirli hedeflerin gerçekleştirilmesinde önemli bir noktadır.

Ele alınan problemde ise temel amaç, teslimatlarda karşılaşılan gecikmelerin ortaya çıkmasını engellemektir. Bu çalışmada seçilen iki amaç fonksiyonu, havacılık sektöründeki üretim önceliklerini yansıtmak amacıyla tercih edilmiştir. Toplam bitiş zamanlarının en küçüklenmesi, üretim sürecinin hızlı ve verimli bir şekilde tamamlanmasını hedefleyen atölyeler için kritik önemdedir. Bu yaklaşım, üretim iş akış sürelerinin olabildiğince kısaltılmasını hedeflerken, en büyük gecikme/erken teslimatın en küçüklenmesi amaç fonksiyonu teslimat tarihlerine uyum ve müşteriye zamanında teslimi hedeflemektedir. Bu amaç fonksiyonu özellikle stok maliyetlerini azaltma ve teslimata dayalı ceza riski taşıyan projelerde avantaj sağlamaktadır. Problem için uygun amaç fonksiyonları seçilirken toplam gecikmelerin en küçüklendiği amaç fonksiyonu da değerlendirilmiştir. Ancak problemde erken teslimatlarında istenmediği, tam zamanında teslimin vurgulandığı bir modelin daha uygun olacağı kararı karar verici tarafından alınmıştır. Toplam gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği durum ele alınırsa da kısıt sayısının üstel bir şekilde artmasıyla uygun çözüm elde edilmekte zorlanılacağı fark edilmiştir. Bu nedenle en büyük gecikme/erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonu tercih edilmiştir.

Seçilen bu iki amaç fonksiyonu, erken teslimatı önemseyen fonksiyonlar olsalarda farklı üretim stratejilerini temsil etmektedirler ve farklı senaryoların değerlendirebilmesine imkan

tanımaktadırlar. Bu çalışma kapsamında bahsedildiği üzere iki farklı amaç fonksiyonu ayrı fonksiyonlar olarak ele alınmıştır ve çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılmamıştır. Bunun temel nedeni, her iki amaç fonksiyonunun üretim atölyesi üzerindeki farklı etkilerinin bağımsız analiz edilmek istenmesidir.

Aşağıda, seçilen iki farklı amaç fonksiyonundan detaylı olarak bahsedilecektir.

- **En büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklenmesi :** Bu amaç fonksiyonu, en büyük gecikmeye neden olan parçadaki gecikmeyi en küçüklemeye çalışırken diğer parçalarında erken teslim edilme durumunu en küçüklemeyi hedefler. Her bir parçanın bitiş zamanı ile teslimat zamanı arasındaki fark bulunarak hesaplanır. Son operasyonun başlama zamanı ($t_{ijk_{\text{son}}}$) ile ilgili operasyonun atandığı makinedeki işlem süresinin toplamı ilgili operasyonun atanan makinedeki üretim tamamlanma zamanına karşılık gelmektedir. Hesaplanan son üretim tamamlanma zamanı teslimat zamanınından büyükse gecikme meydana gelir. Diğer durumda ise, erken teslimat olur ve bu çalışma kapsamında hem geç hem de erken teslimat durumundan kaçınılmak istendiği için makinedeki üretim tamamlanma zamanı ile teslimat zamanı arasındaki sürenin farkının mutlak değeri ele alınmaktadır. Model öncelikli olarak en büyük gecikmeye neden olan parçayı belirlemeyi hedeflemektedir. Bu gecikme değeri, tüm parçalar için hesaplanan gecikmeler arasındaki en büyük değeri temsil eder. Gecikmenin minimize edilmesiyle, model, en büyük gecikmenin en küçük olmasını hedeflemektedir. Bu amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\min\left(\max\left|\left(t_{ijk_{\text{son}}} + n_i \cdot P_{ijk_{\text{son}}} \cdot X_{ijk_{\text{son}}}\right) - D_i\right|\right) \tag{8}$$

Amaç fonksiyonu maksimum gecikmeyi minimize etmeyi hedeflerken, amaç fonksiyonu modelinde lineer hale getirmek çözücü çalışma hızını artıracaktır. Amaç fonksiyonunda yer alan;

$$\max\left|\left(t_{ijk_{son}} + n_i \cdot P_{ijk_{son}} \cdot X_{ijk_{son}}\right) - D_i\right) \tag{9}$$

ifadesi z gibi bir değişkene eşitlendiğinde model min z biçimine dönüşürken, modele iki yeni kısıt eklendiği görülmektedir. İki yeni kısıt aşağıda verilmiştir.

$$\min \quad z$$

$$(t_{ijk_{son}} + n_i \cdot P_{ijk_{son}} \cdot X_{ijk_{son}} - D_i) \leq z_i \tag{10}$$

$$(-t_{ijk_{son}} - n_i \cdot P_{ijk_{son}} \cdot X_{ijk_{son}} + D_i) - M(1 - X_{ijk_{son}}) \leq z_i \tag{11}$$

$$z \geq z_i \ ,$$

$$z_i \geq 0 \ ,$$

$$z \geq 0 \ .$$

Amaç fonksiyonu doğrusallaştırılırken modele Denklem (10) ve Denklem (11) denklemleri dahil edilmiştir. Denklem (11)'da kısıtın sol tarafında çok büyük bir sayı dahil edilmiştir. Bunun başlıca nedeni aslında (4) numaralı kısıta dayanmaktadır. (4) numaralı kısıtta X_{ijk}=0 değerini aldığında yani ilgili makineye bir atama yapılmadıysa t_{ijk} değerininde sıfır almasını sağlıyordu. Denklem (11)'da bu nedenle çok büyük bir sayı ile kontrol adımı eklendi. Böylelikle atama yapılmayan durumlarda çok büyük bir sayı devreye girip, zi değerinin -Di değerine eşitlenip yanlış bir çözüm elde edilmesinin önüne geçilmiştir. Bu iki kısıt modele dahil edilip, min z amaç fonksiyonuyla çözdürüldüğünde uygun çözüm elde edilecektir.

- **Parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi :** Çalışma kapsamında ele alınan bir diğer amaç fonksiyonu tüm parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklemesidir. Bu amaç fonksiyonu, üretim sürecindeki etkinliği artırmak ve parçaların atölyede harcadıkları toplam süreyi en küçüklemeye çalışmaktadır. Bu kapsamda, tüm parçaların operasyon sürelerini, ve dolayısıyla bitiş zamanlarını dikkate alarak, toplam sürenin en aza indirgenmesini hedeflemektedir. Havacılık sektöründe müşterilerin ilettiği teslimat sürelerinin oldukça kısıtlı olması ve katı zaman çizelgelerine bağlı olması, parçaların en kısa sürede tamamlanmasının ve üretim sürecinin etkin bir şekilde planlanmasının önemini artırmaktadır. Bu amaç fonksiyonu ile bitiş zamanları mümkün olduğunca en küçüklenmeye çalışıldığından, teslimat zamanlarının kritik öneme sahip olduğu havacılık sektörü gibi uygulama alanları için de önemli bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır.

Bu doğrultuda, ele alınan amaç fonksiyonu Denklem 12'deki gibi yazılabilir.

$$\min \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} (t_{ijk_{son}+n_i \cdot P_{ijk_{son}} \cdot X_{ijk_{son}}}) \tag{12}$$

Bu amaç fonksiyonunda toplam her parça ve parçanın son operasyonu için tüm makineler üzerinden alınmaktadır. İlgili amaç fonksiyonu üretim sürecinin etkinliğini artırmak ve parçaların atölyede harcadıkları toplam süreyi minimize etmeye çalışmaktadır.

Sayısal analiz bölümünde, bu çalışmada ele alınan problem en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklenmesi ve Parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonlarıyla ele alınacaktır.

3.2.4. Model Boyutu

Atölye çizelgeleme çözümü zor problemlerden biridir. Model karmaşıklığını daha net görebilmek adına bu bölümde iki amaç fonksiyonu için gerçek problemde ele alınan modelin boyutlarından bahsedilecektir. Gecikme/erken teslimat modelinde kısıtların boyutu Çizelge 3.4'te ve değişken boyutları Çizelge 3.5'te verilmiştir. Verilen çizelgelerde $|K|$ ifadesi K_{imax}'ı temsil etmektedir.

Çizelge 3.4 Gecikme/erken teslimat modeli kısıt boyutu

Kısıt Türü	**Kısıt Notasyonu**
Kapasite Kısıtı	$\|J\|$
Öncüllük-Ardıllık Kısıtı	$\|I\|\|J\|(\|K\|-1)^2$
Tezgah Uyum Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$
Operasyon Çakışmalarını Önleyici Kısıtlar	$2\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$
Başlama Zamanı Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$
Tek Makineye Atanma Kısıtı	$\|I\|\|K\|$
Amaç Fonksiyonu Kısıtları	$2\|I\|\|J\|$

Çizelge 3.5 Gecikme/erken teslimat modeli değişken boyutları

Değişkenler	**Değişken Notasyonu**
X_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$
t_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$
$Z_{ii'jkk'}$	$\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$
z_i	$\|I\|$

Toplam bitiş zamanları modelinde kısıtların boyutu Çizelge 3.6'da ve değişken boyutları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6 Toplam bitiş zamanları modeli kısıt boyutu

Kısıt Türü	**Kısıt Notasyonu**
Kapasite Kısıtı	$\|J\|$
Öncüllük-Ardıllık Kısıtı	$\|I\|\|J\|(\|K\|-1)^2$
Tezgah Uyum Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$
Operasyon Çakışmalarını Önleyici Kısıtlar	$2\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$
Başlama Zamanı Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$
Tek Makineye Atanma Kısıtı	$\|I\|\|K\|$

Çizelge 3.7 Toplam bitiş zamanları modeli değişken boyutları

Değişkenler	**Değişken Notasyonu**
X_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$
t_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$
$Z_{ii'jkk'}$	$\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$

4. SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan sayısal çalışmanın detayları açıklanacaktır. Bu kapsamda, öncelikle sayısal çalışmanın amaçları açıklanacak, kullanılan veri setlerinin detayları incelenecek, sayısal çalışma ile model doğrulama senaryoları açıklanarak her bir veri seti için elde edilen sonuçlar verilerek bulgular paylaşılacaktır.

4.1. Sayısal Analizin Amacı

Bu tez kapsamında, ele alınan atölye çizelgeleme probleminin, farklı amaç fonksiyonlarında belirli performans ölçütleri ve öncelik kurallarıyla nasıl değişkenlik gösterdiğini görmek amacıyla sayısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümünde, üretim hattında işlerin uygun makinelere optimal şekilde atanması için 3. bölümde sunulan matematiksel model kullanılmış ve mevcut durum ile karşılaştırma yapabilmek için simülasyon kullanılmıştır.

Bu kapsamda, tez çalışmasında aşağıdaki araştırma sorularına cevap aranmıştır. Bunlardan bazıları aşağıdadır:

- Farklı amaç fonksiyonlarında optimal çözümler makine kullanım oranlarını nasıl etkilemektedir?
- Farklı amaç fonksiyonlarında elde edilen atamalar öncelik kurallarıyla ilişkilendirilebilir mi?
- Farklı durumlar için hangi amaç fonksiyonu daha etkili olmaktadır?

4.2. Veri Setleri

Sayısal çalışma kapsamında 3 farklı veri seti ile analizler gerçekleştirilecektir.

1. **Veri Seti :** Bu veri seti, küçük bir atölyeye ait olmakla beraber özellikle model doğrulama sürecinde ve ilk sayısal sonuçların alınmasında kullanılmıştır. Bu veri setinde$i \in \{1,2\}$ 2 parça, $j \in \{1,2,3\}$ 3 makine ve $k \in \{1,2,3,4\}$ 4 operasyonlu bir atölye ele alınmaktadır. 1. parçadan n_1=2 ve 2. parçadan n_2=3 adet üretildiği varsayılmaktadır. Bu veri setine ait model parametreleri ise Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.1 İşleme süreleri (P_{ijk})

Parça (i)	Makine (j)	Operasyon 1 (k=1)	Operasyon 2 (k=2)	Operasyon 3 (k=3)	Operasyon 4 (k=4)
1	Makine 1	4	6	3	2
	Makine 2	3	4	9	2
	Makine 3	3	4	9	2
2	Makine 1	5	7	2	2
	Makine 2	6	5	7	2
	Makine 3	6	5	7	2

Çizelge 4.2 Makine kapasiteleri(C_j)

Makine (j)	Kapasite (Saat) (j)
1	120
2	300
3	160

Çizelge 4.3 Teslimat zamanları (D_i) ve üretim adetleri (n_i)

Parça(i)	Teslimat zamanı(D_i)	Üretim adeti (n_i)
1	20	2
2	30	3

Çizelge 4.4 Operasyonların makinede yapılabilirliği (y_{ijk})

Parça (i)	Operasyon (k)	Makine 1 (j=1)	Makine 2 (j=2)	Makine 3 (j=3)
1	1	1	0	1
	2	0	1	1
	3	1	1	1
	4	1	1	1
2	1	0	1	1
	2	1	1	1
	3	1	1	1
	4	1	1	0

2. **Veri Seti :** Bu veri setinde ortalaması verilmiş olan işlem süreleri belirli bir değişkenliğe sahip olacak şekilde değerler elde edilmektedir.Bu veri setinde de $i \in \{1,2\}$ 2 parça, $j \in \{1,2,3\}$ 3 makine ve $k \in \{1,2,3,4\}$ olmak üzere 4 operasyon bulunmaktadır. İşlem sürelerinin ortalamaları Çizelge 4.5'te sunulmaktadır.

   Bu veri seti oluşturulurken operasyon sürelerinin (a,b) aralığında değer alan tekdüze(uniform) dağılımdan geldiği ve varyasyon katsayısının CV= 0,3 değerini aldığı varsayılmıştır. Tekdüze dağılım özellik bilgisinin olmadığı durumda tercih edilmektedir. Varyasyon katsayısının 0,3 değeri alması ise tekdüze dağılım verinin pozitif değerli olmasının garanti edildiği yüksek değerlerden birisidir.

$$(a+b)/2 = \mu, \quad (b-a)^2/12 = \sigma^2 \tag{13}$$

$$CV = \sigma/\mu \tag{14}$$

   Bu varsayımlarla Denklem (13) ve Denklem (14) kullanılarak Tekdüze dağılımın parametreleri Çizelge 4.6'da sunulduğu şekliyle bulunmuştur. Bu veri setine ait model de kullanılacak kalan parametreler ise Çizelge 4.6, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve 1. veri setinde yer alan Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 Deterministik ortalama işleme süreleri

Parça (i)	Makine (j)	Operasyon 1 (k=1)	Operasyon 2 (k=2)	Operasyon 3 (k=3)	Operasyon 4 (k=4)
1	Makine 1	6	8	5	4
	Makine 2	5	6	11	4
	Makine 3	5	6	11	4
2	Makine 1	7	9	4	4
	Makine 2	8	7	9	4
	Makine 3	8	7	9	4

Çizelge 4.6 CV ≈ 0.30 değeriyle ve Çizelge 4.5'deki ortalama işlem süreleri ile hesaplanan uniform dağılım aralıkları

Parça (i)	Makine (j)	Operasyon 1 (k=1)	Operasyon 2 (k=2)	Operasyon 3 (k=3)	Operasyon 4 (k=4)
1	Makine 1	Uniform(2.88 , 9.12)	Uniform(3.84 , 12.16)	Uniform(2.40 , 7.60)	Uniform(1.92 , 6.08)
	Makine 2	Uniform(2.40 , 7.60)	Uniform(2.88 , 9.12)	Uniform(5.28 , 16.72)	Uniform(1.92 , 6.08)
	Makine 3	Uniform(2.40 , 7.60)	Uniform(2.88 , 9.12)	Uniform(5.28 , 16.72)	Uniform(1.92 , 6.08)
2	Makine 1	Uniform(3.36 , 10.64)	Uniform(4.32 , 13.68)	Uniform(1.92 , 6.08)	Uniform(1.92 , 6.08)
	Makine 2	Uniform(3.84 , 12.16)	Uniform(3.36 , 10.64)	Uniform(4.32 , 13.68)	Uniform(1.92 , 6.08)
	Makine 3	Uniform(3.84 , 12.16)	Uniform(3.36 , 10.64)	Uniform(4.32 , 13.68)	Uniform(1.92 , 6.08)

Çizelge 4.7 Makine kapasiteleri(C_j)

Makine (j)	Kapasite (Saat) (j)
1	30
2	50
3	40

Çizelge 4.8 Teslimat zamanları (D_i) ve üretim adetleri (n_i)

Parça(i)	Teslimat zamanı(D_i)	Üretim adeti (n_i)
1	40	2
2	50	3

3. **Veri Seti :** Bu veri seti, ele alınan havacılık sektöründeki gerçek hayat verilerini, gizlilik sebebiyle belirlenen bir normalizasyon katsayısı ile normalize edilmiş şeklidir. Verilerdeki zaman birimleri saat üzerinden hesaplanmış olup bu veri setinde $i \in \{1,2...10\}$ 10 parça, $j \in \{1,2,...30\}$ 30 makine ve $k \in \{1,2,...30\}$ 30 operasyon bulunmaktadır.

   Gecikme/erken teslimat modelinde gerçek veriye ait kısıtların boyutu Çizelge 4.9'da ve değişken boyutları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Gecikme/erken teslimat modeli kısıt boyutu

Kısıt Türü	**Kısıt Notasyonu**	**Kısıt Sayısı**	**Kümülatif Kısıt Sayısı**
Kapasite Kısıtı	$\|J\|$	30	30
Öncüllük-Ardıllık Kısıtı	$\|I\|\|J\|(\|K\|-1)^2$	252300	252330
Tezgah Uyum Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000	261330
Operasyon Çakışmalarını Önleyici Kısıtlar	$2\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$	4860000	5121330
Başlama Zamanı Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000	5130330
Tek Makineye Atanma Kısıtı	$\|I\|\|K\|$	300	5130630
Amaç Fonksiyonu Kısıtları	$2\|I\|\|J\|$	1800	5132430

Çizelge 4.10 Gecikme/erken teslimat modeli değişken boyutları

Değişkenler	**Değişken Notasyonu**	**Kümülatif Değişken Sayısı**
X_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000
$X_{ijk} + t_{ijk}$	$\|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|\|J\|\|K\|$	18000
$X_{ijk} + t_{ijk} + Z_{ii'jkk'}$	$\|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$	2448000
$X_{ijk} + t_{ijk} + Z_{ii'jkk'} + z_i$	$\|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2 + 1$	2448001

Çizelgelerde görüldüğü üzere kapasite kısıtından 30 kısıt, Öncüllük-ardıllık kısıtından 252300 kısıt, Tezgah uyum kısıtından 9000 kısıt, Operasyon çakışmalarını önleyici kısıtlardan 4860000 kısıt, Başlama zamanı kısıtlarından 9000 kısıt, Tek makineye atanma kısıtından 300 kısıt ve amaç fonksiyonu kısıtlarından 1800 kısıt olmak üzere

toplamda 5132430 kısıt ve 2448001 değişken ile gecikme/erken teslimat modelinde gerçek veri ile problem boyutlandırılmıştır.

Toplam bitiş zamanları modelinde gerçek veriye ait kısıtların boyutu Çizelge 4.11'de ve değişken boyutları Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Toplam bitiş zamanları modeli kısıt boyutu

Kısıt Türü	**Kısıt Notasyonu**	**Kısıt Sayısı**	**Kümülatif Kısıt Sayısı**
Kapasite Kısıtı	$\|J\|$	30	30
Öncüllük-Ardıllık Kısıtı	$\|I\|\|J\|(\|K\|-1)^2$	252300	252330
Tezgah Uyum Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000	261330
Operasyon Çakışmalarını Önleyici Kısıtlar	$2\|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$	4860000	5121330
Başlama Zamanı Kısıtı	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000	5130330
Tek Makineye Atanma Kısıtı	$\|I\|\|K\|$	300	5130630

Çizelge 4.12 Toplam bitiş zamanları modeli değişken boyutları

Değişkenler	**Değişken Notasyonu**	**Kümülatif Değişken Sayısı**
X_{ijk}	$\|I\|\|J\|\|K\|$	9000
$X_{ijk} + t_{ijk}$	$\|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|\|J\|\|K\|$	18000
$X_{ijk} + t_{ijk} + Z_{ii'jkk'}$	$\|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|\|J\|\|K\| + \|I\|(\|I\|-1)\|J\|\|K\|^2$	2448000

Çizelgelerde görüldüğü üzere kapasite kısıtından 30 kısıt, Öncüllük-ardıllık kısıtından 252300 kısıt, tezgah uyum kısıtından 9000 kısıt, operasyon çakışmalarını önleyici kısıtlardan 4860000 kısıt, başlama zamanı kısıtlarından 9000 kısıt ve tek makineye atanma kısıtından 300 kısıt olmak üzere toplamda 5130630 kısıt ve 2448000 değişken ile toplam bitiş zamanları modelinde gerçek veri ile problem boyutlandırılmıştır.

Bu bölümde bahsedilen veri setleri, Bölüm3.2.'de sunulan iki farklı amaç fonksiyonu ile oluşturulan matematiksel modellere girdi olarak kullanılmıştır. İlgili modeller MATLAB ortamında kodlandı ve Intel(R) Core(TM) i5(2.40 GHz)-10200H CPU işlemcili bir bilgisayarda çalıştırılmıştır.

4.3. Model Doğrulama Senaryoları

Ele alınan atölyede, çizelgeleme problemi için bir matematiksel model ve iki amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu modelin doğrulanması için farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, yapılan bu çalışmalar ve sonuçları açıklanacaktır.

4.3.1. En Büyük Gecikme/Erken Teslimat Amaç Fonksiyonu İle Yapılan Model Doğrulama Senaryoları

Bu bölümde de tez boyunca ele alınacak ilk amaç fonksiyonu olan en büyük gecikme/erken teslimat en küçüklenmesi amaç fonksiyonunda aşağıda verilen senaryolar test edilecektir.

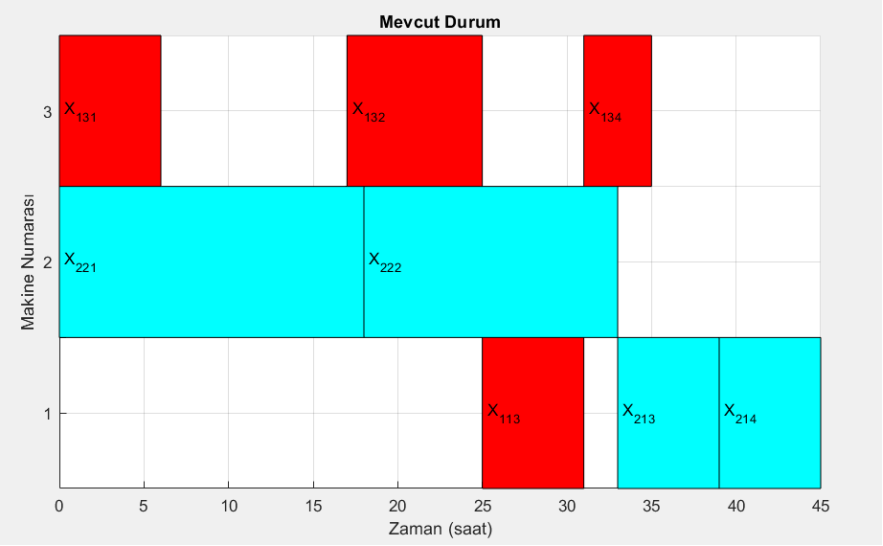
1. **İşlem süreleri ve makine uygunluk değerleri ile yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 1)**

   Ele alınan problem de makinelerde, parçalar belli işlemlerden geçerken bu işlemlerin makineye uygun olması önemli olmaktadır. Bazı parçalar bazı makinelerde yapılabilirken bazılarında teknik anlamda uygunluğu olmadığı için yapılmaması tercih edilmektedir. Bununla beraber, bir işlemin bir makinede gerçekleştirilmesi sırasında harcanan süreyi gösteren işlem süresi (proses zamanı) bulunmaktadır. Doğrulama senaryolarının bu kısmında, teknik anlamda uygun olmadığı için bir makinede gerçekleştirilmesi tercih edilmeyen işlemlerin ilgili makinedeki işlem sürelerinin belli olmasının optimal çözüme etkisi incelenmektedir. Başka bir ifadeyle, bu şekilde belirli işlem sürelerinin hatalı atamalara sebep olup olmadığı araştırılmaktadır. Bu amaçla, bir işlemin teknik olarak bir makinede yapılamadığı halde işlem süresi ile ilgili iki ayrı durum oluşturulmuştur: islem süresinin sabit/ belirli olduğu senaryo, işlem süresinin sıfır olarak alındığı senaryo.

   İşlem süresinin sabit olduğu senaryo mevcut uygulamada da bulunmaktadır ve bu senaryodaki veriler 1. veri setinde olduğu gibidir.

   En büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile çalıştırılan modelde tüm veri setlerinde Çizelge 4.13 ve Şekil 4.1'de gösterilen atamalar elde

edilmiştir ve amaç fonksiyonu 15 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan 2 numaralı kısıtının modeli doğru yönlendirdiği doğrulanmıştır.



Şekil 4.1 Gannt chart - senaryo 1

Uygun çözüm Şekil 4.1'deki haliyle çizelgelenmiştir ve 1. parça mavi ile 2. parça kırmızı ile gösterilmiştir. Amaç fonksiyonu değeri 15'tir. Bu da demek oluyor ki problemde 15 birimlik bir gecikme söz konusudur.

Çizelge 4.13'de değişkenler parçanın operasyonunu ve hangi makinede işleme alındığını temsil etmektedir. x_{ijk} ifadesinin 1 değerini aldığı durumlar bir parçanın bir operasyonunun ilgili makineye atandığını göstermektedir. t_{ijk} ifadesi ise o atamanın gerçekleştiği ilk zamandır. Yani ilgili işlemin ilgili makinedeki başlangıç zamanını temsil etmektedir.

Uygunluk matrisinde makine işlem uygunluğu olmayan durumların işlem süresine sıfır atandığı senaryo mevcut uygulamada da ele alınacaktır ve bu senaryodaki diğer veriler 1. veri setinde olduğu haliyle ele alınacaktır. En büyük gecikme/ erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile ilgili senaryo ele alınmıştır. Bu durum için parça-makine eşleşmesinin olmadığı yani işleme matrisine sıfır değerinin atandığı durumlar için işleme süresi matrisine 0 değeri atanmıştır. Fakat atama işlemlerinin Çizelge 4.13'deki haliyle atandığı gözlemlendi ve çizelge de buna bağlı olarak Şekil 4.1 ile birebir aynıdır. Çizelge 4.14'te makineler önünde işlemi süren işlerin bitmesini

Çizelge 4.13 Atama veri çizelgesi - senaryo 1

Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	0	0	X_{221}	1	0
X_{112}	0	0	X_{222}	1	18
X_{113}	1	25	X_{223}	0	0
X_{114}	0	0	X_{224}	0	0
X_{211}	0	0	X_{131}	1	0
X_{212}	0	0	X_{132}	1	17
X_{213}	1	33	X_{133}	0	0
X_{214}	1	39	X_{134}	1	31
X_{121}	0	0	X_{231}	0	0
X_{122}	0	0	X_{232}	0	0
X_{123}	0	0	X_{233}	0	0
X_{124}	0	0	X_{234}	0	0

bekleyen işler, bekleme zamanları, bekleme süreleri ve bekleme nedeninin belirtilen bir çizelge sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde X_{132} operasyonunun makine 3'te 11 birim geciktiği ve modelin tam zamanında teslimat için ilgili işlemi beklettiği görülmüştür.

Çizelge 4.14 Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri

X_{ijk}	**Makine**	**Bekleme Zamanı**	**Bekleme Nedeni**
X_{132}	M3	11 birim	Tam zamanında teslim

Ele alınan durumları özetleyecek olursak, matematiksel model de oluşturulan 2 kısıtı, atama yapılacak parçaların makine-operasyon uygunluk durumunu kontrol etme anlamında modeli doğru bir şekilde yönlendirdiği söylenebilmektedir.

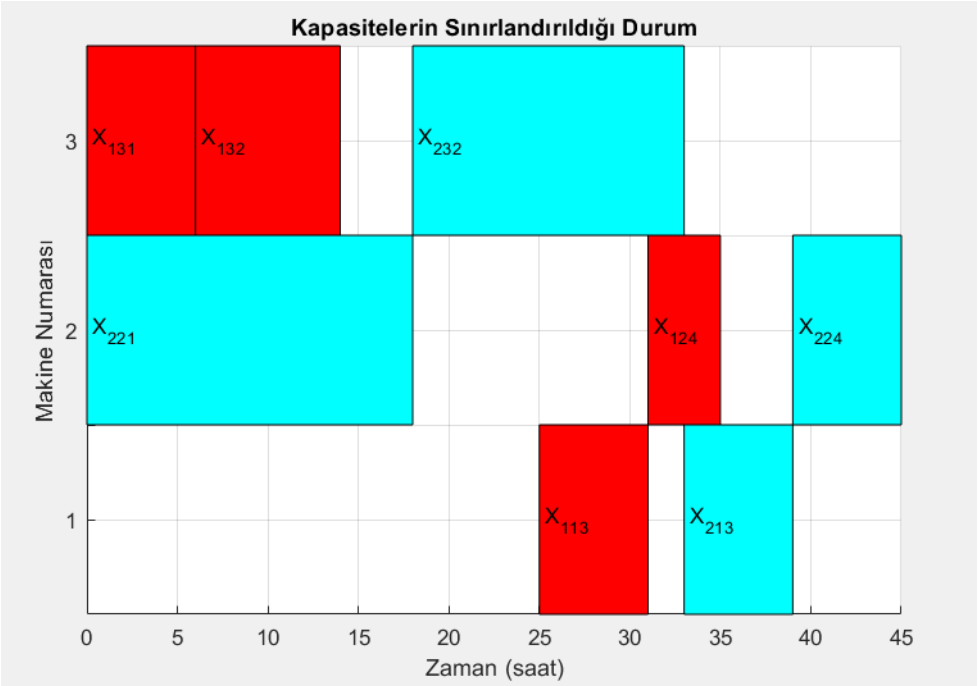
2. **Makine kapasitelerinin sınırlandırıldığı durum için yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 2)**

   Makine kapasitelerinin değiştirilmesiyle elde edilecek olan atamaları ve uygun çözümü incelemek amacıyla makine sayıları ve diğer parametreler 1. veri setinden alınarak makine kapasite değerleri sırasıyla saat cinsinden C_1= 40, C_2= 60 ve C_3= 40 olarak sınırlandırılmıştır. Sınırlandırılmış girdilerle en büyük gecikme/erken teslimat modeli çözdürüldüğünde elde edilen uygun çözümlere ait atama veri çizelgesi ve

Çizelge 4.15 Optimal veri atama çizelgesi - senaryo 2

Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	0	0	X_{211}	0	0
X_{112}	0	0	X_{212}	0	0
X_{113}	1	25	X_{213}	1	33
X_{114}	0	0	X_{214}	0	0
X_{121}	0	0	X_{221}	1	0
X_{122}	0	0	X_{222}	0	0
X_{123}	0	0	X_{223}	0	0
X_{124}	1	31	X_{224}	1	39
X_{131}	1	0	X_{231}	0	0
X_{132}	1	6	X_{232}	1	18
X_{133}	0	0	X_{233}	0	0
X_{134}	0	0	X_{234}	0	0

ilgili gannt chart Çizelge 4.15'de ve Şekil 4.2'te sunulmaktadır. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.2'de optimal atamaların ve buna bağlı olarak makine kullanım oranlarının beklenildiği üzere senaryo 1'e göre farklı değerler aldığı görülmektedir. Çözüm kümesi farklılaşmakla beraber amaç fonksiyonu aynı kalmıştır. Modelin çeşitli alt çözümlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 Gannt chart - senaryo 2

Çizelge 4.16 Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri

X_{ijk}	**Makine**	**Bekleme Zamanı**	**Bekleme Nedeni**
X_{113}	M1	11 birim	Tam zamanında teslim

Çizelge 4.17 Optimal veri atama çizelgesi - senaryo 3

Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	1	11	X_{211}	0	0
X_{112}	0	0	X_{212}	0	0
X_{113}	1	27	X_{213}	1	33
X_{114}	0	0	X_{214}	0	0
X_{121}	0	0	X_{221}	0	0
X_{122}	0	0	X_{222}	1	18
X_{123}	0	0	X_{223}	0	0
X_{124}	1	33	X_{224}	1	39
X_{131}	0	0	X_{231}	1	0
X_{132}	1	19	X_{232}	0	0
X_{133}	0	0	X_{233}	0	0
X_{134}	0	0	X_{234}	0	0

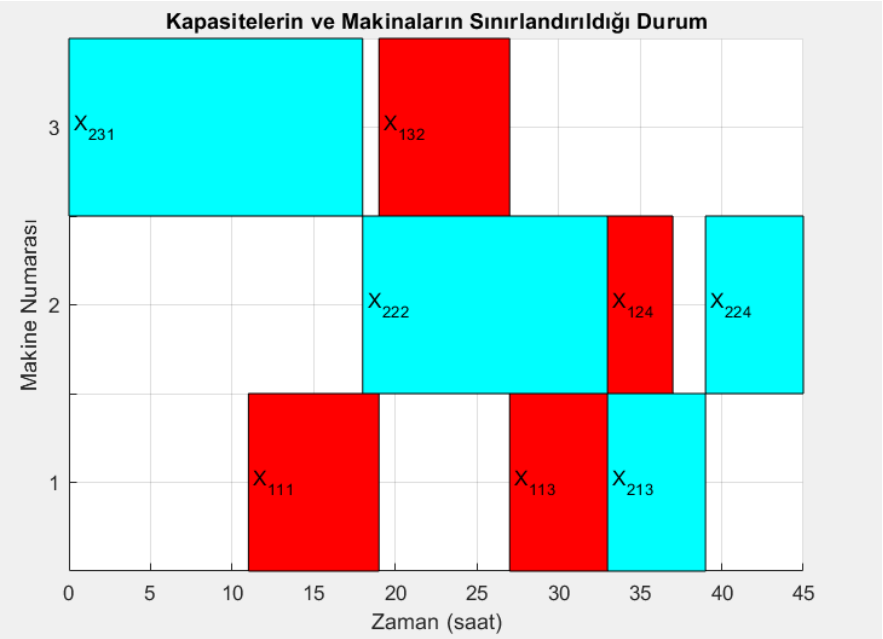
Çizelge 4.16 incelendiğinde X_{113} operasyonunun makine 1'de 11 birim geciktiği ve modelin tam zamanında teslimat için ilgili işlemi beklettiği görülmüştür.

Genel olarak modelin kapasite değişimlerine duyarlılığının olduğu gözlemlenmiş ve geliştirilen modelin farklı parçaların farklı operasyonlarını uygun makinelere etkin bir şekilde atayabildiği tespit edilmiştir. Bu tespit, modelin farklı makine kapasiteleri ve teknik gereksinimlere uyum sağlayacak çeşitli üretim senaryolarına uygulanabilirliğini desteklemektedir.

3. **Makine kapasitelerinin ve adetlerinin aynı anda sınırlandırıldığı durum için yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 3)**

   Model doğrulamak için gerçekleştirilen bir başka senaryoda ise hem makine sayısı hem de makine kapasitesi sınırlandırılmıştır. Burada makine kapasiteleri C_1= 25, C_2= 25 ve C_3= 26 saat ile sınırlandırılmış ve makine sayıları m_1= m_2= m_3= 1 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3 ve Çizelge 4.17'de sunulmaktadır.

   Çizelge 4.18 incelendiğinde X_{111} operasyonunun makine 1'de 11 birim geciktiği ve modelin tam zamanında teslimat için ilgili işlemi beklettiği görülmüştür.



Şekil 4.3 Gannt chart - senaryo 3

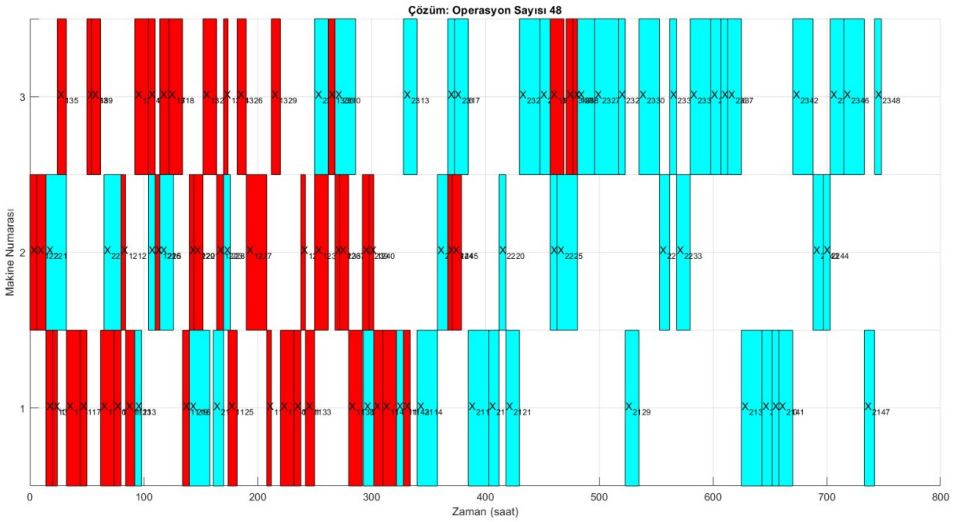
Çizelge 4.18 Makine önünde bekleme zamanları ve nedenleri

X_{ijk}	**Makine**	**Bekleme Zamanı**	**Bekleme Nedeni**
X_{111}	M1	11 birim	Tam zamanında teslim

Amaç fonksiyonu değeri senaryo 1 ve senaryo 2 de olduğu gibi 15'tir. Kapasite kısıtıyla birlikte çizelge hiçbir boşluk bırakmadan atamalar yapmıştır. Burada makine kullanım oranlarınında diğer senaryolara göre daha iyi çözümler elde ettiği gözlemlenmiştir. Bunun başlıca nedenlerinden biri kapasite kısıtıdır.

4. **Genişletilmiş operasyon sayısı ile yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 4)**

   1. veri seti ile yapılan analizlerden sonra problemin boyutu büyüdüğünde model davranışı, çözüm süresi vb. açılardan inceleyebilmek için rastgele verilerle 48 operasyon ile model çalıştırılmış ve elde edilen çizelge Şekil 4.4'te sunulmuştur. Modelin büyük operasyon sayısında da uygun ve etkili çözüm bulduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 Gannt chart (operasyon sayısı 48) - senaryo 4

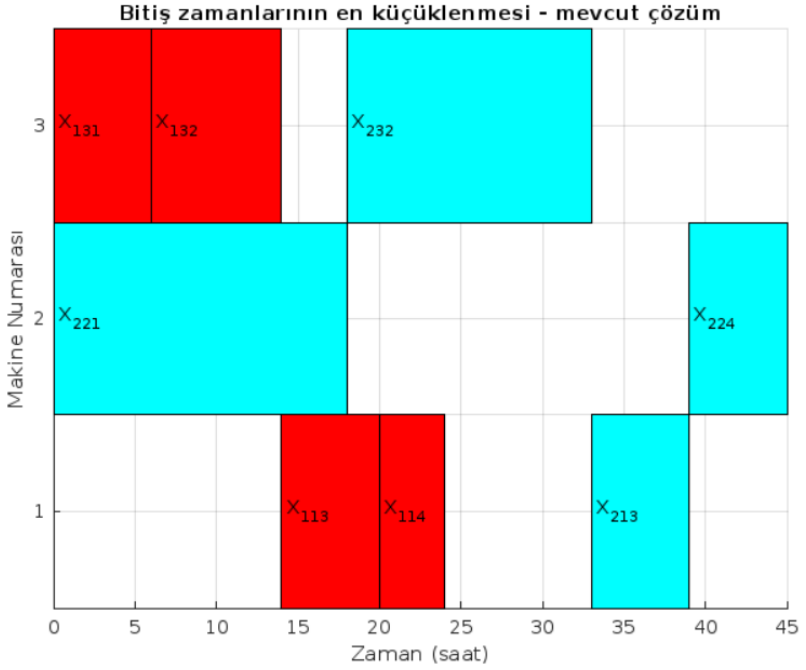
4.3.2. Parçaların Bitiş Zamanları Toplamının En Küçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İle Yapılan Model Doğrulama Senaryoları

Bölüm 4.3.1'de en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklenmesi amaç fonksiyonu için senaryolar test edilmiştir. Bu bölümde de tez boyunca ele alınan ikinci amaç fonksiyonu parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonunda benzer senaryolar test edilecektir.

1. **İşlem süreleri ve makine uygunluk değerleri ile yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 1)**

   Bir önceki bölümde ele alınan amaç fonksiyonuyla benzer olarak, parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu için de teknik anlamda uygun olmadığı için bir makinede gerçekleştirilmesi tercih edilmeyen işlemlerin ilgili makinedeki işlem sürelerinin belli olmasının çözüme etkisi incelenmektedir. Başka bir ifadeyle, bu şekilde belirli işlem sürelerinin hatalı atamalara sebep olup olmadığı araştırılmaktadır. Bu amaçla, bir işlemin teknik olarak bir makinede yapılamadığı halde işlem süresi ile ilgili iki ayrı senaryo oluşturulmuştur: islem süresinin sabit/

belirli olduğu senaryo, işlem süresinin sıfır olarak alındığı senaryo. İşlem süresinin sabit olduğu senaryoda veriler 1. veri setinde olduğu gibi ele alınmıştır. 1. veri seti parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile çalıştırılan modelden elde edilen uygun çözümlere ait atamalar ve gannt chart Çizelge 4.19 ve Şekil 4.5'deki halleriyle sunulmaktadır. Parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonu 45 değerini almıştır. Bu sonuçlardan 2 numaralı kısıtının parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği modeli de doğru yönlendirdiği saptanmıştır.



Şekil 4.5 Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 1

Uygunluk matrisinde makine işlem uygunluğu olmayan durumların işlem süresine sıfır atandığı senaryo parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonu için de ele alınacaktır ve bu senaryodaki diğer veriler 1. veri setinde olduğu haliyle ele alınacaktır. Bu durum için parça-makine eşleşmesinin olmadığı yani işleme matrisine sıfır değerinin atandığı durumlar için işleme süresi matrisine 0 değeri atanmıştır. Fakat atama işlemlerinin Çizelge 4.19'daki haliyle atandığı gözlemlendi ve çizelge de buna bağlı olarak Şekil 4.5 ile birebir aynıdır.

Çizelge 4.19 Atama veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 1

Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	0	0	X_{221}	1	0
X_{112}	0	0	X_{222}	0	0
X_{113}	1	14	X_{223}	0	0
X_{114}	1	20	X_{224}	1	39
X_{211}	0	0	X_{131}	1	0
X_{212}	0	0	X_{132}	1	6
X_{213}	1	33	X_{133}	0	0
X_{214}	0	0	X_{134}	0	0
X_{121}	0	0	X_{231}	0	0
X_{122}	0	0	X_{232}	1	18
X_{123}	0	0	X_{233}	0	0
X_{124}	0	0	X_{234}	0	0

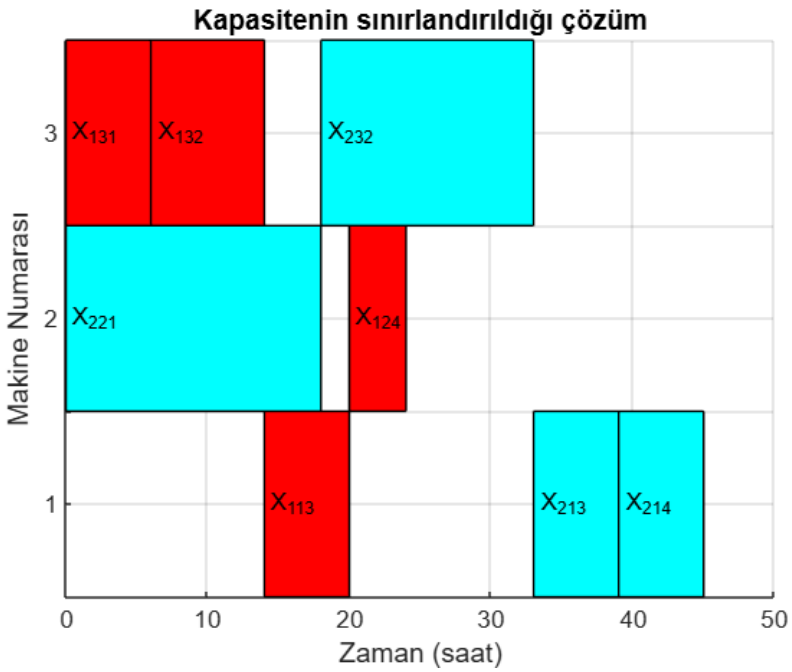
Şekil 4.5 incelendiğinde makine önü bekleme zamanlarının olmadığı, hiç bekleme olmadan parçaların işleme alındığı görülmüştür.

Ele alınan durumları özetleyecek olursak, matematiksel model de oluşturulan 2 kısıtı, atama yapılacak parçaların makine- operasyon uygunluk durumunu kontrol etme anlamında parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu için de modeli doğru bir şekilde yönlendirdiği söylenebilmektedir.

2. **Makine kapasitelerinin sınırlandırıldığı durum için yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 2)**

   Makine kapasitelerinin değiştirilmesiyle elde edilecek olan atamaları ve çözümü incelemek amacıyla makine sayıları ve diğer parametreler 1. veri setinden alınarak makine kapasite değerleri sırasıyla saat cinsinden C_1= 40, C_2= 60 ve C_3= 40 olarak sınırlandırılmış ve parçaların bitiş zamanlarının en küçüklenmesi amaç fonksiyonuyla modelde çözdürülmüştür. Atama veri çizelgesi ve ilgili gannt chart Çizelge 4.20 ve Şekil 4.6'da sunulmaktadır.

   Yapılan analizler sonucunda, atamaların ilk senaryodaki atamalardan farklı sonuç elde edilirken, elde edilen çözümün aynı optimal değere ulaştırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, model tutarlılığını ortaya koymakta olup, matematiksel modelin problemin çözümünde kullanılabilecek uyumda olduğu söylenebilir. Böylece, farklı atama kombinasyonlarının optimal sonucu değiştirmediği, ancak çözüm kümesinde çeşitlilik



Şekil 4.6 Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 2

oluşturduğu bu amaç fonksiyonu için de söylenebilir.

Bu analiz, farklı atama kombinasyonlarının aynı optimal çözümü sağlayabileceğini ve modelin çözüm kümesinde çeşitlilik sunduğunu test edilen amaç fonksiyonu için de ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, modelin kapasite değişimlerine duyarlılığı gözlemlenmiş ve optimal sonucun ilgili amaç fonksiyonu için de yalnızca tek bir atama kombinasyonuna bağımlı olmadığı durumu ilgili amaç fonksiyonu için de doğrulanmıştır. Analiz edilen senaryolar üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu için incelendiğinde, geliştirilen modelin farklı parçaların farklı operasyonlarını uygun makinelere etkin bir şekilde atayabildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde makine önü bekleme zamanlarının olmadığı, hiç bekleme olmadan parçaların işleme alındığı görülmüştür.

Senaryo genel olarak incelendiğinde, farklı senaryolar altında elde edilen alternatif atama kombinasyonlarına rağmen çözüm sonucun değişmemesi, algoritmanın kararlılığını ve tutarlılığını göstermektedir. Bu bulgu, modelin farklı makine kapasiteleri ve teknik gereksinimlere uyum sağlayarak çeşitli üretim senaryolarına uygulanabilirliğini desteklemektedir.

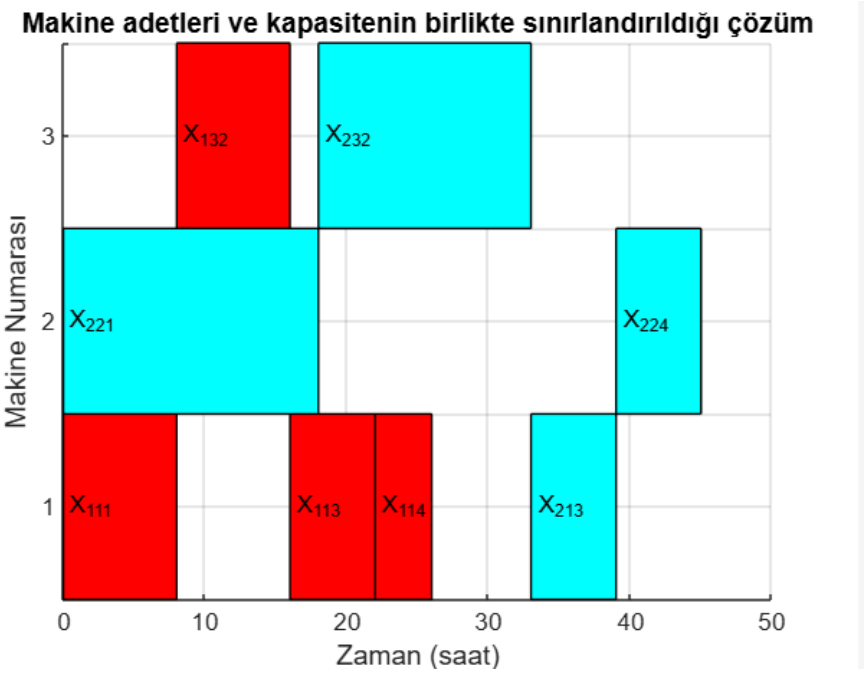
Çizelge 4.20 Optimal veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 2

Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	0	0	X_{221}	1	0
X_{112}	0	0	X_{222}	0	0
X_{113}	1	25	X_{223}	0	0
X_{114}	0	0	X_{224}	1	39
X_{211}	0	0	X_{131}	1	0
X_{212}	0	0	X_{132}	1	6
X_{213}	1	33	X_{133}	0	0
X_{214}	0	0	X_{134}	0	0
X_{121}	0	0	X_{231}	0	0
X_{122}	0	0	X_{232}	1	18
X_{123}	0	0	X_{233}	0	0
X_{124}	1	31	X_{234}	0	0

3. **Makine kapasitelerinin ve adetlerinin aynı anda sınırlandırıldığı durum için yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 3)**

   Bir önceki bölümde en büyük gecikmelerin/ erken teslimatların en küçüklenmesi amaç fonksiyonuyla gerçekleştirilen senaryoyla benzer şekilde hem makine sayısı hem de makine kapasitesi sınırlandırılmıştır. Aynı senaryo parçaların bitiş zamanlarının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu için de ele alınmıştır. Benzer olarak makine kapasiteleri C_1= 25, C_2= 25 ve C_3= 26 saat ile sınırlandırılmış ve makine sayıları m_1= m_2= m_3= 1 olarak ele alınmıştır. Elde edilen analizin atama sonuçları ve çizelgesi Şekil 4.7 ve Çizelge 4.21'de sunulmaktadır.

   Parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu değeri senaryo 1 ve senaryo 2 de olduğu gibi 45'tir. Bir önceki amaç fonksiyonuyla analiz edilen senaryoda elde edildiği gibi kapasite kısıtıyla birlikte çizelge optimal atamalar yapmıştır. Burada makine kullanım oranlarının ve parçaların bitiş zamanlarının diğer senaryolara göre optimal atandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7 Gannt chart (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 3

Çizelge 4.21 Atama veri çizelgesi (2. amaç fonksiyonu)- senaryo 3

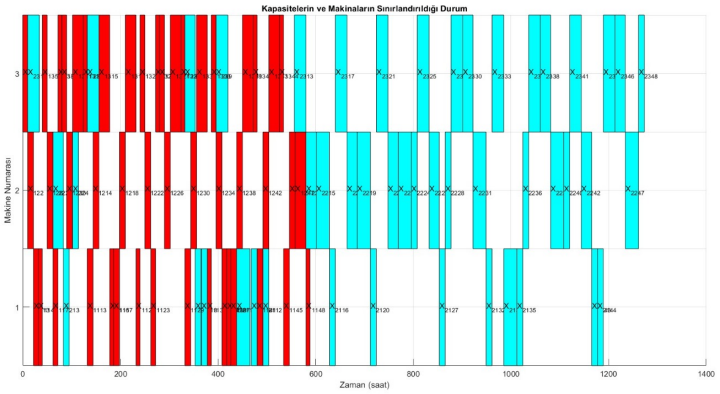
Değişkenler	x_{ijk}	t_{ijk}	**Değişkenler**	x_{ijk}	t_{ijk}
X_{111}	1	0	X_{221}	1	0
X_{112}	0	0	X_{222}	0	0
X_{113}	1	16	X_{223}	0	0
X_{114}	1	22	X_{224}	1	39
X_{211}	0	0	X_{131}	0	0
X_{212}	0	0	X_{132}	1	8
X_{213}	1	33	X_{133}	0	0
X_{214}	0	0	X_{134}	0	0
X_{121}	0	0	X_{231}	0	0
X_{122}	0	0	X_{232}	1	18
X_{123}	0	0	X_{233}	0	0
X_{124}	0	0	X_{234}	0	0

Şekil 4.7 incelendiğinde makine önü bekleme zamanlarının olmadığı, hiç bekleme olmadan parçaların işleme alındığı görülmüştür.

4. **Genişletilmiş operasyon sayısı ile yapılan model doğrulama senaryosu (senaryo 4)**

   1. veri seti ile yapılan analizlerden sonra parçaların bitiş zamanları toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu da problemin boyutu büyüdüğünde nasıl davranışlar sergiliyor, inceleyebilmek adına rastgele verilerle 48 operasyon ile model çalıştırılmış ve elde edilen çizelge Şekil 4.8'de sunulmuştur. Modelin büyük operasyon sayılarında da uygun çözüm bulduğu ve uygun çizelge elde ettiği görülmüştür.

   Şekil 4.8'de verilen çizelge modelin büyük boyutta veriler üzerinde de etkili çalıştığını kanıtlar niteliktedir. Modelin gerçek veri üzerinde çalışabileceğine dair destekleyici bir öngörü oluşturmuştur.



Şekil 4.8 Gannt chart (2. amaç fonksiyonu ve operasyon sayısı 48) - senaryo 6

4.4. Hipotetik Veri Seti (2. Veri Seti) İle Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde veri analizi bölümünde yer alan Çizelge 4.6'da uniform dağılım değerleri kullanılarak nispeten küçük ve uniform dağılıma sahip veri setleri elde edilmiştir. Bu veri setleri aynı bölümde tanımlanan Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'deki parametrelerle iki farklı amaç fonksiyonunda performans analizi gerçekleştirmek amacıyla girdi olarak kullanılmıştır. Simülasyon, uniform dağılımla üretilmiş 20 farklı veri seti üzerinde çalıştırılmıştır. En büyük gecikme/erken teslimat en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile her parçanın bitiş zamanlarının minimize edilmesinin amaçlandığı fonksiyonlar kullanılmış ve bu çözümler üzerinden karşılaştırılmıştır. Tüm simülasyonlar için her iki amaç fonksiyonu içinde sırasıyla amaç

fonksiyonu değeri, makine 1 kullanım oranı, makine 2 kullanım oranı, makine 3 kullanım oranı, CPU ve karşıt amaç fonksiyonundaki değerleri elde edilmiştir Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'de gösterilmektedir. Ayrıca her bir parametre için ilgili parametrelerin maksimumu, minimumu, ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır, Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'de görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en büyük gecikme/ erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonuna göre en düşük gecikme/erken teslimat değeri 0.97, en yüksek değer ise 21.70 olarak belirlenmiştir. Her parçanın toplam üretim bitiş zamanlarının minimize edildiği amaç fonksiyonunda ise üretimin minimum tamamlanma zamanı 74.78 olarak hesaplanırken, üretimin maksimum tamamlanma zamanı 112.77 olarak hesaplanmıştır. Makinelerin kullanım oranları açısından değerlendirildiğinde, yük dağılımının veri setine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazı durumlarda ise aynı problemde farklı amaç fonksiyonlarında farklı atamalar ve çözümler elde edilmiştir. Bu durumda ilgili simülasyon için alternatif çözümlerin olduğu yorumu yapılabilmektedir. Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22 incelendiğinde, hemen hemen tüm parçaların gecikmeye maruz kaldığından bahsedilebilir. Bu duruma bakılarak matematiksel modelin üretim sürecini sıkıştırarak, ardışık atamalar gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklenmesini hedefleyen amaç fonksiyonu ile en büyük gecikme/ erken teslimatların en küçüklenmesi amaç fonksiyonunun benzer makine kullanım oranlarına sahip olmasına neden olmaktadır.

Bu farklılığın en önemli nedeni, gecikme yaşamayan parçalar için alternatif atamaların değerlendirilmesi ve bu doğrultuda optimal çözümün seçilmesidir. Böylece, gecikmeye uğramayan parçalar için farklı makineler tercih edilebilmekte ve bu durum bazı simülasyonlarda makine kullanım oranlarında belirgin değişiklikler meydana getirmektedir. Sonuç olarak, teslimat süreleri ile üretim süreleri arasındaki ilişki, matematiksel modelin üretim planlamasını nasıl yönlendirdiğini ve farklı amaç fonksiyonları altında nasıl şekillendiğini önemli ölçüde etkilemektedir.

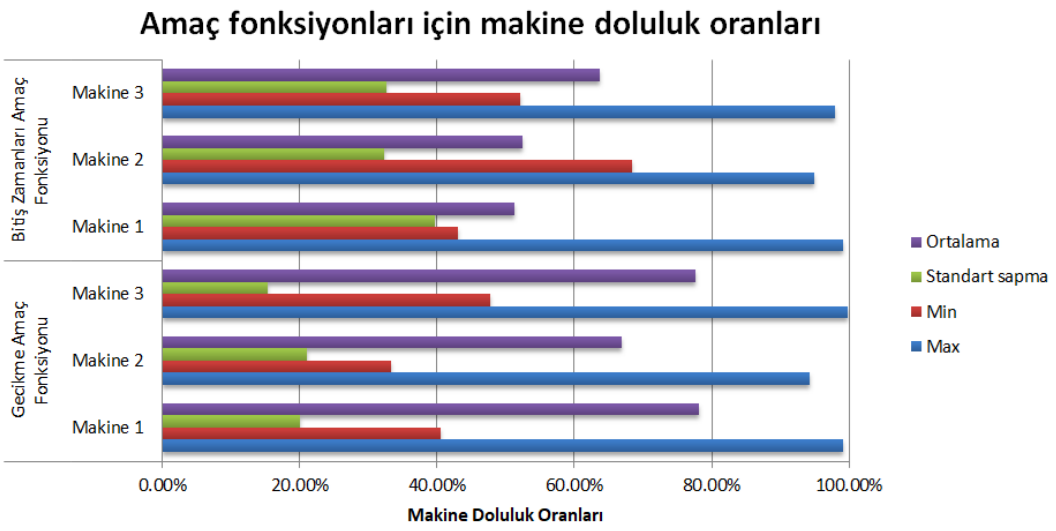
Standart sapma değerleri, en büyük gecikme/erken teslimatın en küçüklendiği amaç

fonksiyonuna göre 5.94 değerini alırken, toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu için 12.05 değerini almıştır. Bu durum, toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonuna yönelik üretim stratejilerin daha büyük değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. CPU süreleri açısından değerlendirildiğinde, her iki amaç fonksiyonu için model çözüm süresinin oldukça düşük olduğu söylenebilmektedir. Her amaç fonksiyonunun ele alınan durumda diğer amaç fonksiyonundaki değerleri de hesaplanmıştır. Beklenildiği üzere en büyük gecikme/ erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonuyla çalıştırılan model, toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonuna göre daha kötü bir üretim bitiş zamanı sunarken, daha iyi bir gecikme/erken teslimat değeri sunmaktadır. Tam tersi durumda ise toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonuyla çalıştırılan model, en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonuna göre daha kötü bir en büyük gecikme/erken teslimat değeri sunarken, daha iyi bir toplam üretim bitiş zamanı sunmaktadır. Bu durum modellerin beklenen şekilde çalıştığını kanıtlar niteliktedir.

Sonuç olarak, uniform dağılım değerlerine sahip bir veri setiyle yapılan bu simülasyonlar, optimizasyon kriterlerinin sistem performansı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Ancak, veri setinin sınırlı olması nedeniyle elde edilen bulguların genellenebilirliği nispeten düşüktür. Gerçek veri setiyle yapılacak çalışmalarda, daha büyük bir veri seti ile modeller tekrar test edilecektir.

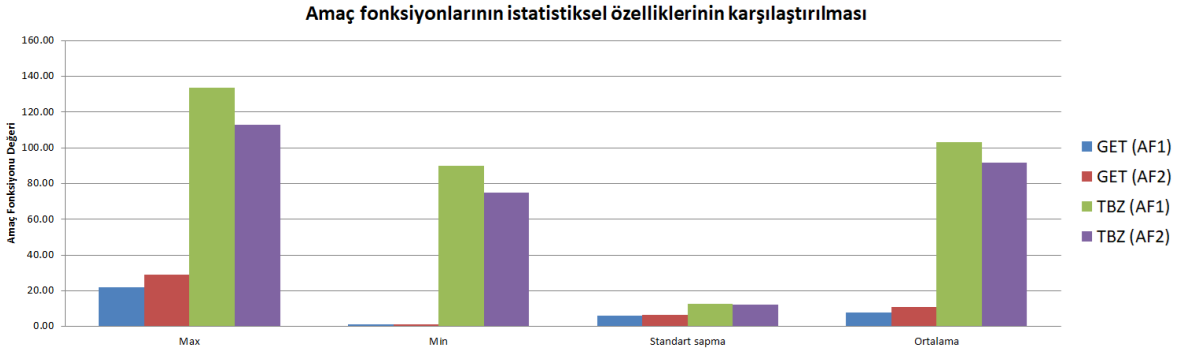
Şekil 4.9'da, iki farklı amaç fonksiyonu olan toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu ve en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu için üç farklı makinenin doluluk oranları; ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler üzerinden karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.9 incelendiğinde toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonunun, en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonuna göre makine doluluk oranlarının yüksek ve standart sapmalarının düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9 Makine doluluk oranlarının amaç fonksiyonları için karşılaştırılması

Bu durumda toplam üretim bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonunun makine kaynaklarını daha dengeli dağıttığı söylenebilmektedir. En büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu ise bazı makineleri yoğun kullanırken, bazılarını daha az kullanmıştır. Bu durumda bazı makinelerin aşırı yüklendiği ve diğer makinelerin nispeten boş kalmasına sebep olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.10 Amaç fonksiyonu değerleri için istatistiksel özelliklerin karşılaştırılması

Şekil 4.10'da en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonuna ait sonuçların istatistiksel özelliklerinin karşılaştırıldığı bir grafik görülmektedir. Grafikte GET gecikme ve erken teslimat modelini temsil ederken, TBZ toplam bitiş zamanları modelini temsil eder.

Çizelge 4.22 Gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi

Gecikme/ Erken Teslimat Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU(sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	20.00	73.33%	96.00%	97.50%	0.1	130.00
1. senaryo	2.47	90.17%	33.25%	68.35%	0.1	91.39
2. senaryo	0.97	90.05%	47.92%	74.22%	0.2	90.00
3. senaryo	7.60	43.01%	54.81%	64.73%	0.1	92.25
4. senaryo	2.24	53.83%	68.43%	68.25%	0.2	107.79
5. senaryo	7.85	95.75%	72.15%	68.04%	0.1	92.01
6. senaryo	12.08	94.17%	94.34%	87.30%	0.1	110.34
7. senaryo	7.07	40.56%	47.00%	93.94%	0.1	99.21
8. senaryo	7.53	89.46%	40.14%	97.91%	0.2	105.06
9. senaryo	2.56	90.52%	41.97%	77.13%	0.2	90.00
10. senaryo	2.19	65.41%	63.76%	88.19%	0.1	94.38
11. senaryo	20.24	95.34%	90.29%	89.04%	0.1	130.48
12. senaryo	2.47	90.17%	33.25%	68.35%	0.1	104.73
13. senaryo	5.42	44.54%	83.93%	99.75%	0.1	100.84
14. senaryo	4.67	99.18%	70.36%	62.29%	0.1	97.33
15. senaryo	3.42	59.91%	58.87%	77.76%	0.1	98.89
16. senaryo	11.10	64.43%	86.20%	47.73%	0.1	104.10
17. senaryo	21.70	84.47%	87.28%	95.85%	0.1	133.40
18. senaryo	15.09	92.71%	84.43%	95.73%	0.1	120.18
19. senaryo	10.50	92.21%	90.03%	52.07%	0.2	93.51
20. senaryo	5.64	86.17%	90.71%	76.31%	0.1	104.34
Max	21.70	99.18%	94.34%	99.75%	0.2	133.40
Min	0.97	40.56%	33.25%	47.73%	0.1	90.00
Ort.	7.64	78.10%	66.96%	77.65%	0.13	103.01
Std. Sapma	5.94	19.98%	21.04%	15.35%	0.04	12.57

AF1 gecikme ve erken teslimat amaç fonksiyonu değerini temsil ederken, AF2 toplam bitiş zamanları amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu, gecikme/erken teslimat modeli kombinasyonu, en düşük maksimum, ortalama ve standart sapma değerlerine sahip olması ile dikkat çekmektedir. Bu durum, söz konusu kombinasyonun istenildiği gibi hem düşük amaç fonksiyonu değeri hem de istikrarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Diğer yandan, toplam bitiş zamanları amaç fonksiyonu, gecikme/erken teslimat modeli kombinasyonu, hem en yüksek maksimum ve ortalama değerlere hem de en yüksek standart sapmaya sahiptir. Bu durumda ilgili kombinasyonun performans açısından tutarsız ve maliyetli sonuçlar ürettiği açıkça söylenebilmektedir. Minimum değerler açısından incelendiğinde ise tüm kombinasyonlar arasında en uygun

Çizelge 4.23 Bitiş zamanı amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi

Bitiş Zamanları Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU(sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	119.00	100.00%	90.00%	85.00%	0.1	29.00
1. senaryo	81.04	90.17%	33.25%	68.35%	0.1	7.86
2. senaryo	89.95	90.05%	47.92%	74.22%	0.4	1.02
3. senaryo	76.30	43.01%	54.81%	77.35%	0.4	8.59
4. senaryo	86.24	53.83%	68.43%	68.25%	0.2	17.57
5. senaryo	92.01	95.75%	72.15%	68.04%	0.1	7.85
6. senaryo	110.34	94.17%	94.34%	87.30%	0.1	12.08
7. senaryo	76.06	62.93%	65.10%	38.58%	0.3	8.50
8. senaryo	95.33	89.46%	40.14%	97.91%	0.1	7.53
9. senaryo	78.99	90.52%	41.97%	77.13%	0.1	6.60
10. senaryo	92.53	65.41%	40.53%	88.19%	0.3	2.19
11. senaryo	109.36	95.34%	90.29%	89.04%	0.1	20.24
12. senaryo	88.30	42.25%	70.18%	26.34%	0.1	8.65
13. senaryo	95.23	44.54%	89.82%	80.97%	0.1	9.99
14. senaryo	96.22	86.16%	83.73%	62.29%	0.5	5.45
15. senaryo	77.17	37.09%	58.87%	91.52%	0.1	16.25
16. senaryo	74.78	30.64%	67.06%	65.18%	0.5	15.63
17. senaryo	112.77	99.15%	94.97%	88.84%	0.3	28.94
18. senaryo	108.32	92.71%	84.43%	95.73%	0.1	15.09
19. senaryo	93.51	92.21%	90.03%	52.07%	0.1	10.50
20. senaryo	97.29	89.47%	81.94%	62.17%	0.4	8.00
Max	112.77	99.15%	94.97%	97.91%	0.5	28.94
Min	74.78	43.01%	68.43%	52.07%	0.1	1.02
Ort.	91.59	51.22%	52.41%	63.65%	0.22	10.93
Std. Sapma	12.05	39.64%	32.30%	32.58%	0.15	6.51

çözüme ulaşanlar, gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonunu kullanan modeller olmuştur. Model ve amaç fonksiyonunun uyumlu olduğu kombinasyonlarda daha tutarlı sonuçlar elde edildiği de gözlenmiştir. Genel olarak, elde edilen bulgular, amaç fonksiyonu ve modelin uyumunun çözüm kalitesi üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerin sonucuna bakıldığında, her iki amaç fonksiyonunun da büyük ölçüde birbirine yakın makine kullanım oranları elde edilse de amaç fonksiyonu değerleri kıyaslandığında farklı atama düzenleri oluşturduğuna işaret etmektedir. Bu benzerliğin temel sebeplerinden biri, teslimat sürelerinin parça üretim sürelerine kıyasla düşük belirlenmiş olmasıdır. Teslimat sürelerinin artırıldığı durumda makine kullanım oranlarının değişeceği ve farklı atama sonuçlarının elde edilebileceği öngörülmektedir. Bu anlamda teslimat

sürelerinin artırıldığı bir simülasyon seti oluşturulmuştur. Aynı şekilde diğer parametreler sabit tutulup, kapasite artırıldığında da farklı sonuçlar elde edilebileceği öngörülmüştür. Bu nedenle verilen kısıtlı teslimat tarihleri ve kapasiteler artırıldığında simülasyonda oluşacak değişiklikler incelenecektir. Bu bağlamda iki farklı durum incelenecektir.

1. Teslimat zamanları sabit tutulurken, kapasite değerlerinin artırıldığı durum
2. Kapasite değerleri sabit tutulurken, teslimat zamanlarının uzatıldığı durum

1. Teslimat zamanları sabit tutulurken, kapasite değerlerinin artırıldığı durum

Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'da verilen analizdeki teslimat zamanları sabit alınıp, kapasite değerleri $C_1 = 60$, $C_2 = 100$ ve $C_3 = 80$ olarak güncellenmiştir ve yeni bir analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucu Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25'de verilmiştir. Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25'de görüldüğü üzere makine kullanım oranları Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'daki oranlara nazaran çok daha düşüktür. Örneğin; Makine 1'in ortalama kullanım oranı Çizelge 4.22'da %78.10 oranındayken Çizelge 4.24'de %48.22 değerine gerilemektedir. Bu durum, kapasite artırımıyla birlikte makine kullanım oranlarının düştüğünü kanıtlar niteliktedir. En büyük gecikme/erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonu kullanıldığında, simülasyonların ortalama amaç fonksiyon değeri 6.34 olarak gerçekleşmiştir ve bu değer, zamanlama açısından oldukça başarılı bir performansa işaret etmektedir. Aynı zamanda 6.93 değeri alan düşük standart sapma, modelin yüksek kararlılıkla çalıştığını, yani farklı senaryolarda benzer kalitede çözümler ürettiğini göstermektedir. Bu yaklaşımda müşteri teslim tarihine tam uyum, sistemin önceliğidir. Toplam bitiş zamanı ise ortalama 96.60 değeri ile makul seviyede kalmıştır ancak bu modelin temel odak noktası değildir. Öte yandan, toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu kullanıldığında, toplam üretim süresi ortalama 87.97 değeri ile ilk amaç fonksiyonuna göre daha da düşürülmüştür. Ancak teslimat uyumu açısından performans zayıflamış; gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonunun ortalama değeri 10.66 değerine yükselmiştir. Ayrıca,toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonunda 12.06 değeri alan standart sapma, modelin daha az istikrarlı olduğunu, yani bazı durumlarda çok iyi, bazı

durumlarda ise daha zayıf sonuçlar verdiğini göstermektedir. Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25'deki durumda üretim hattına yeni siparişler alınmasında bir sakınca yokken, Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'de görüldüğü üzere üretime yeni siparişler dahil etmenin oldukça güç olduğu görülmektedir.

2. Kapasite değerleri sabit tutulurken, teslimat zamanlarının uzatıldığı durum

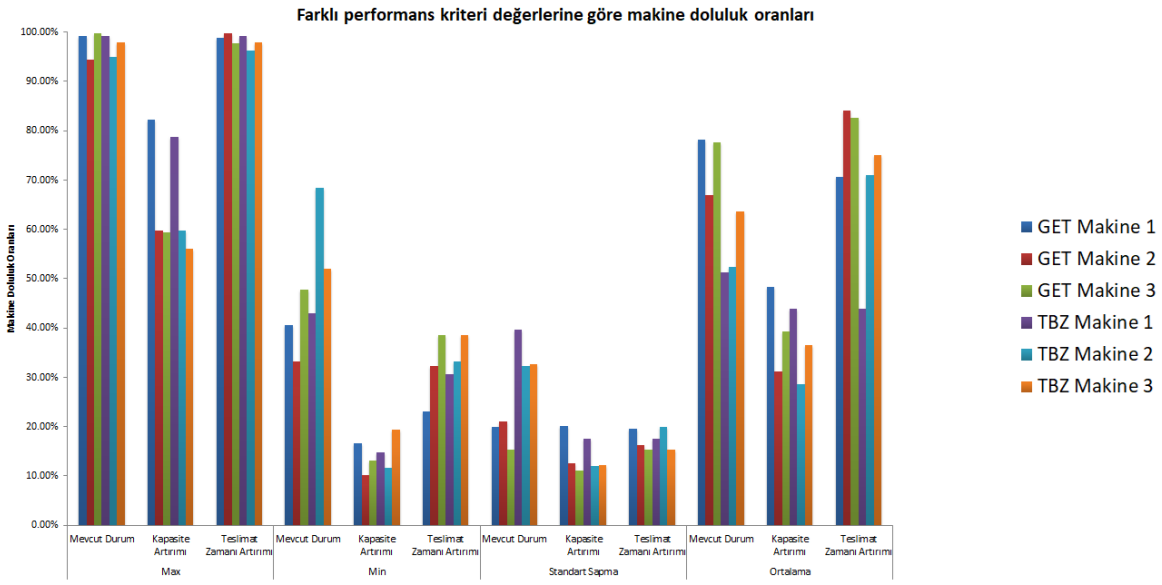
Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.22'de verilen analizdeki kapasite değerleri sabit alınıp, teslimat zamanları $D_1 = 80$ ve $D_2 = 100$ olarak güncellenmiştir ve yeni bir analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucu Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.26'da en büyük gecikmenin/erken teslimatların en küçüklenmek istendiği amaç fonksiyonundaki simülasyonlar incelendiğinde amaç fonksiyonu değerinin sıfır yani optimal değeri aldığı tüm simülasyonlarda görülmektedir. Beklenildiği gibi teslimat zamanları genişletildiğinde sistemin gecikme olmadan çalıştığı gözlemlenmiştir. Makine kullanımı ortalama değerleri incelendiğinde Makine 1 için ortalama %70.57, Makine 2 için %84.07 ve Makine 3 için %82.64 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler modelin yüksek ve dengeli sayılabilecek makine atamaları gerçekleştirdiğini kanıtlar niteliktedir. En büyük gecikmenin/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu için hem gecikmelerin olmadığı hem de makinelerin dengeli ve verimli çalıştığı söylenebilir.

Bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonunda ise çok daha erken sürede biten çizelgeler elde edilebilmiştir. Buna karşılık, toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu altında ortalama amaç fonksiyonu 91.13 değerini alırken, 12.83 değerinde bir standart sapmaya sahip olması, senaryolar arasında yüksek varyans olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca Makine 1 kullanım oranı belirgin biçimde düşerek %43.88'e gerilemiştir. Bu durum, bu amaç fonksiyonunun işleri daha erken bitirmeye odaklanırken bazı kaynakları yeterince etkin kullanmadığını göstermektedir ve toplam bitiş süresini minimize ederken dengesiz makine atamaları elde etmektedir. Sonuç olarak, teslimat tarihlerine tam uyumun ve kaynak kullanım verimliliğinin öncelikli olduğu sistemlerde en büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonu, toplam üretim

süresinin kısaltılmasının öncelikli olduğu esnek üretim sistemlerinde ise bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonu daha uygun bir seçim olarak değerlendirilebilir.

Çizelge 4.23, Çizelge 4.22, Çizelge 4.24, Çizelge 4.25, Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27 çizelgelerindeki simülasyonlar ve istatistiksel özelliklerini kıyaslayabilmek amacıyla Şekil 4.11'de verilen grafik oluşurulmuştur. Bu grafikte, mevcut durum, kapasite artırımı ve teslimat zamanı artırımı senaryoları altında, üç farklı makineye ait gecikme ve bitiş zamanları amaç fonksiyonlarının makine doluluk oranları bakımından senaryolar kıyaslanmıştır. Her senaryo için maksimum, minimum, standart sapma ve ortalama değerler değerlendirilmiştir.



Şekil 4.11 Farklı performans kriteri değerlerine göre makine doluluk oranları

Grafik incelendiğinde kapasite artırımı yapıldığı durumda makine doluluk oranlarının gözle görünür derecede azaldığı gözlemlenmektedir. Teslimat zamanının artırılmasının yani daha uzak bir tarihe ötelenmesinin makine doluluk oranlarına herhangi bir etki yapmadığı da ilk bakışta söylenebilmektedir.

Mevcut durumda makineler oldukça yüksek doluluk oranlarıyla çalışmaktadır. Bu durum sistem üzerinde yoğunluk oluşturmakta ve makineler arasında dengesiz bir dağılıma neden olmaktadır. Kapasite artırımı ile maksimum ve ortalama doluluk oranları belirgin

Çizelge 4.24 Makine kapasiteleri artırıldığında gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu için 20 farklı senaryo analizi

Gecikme/ Erken Teslimat Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU (sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	19.00	40.00%	53.00%	55.00%	0.6	122.00
1. senaryo	1.89	45.09%	16.62%	34.17%	0.2	91.39
2. senaryo	0.97	45.02%	23.96%	37.11%	0.4	91.94
3. senaryo	0.47	21.51%	43.88%	31.32%	0.3	92.25
4. senaryo	1.85	26.92%	34.21%	34.12%	0.2	107.79
5. senaryo	7.85	47.87%	46.06%	23.19%	0.3	103.91
6. senaryo	10.24	82.23%	22.72%	29.72%	0.4	105.57
7. senaryo	0.11	16.69%	32.55%	47.29%	0.3	99.21
8. senaryo	4.82	44.73%	11.71%	56.03%	0.4	92.63
9. senaryo	0.66	45.26%	20.98%	38.56%	0.4	90.00
10. senaryo	1.87	54.50%	18.48%	44.10%	0.2	93.74
11. senaryo	18.03	75.96%	43.61%	44.52%	0.3	126.06
12. senaryo	1.62	22.36%	37.54%	51.42%	0.4	95.78
13. senaryo	5.42	22.27%	41.97%	49.88%	0.4	100.84
14. senaryo	2.34	69.88%	35.18%	13.02%	0.3	92.86
15. senaryo	3.42	29.96%	29.44%	38.88%	0.2	100.66
16. senaryo	14.12	65.10%	10.21%	59.36%	0.3	118.24
17. senaryo	13.07	69.81%	37.01%	36.23%	0.4	116.66
18. senaryo	8.50	61.37%	28.86%	37.99%	0.4	96.08
19. senaryo	26.21	49.23%	59.71%	46.37%	0.2	126.40
20. senaryo	3.39	68.71%	27.00%	31.09%	0.8	96.78
Max	26.21	82.23%	59.71%	59.36%	0.8	126.40
Min	0.11	16.69%	10.21%	13.02%	0.2	1.08
Ort.	6.34	48.22%	31.09%	39.22%	0.34	96.60
Std Sapma	6.93	20.08%	12.60%	11.12%	0.14	25.21

şekilde azalmakta, makineler üzerindeki yük hafiflemekte ve kaynak kullanımı daha dengeli hale gelmektedir. Teslimat zamanının uzatıldığı durumda standart sapma değerleri bakımından en dengeli sonucu verdiği söylenebilmektedir. En büyük gecikme/erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonunun standart sapması incelendiğinde, daha iyi oranlarla daha esnek bir planlama sağlarken; bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği amaç fonksiyonunun standart sapması incelendiğinde daha değişken doluluk oranlarıyla çalışmakta olduğu ve bazı senaryolarda daha dengesiz kaynak kullanımı gösterdiği net bir şekilde söylenebilmektedir. Bu analizle, sistemin esnekliğini ve verimliliğini artırmak için kapasite ve zaman esnekliğinin ne kadar önemli olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonu

Çizelge 4.25 Makine kapasiteleri artırıldığında bitiş zamanları amaç fonksiyonu için 20 farklı senaryo analizi

Bitiş Zamanları Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU (sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	108.99	50.00%	36.00%	53.75%	0.2	19.00
1. senaryo	79.98	37.08%	16.62%	51.39%	0.7	9.74
2. senaryo	89.95	63.69%	23.96%	20.01%	0.8	1.02
3. senaryo	76.30	21.51%	27.41%	38.67%	1.1	8.59
4. senaryo	86.24	26.91%	34.21%	34.12%	0.8	17.57
5. senaryo	91.44	62.09%	36.07%	22.63%	1.1	7.85
6. senaryo	103.84	54.06%	47.17%	30.28%	0.9	12.08
7. senaryo	66.86	31.46%	32.55%	19.29%	1.3	8.50
8. senaryo	92.63	44.73%	11.71%	56.03%	1.2	4.83
9. senaryo	74.26	53.52%	20.98%	26.46%	0.4	9.14
10. senaryo	92.21	54.50%	18.48%	44.10%	0.1	1.87
11. senaryo	98.39	78.64%	33.83%	21.72%	0.2	21.00
12. senaryo	82.59	34.93%	20.49%	51.42%	0.8	9.03
13. senaryo	95.23	22.27%	44.91%	40.49%	0.6	9.99
14. senaryo	77.17	18.54%	29.44%	45.76%	0.4	16.25
15. senaryo	74.37	14.67%	18.03%	51.94%	0.9	7.57
16. senaryo	94.90	65.10%	14.55%	51.62%	1.3	14.12
17. senaryo	102.35	78.73%	26.12%	36.23%	0.2	13.07
18. senaryo	91.50	69.68%	28.86%	26.04%	1.4	8.50
19. senaryo	117.37	50.95%	59.71%	33.85%	0.8	26.21
20. senaryo	91.88	71.93%	26.99%	27.15%	1.2	6.18
Max	117.37	78.64%	59.71%	56.03%	1.4	26.21
Min	66.86	14.67%	11.71%	19.29%	0.1	1.02
Ort.	88.97	43.88%	28.60%	36.46%	0.81	10.66
Std Sapma	12.06	17.48%	11.93%	12.11%	0.39	6.11

özellikle teslimat tarihlerine uyumun kritik, kaynakların sınırlı ve sistemin daha dengeli çalışmasının istendiği durumlar için daha etkili bir performans sergilemektedir. Makineler arası yük dağılımını da daha homojen hale getirdiği ve düşük standart sapmalarla daha esnek bir üretim planlaması sunabileceği söylenebilir. Öte yandan, toplma bitiş zamanlarının en küçüklendiği amaç fonksiyonu, üretim süresinin mümkün olduğunca kısaltılmasının tek öncelik olduğu ve üretim kapasitesinin yoğun ve artırılabileceği senaryolarda daha avantajlı sonuçlar vermektedir. Ancak daha yüksek ve dengesiz makine doluluk oranları ve kaynak kullanımlarına bu bağlamda da daha verimsiz bir çizelgeye yol açabileceği söylenebilir. Sonuç olarak, hangi amaç fonksiyonunun tercih edileceği; sistemdeki kısıtlar, müşteri taleplerinin önemi ve üretim stratejilerine bağlı olarak değişebilmektedir.

Çizelge 4.26 Parçaların teslimat zamanlarının uzatıldığı durumda gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi

Gecikme/ Erken Teslimat Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU (sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	0.00	100.00%	96.00%	77.50%	0.10	180.00
1. senaryo	0.00	88.39%	88.96%	79.93%	0.10	180.00
2. senaryo	0.00	62.77%	77.37%	92.74%	0.10	180.00
3. senaryo	0.00	69.98%	32.32%	90.90%	0.10	180.00
4. senaryo	0.00	23.03%	98.24%	94.67%	0.10	180.00
5. senaryo	0.00	74.23%	99.59%	62.48%	0.10	180.00
6. senaryo	0.00	63.66%	86.61%	92.77%	0.10	180.00
7. senaryo	0.00	62.93%	65.10%	38.58%	0.10	180.00
8. senaryo	0.00	81.37%	92.11%	66.57%	0.10	180.00
9. senaryo	0.00	56.24%	96.54%	77.13%	0.10	180.00
10. senaryo	0.00	65.41%	92.58%	78.71%	0.10	180.00
11. senaryo	0.00	78.49%	94.39%	94.19%	0.10	180.00
12. senaryo	0.00	42.25%	87.94%	97.72%	0.20	180.00
13. senaryo	0.00	44.54%	89.82%	80.97%	0.10	180.00
14. senaryo	0.00	80.56%	83.73%	95.48%	0.10	180.00
15. senaryo	0.00	59.91%	58.87%	77.76%	0.10	180.00
16. senaryo	0.00	80.66%	94.05%	91.06%	0.10	180.00
17. senaryo	0.00	98.73%	78.90%	89.21%	0.10	180.00
18. senaryo	0.00	93.37%	99.81%	94.33%	0.10	180.00
19. senaryo	0.00	95.36%	82.58%	95.46%	0.10	180.00
20. senaryo	0.00	89.47%	81.94%	62.17%	0.10	180.00
Max	0.00	98.73%	99.81%	97.72%	0.20	180.00
Min	0.00	23.03%	32.32%	38.58%	0.10	180.00
Ort.	0.00	70.57%	84.07%	82.64%	0.11	180.00
Std Sapma	0.00	19.53%	16.25%	15.33%	0.02	0.00

4.4.1. Hipotetik Veri ile Amaç Fonksiyonları Arasındaki İlişkinin Analizi

Amaç fonksiyonları arasındaki ilişkinin detaylarını incelemek amacıyla Çizelge 4.23'teki verilerle Şekil 4.12'de sunulan pareto analizi oluşturulmuştur.

Şekil 4.12'de, her bir senaryonun iki farklı amaç fonksiyonuna göre aldığı değerler görselleştirilmiştir. Grafikteki gri noktalar tüm çözümleri, kırmızı işaret ise Pareto optimal (diğer tüm çözümler tarafından domine edilmeyen) senaryoyu temsil etmektedir. Pareto optimal çözüm, hem düşük gecikme/erken teslimat değerine hem de düşük bitiş zamanı değerine sahiptir. Bu durum, çok amaçlı karar problemlerinde tek bir çözümün diğerlerine

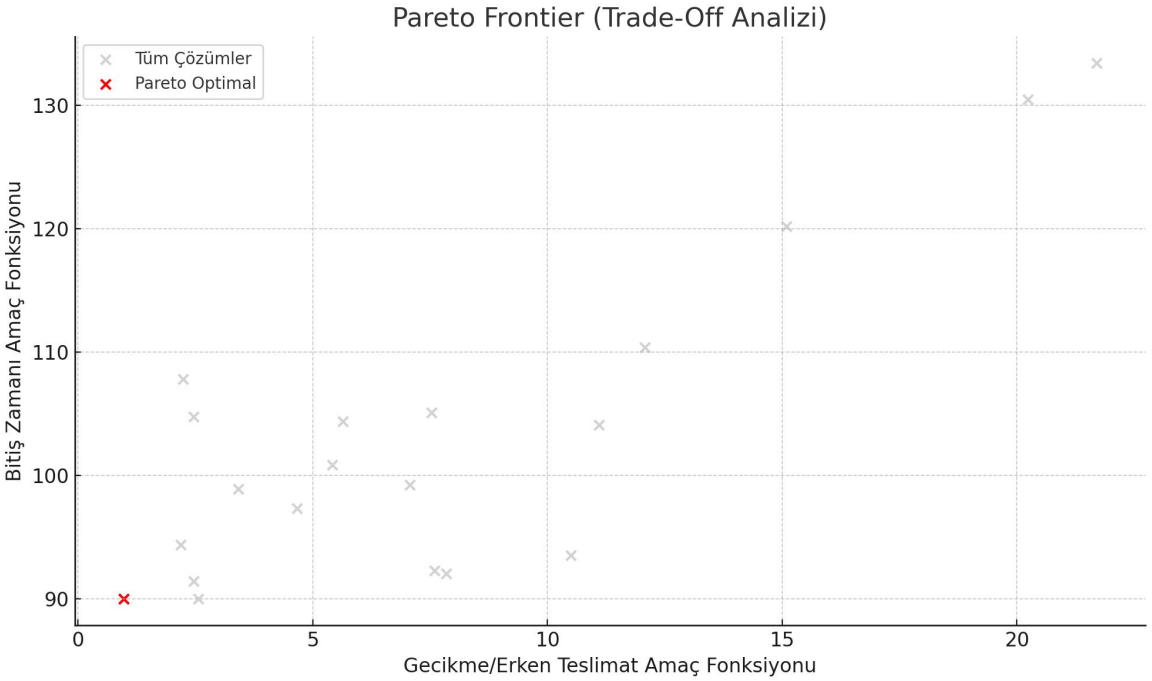
Çizelge 4.27 Parçaların teslimat zamanlarının uzatıldığı durumda bitiş zamanları amaç fonksiyonu ve uniform dağılımlı veri setiyle oluşturulan 20 farklı senaryonun analizi

Bitiş Zamanları Amaç Fonksiyonu						
Simülasyon	**Amaç F.**	**Mak. 1**	**Mak. 2**	**Mak. 3**	**CPU (sn)**	**Diğer Amaç F.**
Deterministik Durum	119.00	100.00%	90.00%	85.00%	0.10	0.00
1. senaryo	81.04	90.17%	33.25%	68.35%	0.20	0.00
2. senaryo	89.95	90.05%	47.92%	74.22%	0.40	0.00
3. senaryo	76.30	43.01%	54.81%	77.35%	0.30	0.00
4. senaryo	86.24	53.83%	68.43%	68.25%	0.20	0.00
5. senaryo	92.01	95.75%	72.15%	68.04%	0.10	0.00
6. senaryo	110.34	94.17%	94.34%	87.30%	0.10	0.00
7. senaryo	66.86	62.93%	65.10%	38.58%	0.20	0.00
8. senaryo	95.33	89.46%	40.14%	97.91%	0.10	0.00
9. senaryo	78.99	90.52%	41.97%	77.13%	0.10	0.00
10. senaryo	92.53	65.41%	63.76%	88.19%	0.20	0.00
11. senaryo	109.36	95.34%	90.29%	89.04%	0.10	0.00
12. senaryo	88.30	42.25%	96.22%	68.77%	0.10	0.00
13. senaryo	95.23	44.54%	89.82%	80.97%	0.10	0.00
14. senaryo	96.22	86.16%	83.73%	62.29%	0.40	0.00
15. senaryo	77.17	37.09%	58.87%	91.52%	0.10	0.00
16. senaryo	74.78	30.64%	67.06%	65.18%	0.40	0.00
17. senaryo	112.77	99.15%	94.97%	88.84%	0.20	0.00
18. senaryo	108.32	92.71%	84.43%	95.73%	0.10	0.00
19. senaryo	93.51	92.21%	90.03%	52.07%	0.10	0.00
20. senaryo	97.29	89.47%	81.94%	62.17%	0.40	0.00
Max	112.77	99.15%	96.22%	97.91%	0.40	0.00
Min	66.86	30.64%	33.25%	38.58%	0.10	0.00
Ort.	91.13	43.88%	70.96%	75.10%	0.20	0.00
Std Sapma	12.83	17.48%	19.97%	15.29%	0.12	0.00

göre baskın olabileceğini ve amaç fonksiyonları arasında ciddi bir denge olmadığını göstermektedir.

Bu çalışmada, iki farklı amaç fonksiyonu (gecikme/erken teslimat minimizasyonu ve toplam bitiş zamanı minimizasyonu) ayrı ayrı ele alınarak çizelgeleme çözümleri elde edilmiştir. Her bir amaç fonksiyonu için en uygun çözümler analiz edilmiştir.

Buna ek olarak, her iki amaç fonksiyonu birlikte değerlendirildiğinde ortaya çıkan ödünleşim ilişkisinin anlaşılabilmesi adına, çözüm senaryoları üzerinden bir Pareto frontier analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile, amaç fonksiyonlarının aynı anda uygun bir çözüm verdiği gözlemlenmiş ve her iki amaca göre de iyileştirme potansiyeli taşıyan, domine



Şekil 4.12 Amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim - pareto frontier

edilen çözümler tespit edilmiştir. Pareto frontier üzerinden yapılan bu değerlendirme, karar vericilere farklı senaryolar arasında denge sağlayan çözümleri seçme imkânı sunmaktadır. Bu nedenle farklı amaçlar için farklı çizelge ve çözümler isteniyorsa iki amaç fonksiyonunun ayrı ayrı ele alınmasında bir sakınca yoktur.

4.5. Gerçek Veri Seti (3.Veri Seti) İle Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde geliştirilen matematiksel modelin uygulanabilirliği, gerçek bir üretim ortamına ait verilerle test edilerek değerlendirilmiştir. Ele alınan problemdeki atölyeye ait gerçek hayat verileri, verilerin gizliliği sebebiyle belirlenen bir normalizasyon katsayısı ve normalizasyon yöntemi ile normalize edilmiştir.

Normalizasyon katsayısı değiştiğinde çözümlerin aynı oranda değişmesi gerekmektedir. Bu bağlamda rastgele verilerle bu durum test edilmiştir. Rastgele veriler iki farklı normalizasyon kat sayısına bölünerek iki ayrı çözüm elde edilmiştir ve bu çözümler Şekil 4.13'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13'de elde edilen çözümlere ait küçük bir kesit yer almaktadır.

Görüldüğü ve beklenildiği üzere x değerleri normalizasyon kat sayıları aynı atamaları alırken, t değerleri doğrusal katsayılarla aynı sonucu vermiştir. Bu durum normalizasyon katsayısı kullanmanın çözümü etkilemeyeceğini küçük bir örnekle kanıtlamaktadır.

x_10	t_10	x_20	t_20
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	6	1	3
0	0	0	0
0	0	0	0
1	8	1	4
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	20	1	10

Şekil 4.13 Normalizasyon kat sayısı kullanmanın çözüme etkisi

Bu bölümde problem 10 parça, 30 makine ve 30 operasyon için oluşturulan ve normalizasyon katsayısı ile normalize edilen 3. veri seti ile ele alınacaktır. Her bir parçanın üretim süreci, ilgili operasyonlar ve bu operasyonların gerçekleştirileceği makinelerle ilgili uyum parametreleri dikkate alınarak çözümlenecektir. Her bir parçaya ait teslimat zamanları, üretim planlamasının temel kısıtlarından birini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, parçaların teslimat süreleri sırasıyla 75, 120, 165, 210, 255, 300, 345, 277, 142 ve 232 saat olarak gerçek veri seti içinde verilmişti. Belirtilen teslimat zamanları, modelin amacı doğrultusunda kritik öneme sahiptir ve çözüm süreçlerinde dikkate alınan temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

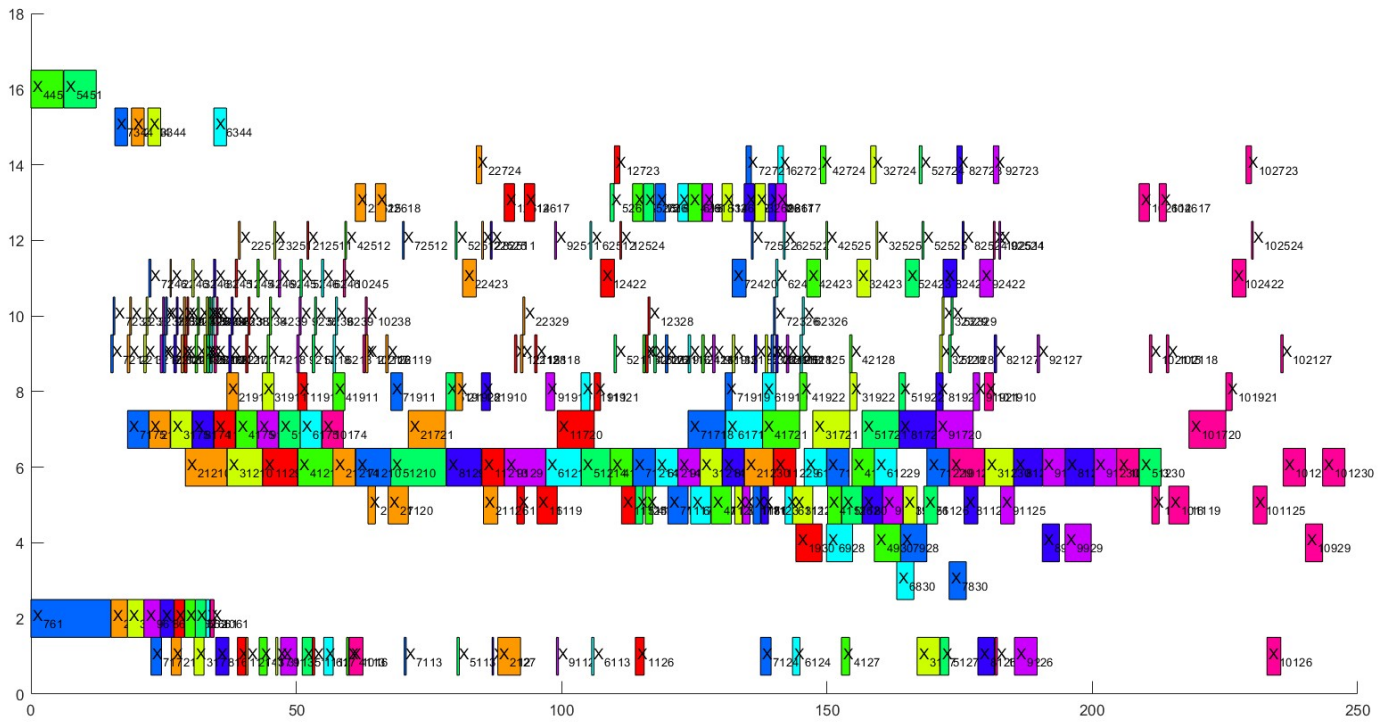
4.5.1. Mevcut Durumun Simülasyonu

Mevcut üretim sistemde atölyede üretim kararı verilirken, parçaların son ürün haline gelmesi sürelerinin uzun olması nedeniyle, sezgisel olarak en uzun işlem süresine sahip parçanın

önceliklendirilmesi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, t anında aynı makinede işlem sırası bekleyen parçalar arasından, en uzun işlem süresine sahip olan parçanın öncelikli olarak işleme alınması esas alınmaktadır. Bu şartlarda kullanılan yöntem için bir model oluşturulmuştur ve bu modelde gerçek veri seti kullanılarak bir dizi makine ataması gerçekleştirilerek çözüm elde edilmiştir. Bu yaklaşıma göre gerçek verilerle yapılan analiz sonucu, Şekil 4.14'de verilen çizelge de elde edilmiştir. Elde edilen çizelgede toplam bitiş zamanları amaç fonksiyonu değeri 1845.94 iken, en büyük gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu değeri 157.58 değerini almıştır. Şekil 4.14'de gerçek veri seti kullanılarak geliştirilen model çerçevesinde en uzun işlem süresine sahip parçanın önceliklendirilmesi (Longest Prosessing Time -LPT) ile oluşturulan üretim çizelgesini göstermektedir. Çizelgede yatay eksende zaman birimi yer alırken, dikey eksende makine numaraları yer almaktadır. Çizelgedeki renkli kutular parçaların her bir operasyonunu temsil ederken, aynı renge sahip olanlar aynı parçaya ait operasyonlardır ve parçaya ait rotayı temsil etmektedir. Bu bağlamda çizelge, her bir parçanın hangi makinede, hangi zaman diliminde işleme alındığını renkli bloklar ile görselleştirmektedir. Bu yaklaşımla, her bir makine üzerinde aynı anda işlem görmeyi bekleyen parçalar arasında en uzun işlem süresine sahip olanlara öncelik verilmiştir. Bu strateji sayesinde, toplam işlem süresinin dengelenmesi ve darboğazların en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Bu strateji, özellikle işleme sürelerinin dengesiz olduğu parçalardan oluşan bir üretim sisteminde, maksimum tamamlanma süresi (makespan) gibi kriterlerin iyileştirilmesinde etkili olabilir. Verilen çizelge de sistemdeki makine kullanım yoğunluklarını ve darboğazları tespit etmeye olanak sağlamaktadır.

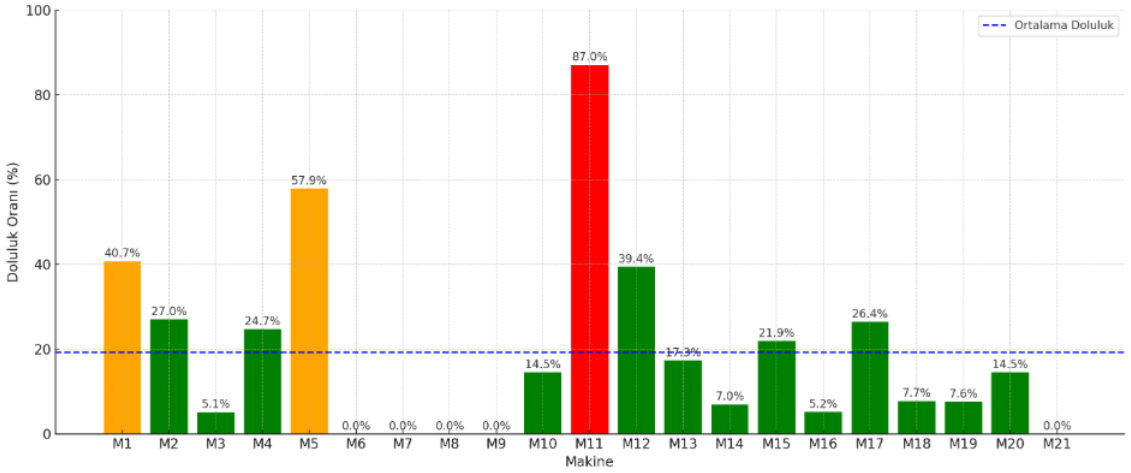
Şekil 4.15'te verilen grafik, makine yük dengesini göstermektedir. Her bir makinenin doluluk oranı yüzde olarak ifade edilmiştir:

Kırmızı sütunlar: %70 üzerindeki aşırı dolu makineler (örnek: M11) Turuncu sütunlar: %40–70 arası doluluk (örnek: M1, M5) Yeşil sütunlar: %0–40 arası doluluk (çoğu makine bu gruptadır) Mavi kesikli çizgi: Tüm makineler için ortalama doluluk oranını göstermektedir.



Şekil 4.14 Mevcut sistem simülasyonu ile elde edilen çizelge

Şekil 4.15'de görüldüğü üzere sistemin darboğaz makinesi sürekli kullanılan ve makineler arasındaki en yüksek yoğunluğa sahip olan M11'dir. Buna karşın bazı makinelerde örneğin, M3, M14, M16, M18, M19 makinelerinin çok düşük kullanımda olduğu gözüküyor. Bu durumun temel sebeplerinden biri rotada bu parçaların ilgili makinelere kısa süreli ve tek seferde uğramalarıdır.



Şekil 4.15 Makine yükleme oranları - En uzun işlem süresi modeli

Sonuç olarak makinelerin çoğu ortalama kullanım oranlarına sahiplerdir. Bu durum ilgili modelin makine-parça uyum kısıtlı olduğunu yani bir operasyonun yalnızca bir makinede yapılabildiği durumun modeli zorladığını açıkça göstermektedir. Bunun yanı sıra en uzun işlem süresinin önceliklendirildiği modeldin temel zayıflıklarından biri olarak da söylenebilir: yalnızca işlem süresine odaklanması, sistem genelinde makine yük dengesini göz ardı etmesi ilgili atamaları yönlendirmiştir.

4.5.2. Bitiş Zamanları Toplamının En Küçüklendiği Durum

Üretim süreçlerinde parçaların bitiş zamanları, teslimat takviminin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, bu bölümde üçüncü veri seti ve bir önceki senaryoda kullanılan girdilerle gerçek verilere dayalı bir analiz gerçekleştirilmiş ve bitiş zamanları toplamını en küçükleyen bir amaç fonksiyonu ile geliştirilen matematiksel model

uygulanmıştır. Söz konusu model, üretim sistemindeki tüm parçaların toplam akış süresini minimize etmeyi hedeflemekte ve bu doğrultuda çizelgeler oluşturmaktadır. İlgili veri seti model üzerinde test edilmiş ve elde edilen çizelge Şekil 4.16'da ve şekile ait makine doluluk oranlarına ilişkin veri Çizelge 4.17'de sunulmuştur. Parçaların toplam bitiş zamanları amaç fonksiyonu değeri 1281.10 değerini alırken, en büyük gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonu değeri 182.47 değerini almıştır. Bu durum bitiş zamanlarını en küçüklemeye çalışan modelin uygun bir çözüm elde ettiğini kanıtlar niteliktedir.

Modelin temel amacı, parçaların mümkün olan en kısa sürede tamamlanmasını sağlayarak toplam teslim süresini azaltmaktır. Gantt şeması incelendiğinde, işler arasında mümkün olduğunca ardışık bir atama yapıldığı gözlemlenmektedir. Bu durumun başlıca nedeni, üretim sürecinde bazı işlemler arasında öncül-ardıl ilişkiler bulunması ve modelin bu kısıtları dikkate alarak çizelge oluşturmasıdır. Bununla birlikte, modelin toplam üretim süresini minimize etme amacı doğrultusunda farklı parçaların farklı operasyonlarını ardışık şekilde işlemesi de söz konusudur. Bu yaklaşım, aynı zamanda makinelerin atıl kalma sürelerini en aza indirgemeye yönelik bir strateji olarak değerlendirilebilir.

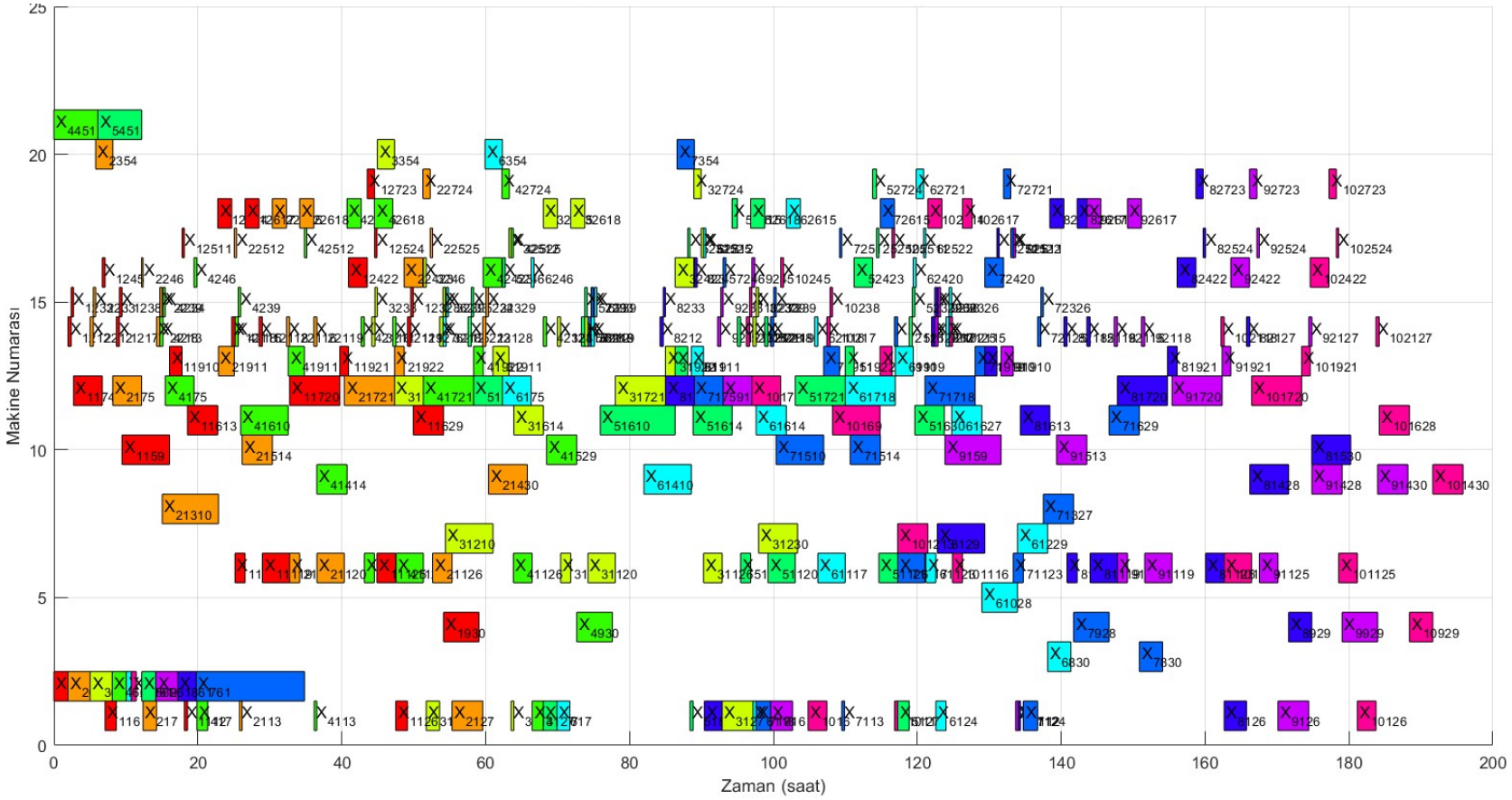
Çizelge detaylı biçimde incelendiğinde, bazı makinelere t_0 anında atama yapılmışken, birçoğunda t_0 anında herhangi bir atama bulunmamaktadır. Bu durumun temel nedeni, işlemler arasındaki öncüllük-ardıllık ilişkileridir; öncül işlem tamamlanmadan ardıl işleme geçilememektedir. Ayrıca, birden fazla parçanın aynı operasyonla başlaması durumunda, bu operasyonların ilgili makineye ardışık biçimde atanması gerekmekte ve makine kullanım oranlarında ciddi yoğunluğa yol açmaktadır. Öte yandan, bazı makinelerde atama sayısının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun temel sebeplerinden biri, bazı parçaların belirli operasyonlarının yalnızca belirli makinelerde gerçekleştirilebilmesine karşın, bazı parçaların da hiçbir operasyonunun ilgili makinelerde yapılamamasıdır.

Şekil 4.17 incelendiğinde, makinelerin doluluk oranlarının birbirinden farklılık gösterdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, bazı operasyonların birden fazla makinede gerçekleştirilebilmesi, ilgili problem için birden fazla geçerli çizelgenin oluşturulabilmesine

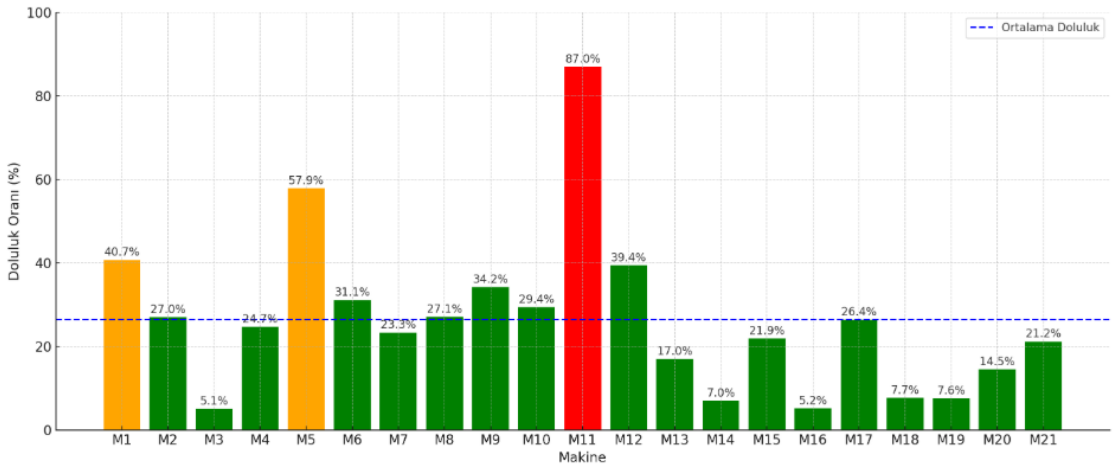
olanak tanımaktadır. Bu durum, çözüm uzayında alternatif çizelgelerin varlığını ortaya koymaktadır.

Üretim sürecinde yer alan makinelerin doluluk oranlarının birbirinden oldukça farklılık gösterdiği görülmektedir. En yüksek doluluk oranı %87.00 ile M11 makinesine ait olup, bu makineye üretim sürecinde yoğun biçimde atama yapıldığı görülmektedir. İlgili makine kritik operasyonlar için birden fazla parçanın ardışık işlemlerinde tercih edilmektedir. Öte yandan, M3, M14, M16, M18 ve M19 gibi makinelerde doluluk oranlarının %10'un oldukça altında olduğu dikkat çekmektedir. Bu makinelerin düşük oranda kullanılması, üç farklı şekilde açıklanabilir: İlk olarak, bu makinelerde gerçekleştirilebilecek operasyon sayısının sınırlı olması, ikinci olarak bazı durumlar için de ilgili makinelerin yalnızca belirli parçaların üretiminde görev alıyor olmasıdır. Son olarak ise, bazı operasyonlar için bu makinelerin yerine sistemde alternatif makinelerin var olmasıyla daha az tercih edilmeleridir. Genel olarak bakıldığında, M5 (%57.9), M1 (%40.70), M12 (%39.40) ve M9 (%34.20) gibi makinelerde orta-yüksek seviyede doluluk oranları görülmektedir. Bu makinelerin, üretim sürecinde daha dengeli ve etkin kullanıldıkları söylenebilir. Toplam bitiş zamanlarının en küçüklenmesi amaç fonksiyonunda 21 makine kullanılmıştır, bu durum ilgili modelin daha küçük bitiş zamanı elde edebilmek adına kullanabileceği makineleri çözüme dahil ettiğinin bir kanıtıdır.

Şekil 4.17'de makine yükleme oranları verilmiştir. Model, toplam bitiş zamanlarını minimize etmeye çalıştığı için işler zaman açısından verimli makinelere yönlendirilmiştir fakat bu durum, kaynak kullanım verimliliğini olumsuz etkilemiştir. Bazı makineler aşırı yüklenirken, bazıları daha az kullanılmıştır. Makine kullanım oranlarındaki bu çeşitlilik, sistemin operasyonel esnekliğine ve makine seçiminde modelin optimize edilmiş kararlar aldığına işaret etmektedir. Aynı operasyonun birden fazla makinede gerçekleştirilebilmesi durumlarında model, toplam üretim süresini minimize etmeye yönelik seçimler yaparak belirli makineleri yoğun şekilde kullanmış, bazılarını ise daha az tercih etmiştir. Bu durum ayrıca, üretim sisteminde alternatif çizelgelerin oluşturulabileceği, dolayısıyla farklı makine atama stratejileri ile benzer performans seviyelerine ulaşılabileceği olasılığını da açıkça ortaya koymaktadır.



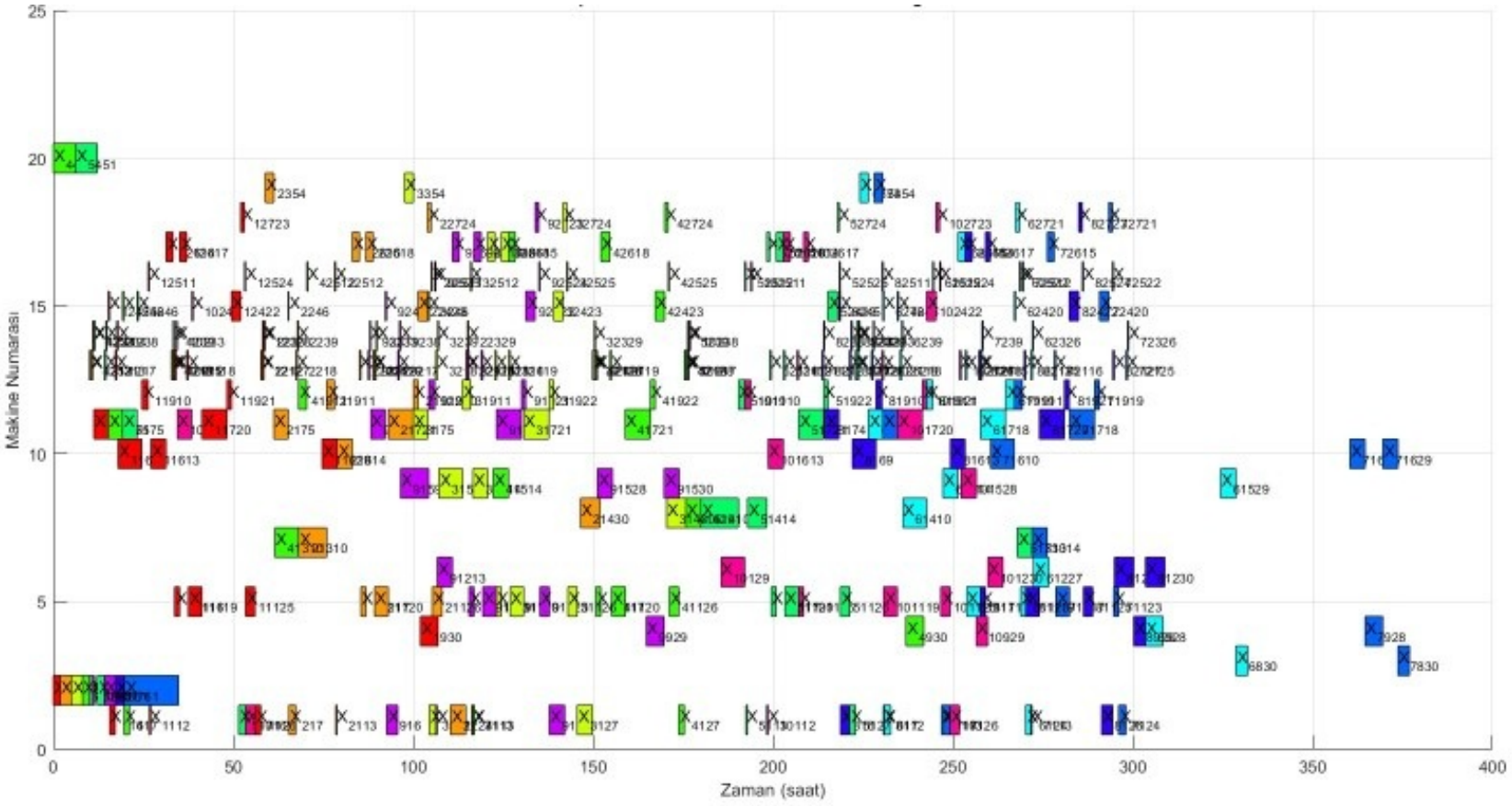
Şekil 4.16 Üretim bitiş zamanlarının en küçüklemesi amaç fonksiyonu ile elde edilen çizelge



Şekil 4.17 Makine yükleme oranları - bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği model

4.5.3. En Büyük Gecikme/Erken Teslimatların En Küçüklendiği Durum

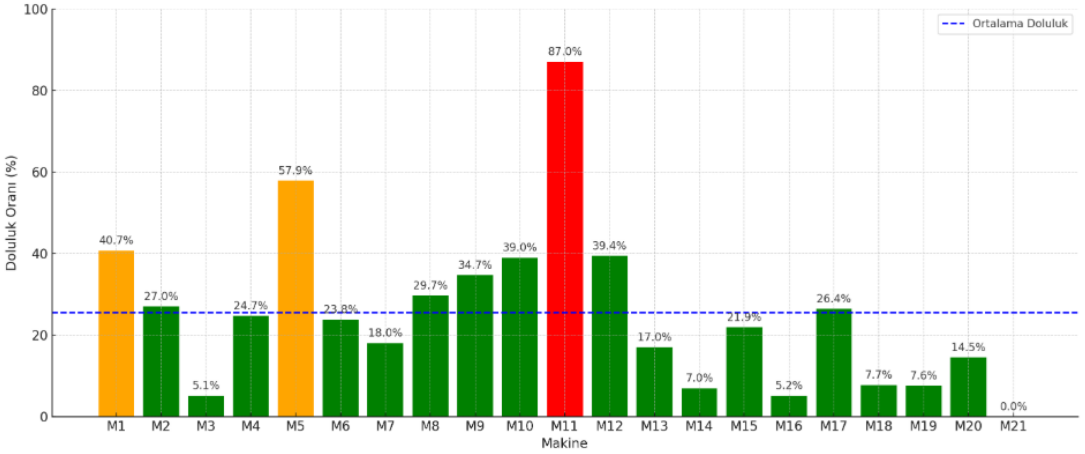
Üretim süreçlerinde müşterilere parçaların teslim edildiği süre ciddi önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, bu bölümde üçüncü veri seti olan gerçek verilere dayalı ve ilk iki senaryo ile aynı girdilere sahip bir analiz gerçekleştirilmiş ve en büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklendiği amaç fonksiyonu ile model çözdürülmüştür. Analizin sonucunda Şekil 4.18'de verilen çizelge elde edilmiştir. İlgili çizelge incelendiğinde model gecikme/erken teslimatları en küçüklemeyi hedeflemiş ve çoğu parça hedef teslim süresine çok yakın zamanda tamamlanmıştır. İlgili çizelgede elde edilen amaç fonksiyonu değeri 31.94 olarak elde edilmiştir. Bu durum diğer simülasyonlarla kıyaslandığında modelin teslimat zamanları performans ölçütü açısından oldukça etkin çalıştığını kanıtlar niteliktedir. Bunun yanı sıra parçaların toplam üretim bitiş süreleri 2044.40 amaç fonksiyonu değerini almıştır ki bu durum diğer senaryolara göre yüksek bir bitiş zamanına işaret eder. Model çözümünde 20 farklı makine kullanılmıştır. Bunlardan M11 numaralı makinenin doluluk oranı oldukça yüksektir ve M11 makinesinin aşırı yüklendiği açıkça görülmektedir, öte yandan diğer makinelerde uygunluk olsa da ilgili operasyonlar yalnızca M11 makinesinde yapılabilmektedir. Bu nedenle gecikme/erken teslim zamanlarının iyileştirilmesi hedefleniyorsa M11 makinesindeki darboğaza odaklanılmalıdır.



Şekil 4.18 En büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklemesi amaç fonksiyonu ile elde edilen çizelge

M11 makinesinin kapasitesinde yapılacak herhangi bir artış modelde ciddi oranda iyileşmelere neden olacaktır. Bu durumun yanı sıra M11 dışındaki diğer makinelerde işlemleri olan başka parçalar sisteme dahil edilmek istenirse çizelgeye kolaylıkla dahil edilebilirler. Bu anlamda kapasitenin yeni parçaları sisteme dahil etmek konusunda oldukça uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.19'da verilen makine doluluk yüzdeleri ve yüklenme grafiği incelendiğinde bazı makinelerin düşük kullanım oranlarında kullanılması, teslimat hassasiyetine göre model tarafından yapılan bilinçli bir planlama kararıdır. Bu model, zamanlama hedeflerine ulaşmayı önceliklendirirken, kaynakların dengeli kullanımı gibi diğer performans kriterlerini ikinci plana atmıştır. Bir diğer etken daha önceki senaryolarda da bahsedildiği gibi öncüllük ardıllık ilişkilerinin ve bazı operasyonların bazı makinelerde yapılabilmesi kısıtlarıdır. Bu modelle elde edilen çözümde sistemde yük paylaşımının optimize edilmesi ilk öncelik olmadığı için makine kullanım oranları için etkin atamalar yaptığı söylenememektedir.



Şekil 4.19 Makine yükleme oranları - en büyük gecikmenin/erken teslimatın en küçüklendiği model

Sonuç olarak, en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklenmesi amaç fonksiyonunun işlerin tam zamanında veya minimum gecikme/erken teslimatla tamamlanması durumu hedeflendiğinde etkin çizelgeler sunduğu sonucu elde edilmiştir.

Bu bölümde yapılan tüm analizler için Çizelge 4.28'de verilen matematiksel modellerin simülasyon sonuçlarının iki farklı amaç fonksiyonu ve işlerin gecikme ve erken tamamlanma yüzdeleri üzerinden kıyaslandığı analiz verilmiştir.

Çizelge 4.28 Matematiksel Modellerin Simülasyon Sonuçları

Matematiksel Model	**Toplam Bitiş Zamanı**	**Gecikme/Erken Teslimat**	**Erken Teslimat(%)**	**Geç Teslimat(%)**	**CPU(sn)**
Mevcut Durum Simülasyonu	1845.94	157.58	0%	100%	152
En Büyük Gecikme/Erken Teslimat Model	2044.40	31.94	0%	100%	172822
Toplam Bitiş Zamanları Model	1281.10	182.47	90%	10%	86405

Çizelge 4.28'de görüldüğü üzere mevcut durum tüm performans ölçütlerinde ortalama ya da daha kötüdür. Mevcut durumun iyileştirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. En büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği model incelendiğinde gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonunun oldukça iyi olduğu görülmektedir. Geciken işler olsa da en fazla 31.94 değerinde gecikme yaşanmıştır. Bunun yanı sıra toplam üretim bitiş zamanı etkin değildir. Bu durumda teslimat zamanlarına uyumun önemsendiği bir çizelge elde edilmek isteniyorsa ve makine kullanım verimi nispeten önemsizse ilgili model tercih edilebilir. Toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği model incelendiğinde toplam bitiş zamanı amaç fonksiyonunda 1281.10 tamamlanma zamanıyla analizler arasında en iyi üretim tamamlanma zamanına ulaştığı görülmektedir. Ancak gecikme/erken teslimat amaç fonksiyonunda 182.47 değeriyle yüksek bir değere sahiptir. İlgili durum incelendiğinde verideki çoğu parçanın erken üretildiği görülmektedir. Erken tamamlanma durumu depo kısıtı olmayan atölyeler için iyi bir sonuç olsa da depolama kısıtı olan bir atölyede istenmeyen bir durumdur. İlgili modellerin çalışmaları sırasında farklı adetlerde makine kullandığı da gözlemlenmiştir. Örneğin mevcut durum simülasyonunda 16 makine etkin kullanılırken, toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği modelde 21 adet makine kullanılmış ve en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği modelde 20 adet makine kullanılmıştır. Bu durumda aslında modellerin belirli öncelik kurallarını sağlarken kullanabilecekleri tüm uygun kaynakları kullanma eğilimi gösterdiğini açıkça göstermektedir. Modelleri çözüm süreleri açısından kıyaslayacak olursak mevcut durum simülasyonu bir optimizasyon çalışması yapmadığı için çok hızlı çözüm oluşturmaktadır. Daha sonra 86405 sn ile toplam

bitiş zamanları modeli optimizasyon sonucu üretirken, en büyük gecikme/erken teslimat modeli 172822 sn de çözüm üretmektedir.

Sonuç olarak, atölye ihtiyaçlarını yönetmek için farklı öncelik kurallarıyla bağlantılı olan farklı amaçlara sahip matematiksel modeller kullanmak sistemleri iyileştirmek ve ihtiyaçları yönetmek konusunda etkin çözümler üretmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Atölye çizelgeleme problemleri, üretim ortamlarında kaynakların etkin kullanımını sağlamak ve teslimat takvimine destekleyen üretimler gerçekleştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Atölye çizelgeleme problemlerinde seçilen öncelik kuralları ve modellenen amaç fonksiyonlarına göre çizelgeler önemli ölçüde değişiklik göstermekte ve model performansını oldukça etkilemektedir. Bu tür çizelgeleme problemlerinde, kullanılan öncelik kuralları genellikle seçilen amaç fonksiyonunun türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Farklı öncelikler ve farklı amaç fonksiyonlarıyla talep edilen amaca hizmet eden çizelgeler elde etmek mümkündür. Bu durum atölyelerde farklı talepler için farklı alternatif çizelgeler önerilmesi açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir.

Bu tez çalışması kapsamında, teslimatlarda gecikmeler yaşanan gerçek bir üretim ortamında manuel olarak yürütülen sezgisel çizelgeleme süreci modellenmiş ve geliştirilen iki farklı amaç fonksiyonu ayrı ayrı ele alınarak oluşturulan matematiksel modeller ve çözümler sayesinde karşılaştırılmıştır. Mevcut durum simülasyonu en uzun işlem süresi (LPT - Longest Processing Time) öncelik kuralıyla modellenmiştir. Çalıştırılan modelden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm işlerin bitiş süresi üzerinden kıyaslandığında toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği model 1281.10 bitiş zamanı değeriyle, mevcut durum simülasyonu 1845.94 bitiş zamanı değeriyle ve en büyük gecikmelerin/ erken teslimatların en küçüklendiği model 2044.40 değerini alarak çözümler üretmiştir. Çözümler incelendiğinde bitiş zamanları toplamının en küçüklendiği modelin beklenildiği üzere toplam akış süresi açısından en etkin çözümü elde ettiği söylenebilmektedir. Daha sonra mevcut simülasyonun en büyük gecikmelerin/ erken teslimatların en küçüklendiği senaryoya göre daha etkin bir toplam akış süresi elde ettiği söylenebilmektedir. Ancak farklı öncelik kuralları ve taleplerle incelendiklerinde aslında farklı amaçlara hizmet eden farklı çizelgeler elde edildiği açıkça görülmektedir. Tam tersi durumda en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği amaç fonksiyonuna göre sonuçlar sıralandığında beklenildiği üzere en büyük gecikme/erken teslimatların en küçüklendiği modelin 31.94 değerli gecikme ile en etkin çalıştığı söylenebilir. Mevcut durum simülasyonu ve toplam bitiş zamanlarının en küçüklendiği

modelin sonuçları sırasıyla 157.58 ve 182.47 değerlerini almıştır. Amaç fonksiyonu toplam bitiş zamanlarını en küçüklemek olarak ele alındığında, bu durumda sistemin en kısa işlem süresine (SPT - Shortest Processing Time) sahip işlere öncelik verme eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. Düşük stok değerlerine sahip ve hızlı stok oluşturulmak istenilen atölyelerde kullanımı avantajlı olduğu söylenirken, makine verimliliği açısından etkin olduğu söylenememektedir. Öte yandan, amaç fonksiyonu en büyük gecikmeyi/ erken teslimatı en küçüklemeyi hedefliyorsa, sistem genellikle kritik oran (CR), kritik yol (CP) ve kalan serbest zaman (Slack Time) öncelik kuralları eğiliminde hizmet edecek şekilde çalışmakta ve bu önceliklere uygun çizelgeler sunmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde bu amaç fonksiyonu parça teslimatlarını olabildiğince aynı anda tamamlamayı ve olası gecikmelerin ve erken teslimatların önüne geçmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda makineleri nispeten daha etkin kullandığı ve serbest zamanları kullanarak daha etkin bir çizelge oluşturduğu söylenebilmektedir. Serbest zamanları kullanması nedeniyle yakın teslimat zamanlarına sahip parçalar için çizelgeler oluşturulmak istendiğinde kullanıma uygundur. Teslimat zamanının proje açısından daha önemli olduğu ve geç teslimatta sözleşme cezalarına katlanılması gereken durumlarda makine verimliliği önemsenmez ise ilgili model tercih edilebilir ve avantaj sağlayacaktır. En büyük gecikmeyi/erken teslimatı ve toplam bitiş zamanlarını minimize etmeyi amaçlayan fonksiyonlar için geliştirilen modeller, problemdeki dinamiklerine göre etkin, dengeli ve farklı çözümler üretebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında havacılık sektöründe uzun rotalara sahip parçalar üreten ve teslimat zamanlarının katı olduğu bir atölye için farklı performans ölçütleri önceliklendirildiğinde farklı çizelgeler elde edilebildiği görülmüştür. Özellikle teslimat tarihlerinin kritik olduğu savunma sanayi, havacılık gibi sektörlerde, çizelgeleme problemlerine bu çalışmada önerilen amaç fonksiyonları üzerinden yaklaşmak; zaman, maliyet ve sözleşme yükümlülükleri açısından farklı avantajlar sağlayabilir.

Bu tez çalışması, literatürde sıklıkla ele alınan iş atölyesi çizelgeleme problemini, havacılık sektörü gibi teslimat hassasiyeti yüksek ve üretim rotaları uzun olan parçalara sahip bir sektöre özgü verilerle ve literatürdeki benzer problemlerde ele alınan öncüllük ardıllık ve operasyon çakışmalarını önleyici kısıtları farklı yapıda modelleyerek özgün bir katkı

sunmaktadır. Literatürde genel amaçlı optimizasyon yaklaşımları ile çözülmüş pek çok atölye çizelgeleme örneği bulunmasına rağmen, bu tez çalışması gerçek bir üretim ortamında uygulanan sezgisel yöntemi modelleyerek farklı iki amaç fonksiyonu ile ayrı ayrı karşılaştırmalı bir değerlendirme yapmış, farklı öncelik kurallarının belirli amaç fonksiyonları ile elde ettiği çizelgeleri somut biçimde kıyaslamıştır. Geliştirilen modeller, üretim planlama yazılımlarına entegre edilerek karar destek modülü olarak uygulanabilir. Bu durumda uzun vadeli projelerle üretim yapan atölyeler için büyük bir avantaj sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışma ile öncelik kurallarının sadece teorik düzeyde değil, gerçek verilerle uygulamaya dönüştürerek üretim performansını nasıl etkilediği sayısal verilerle ortaya konulmuş, üretim sahalarında kullanılan çizelgeleme çalışmalarının iyileştirilmesi için karar vericilere önemli bir yol haritası sunmaktadır. Bu öneriler, yalnızca teorik değil, pratik düzeyde planlamacılara karar destek sistemi geliştirme yönünde önemli katkılar sağlayabilir. Gelecekteki çalışmalarda farklı amaç fonksiyonlarının hangi öncelik kurallarını temsil ettiğiyle ilgili bir çalışma ile çalışmanın kapsamı genişletilebilir. Bunun yanı sıra çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı modeller geliştirilerek daha dengeli çizelgeleme çözümleri elde edilebilir. Bu çalışma kapsamında makine kurulum sürelerinin işlem sürelerine dahil olduğu ve parçalı üretimin yapılamadığı senaryolar ele alınmıştır. Gelecek çalışmalarda dinamik bir atölye sistemini simüle etmek amacıyla bu varsayım olmadan, makine kurulum sürelerinin ayrıca ele alındığı ve parçalı üretime izin verilen bir başka çalışma gerçekleştirilebilir. Bu tez kapsamında ele alınan bir başka varsayımda gerçek hayat problemlerinde karşımıza çıkan değişkenliklerin olmadığıdır. Gelecek çalışmalarda makine arızaları, iş gücü kesintileri gibi öngörülmesi zor kriterlerin geçmiş verilerle incelenmesi ve verinin bir olasılık dağılımı ile ilişkilendirilmesi yoluyla çizelgeleme modeline entegre edilmesi ve daha kapsamlı modeller geliştirilmesi de mümkündür.

6. KAYNAKLAR

Abdullah, N.A., Job Shop Scheduling Problem (JSSP), Yüksek Lisans Tezi, 2004.

Arık, O. Toksarı, M. Bulanık bozulma ve öğrenme etkileri altında tek makine erken/geç tamamlanma probleminin bulanık şans kısıtlı programlama tekniği ile incelenmesi. Sakarya University Journal of Science, 2018. 22(2), 650-660. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.299354

Červeňanská, Z., Važan, P., Juhás, M., Juhásová, B., "Multi-criteria Optimization in Operations Scheduling Applying Selected Priority Rules," Applied Sciences (Switzerland), 11(6), 2783, 2021. https://doi.org/10.3390/app11062783

Chen, X., Zhang, B., Gao, D., "An Improved Bat Algorithm for Job Shop Scheduling Problem," 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2019. doi:10.1109/icma.2019.8816578

Dağ, S., "An Application on Flowshop Scheduling," Statistics, Econometrics and Management Information Systems, 1(1), 2013. www.alphanumericjournal.com

Dikmen, H., Balcı, F., Çetin E., Ilgın Y., Kaya H., Kartal Y. "Farklı Performans Kriterleri Altında Paralel Makine Çizelgeleme Problemi." Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi 2023, 11(3):1030-1053. https://doi.org/10.21923/jesd.1244549

Ghadim M., Bahrami B., Bayat A., Using Improved Particle Swarm Optimization to Solve Open Shop Scheduling Problem with Two Criteria, Advanced Materials Research 2012. 433-440:4936-4941. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.4936

Guo, Z.X., Wong, W.K., Leung, S.Y.S., Fan, J.T., Chan, S.F., "Mathematical Model and Genetic Optimization for the Job Shop Scheduling Problem in a Mixed- and Multi-Product Assembly Environment: A Case Study Based on the Apparel Industry," Computers and Industrial Engineering, 50(3), 202–219, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.03.003

Hassanein, W., Nawara, G.M., Wael Hassanein, E.S., “Solving the Job-Shop Scheduling Problem by Arena Simulation Software,” International Journal of Engineering Innovation & Research, 2(2), 2014.

Hong Y., Mao F., Xu J., Shi H., Parallel Machine Scheduling with Fuzzy Due Date Using Improved Simulated Annealing in Lean Production. Applied Mechanics and Materials, 2013. 457-458:470-473. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.457-458.470

İpek, M., Cedimoğlu, İ.H., “Due Date Determination in Dynamic Job Shop Scheduling with Artificial Neural Network,” Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 8(1), 84–94, 2025.

Kaya, S., Fığlalı, N., “Çok Amaçlı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Meta Sezgisel Yöntemlerin Kullanımı,” Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 2018. 3(3), 222–233.

Kaya, S., Fığlalı, N., Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Meta-Sezgisel Yöntemler İle Çözümüne Yönelik Bir İnceleme. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2016. 20(2):223. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.12029

Koruca, H., Aydemir, E., “A Priority Rule Based Production Scheduling Module on Faborg-Sim Simulation Tool,” Gazi University Journal of Science, 27(4), 1143–1155, 2014.

Küpeli İ., Sarucan A., Küpeli A., Dağıtık Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Yapay Arı Koloni Algoritması İle Çözümü. El Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020. https://doi.org/10.31202/ecjse.670424

Lakehal, M., Aissani, A., Bouibede, K., “New Algorithm of Scheduling Based on Priority Rules on Machines to Solve Bi-Criteria Blocking Job Shop Scheduling Problem,” 2015 12th International Symposium on Programming and Systems (ISPS), 2015. doi:10.1109/isps.2015.7244978

Low C. and Yeh Y., Genetic Algorithm-Based Heuristics for an Open Shop Scheduling Problem with Setup, Processing, and Removal Times Separated,

Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009. 25(2):314-322. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.017

Ma Y., The Similar Algorithm Research of Concurrent Open-Shop Scheduling, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2014. 9(4):317-326. https://doi.org/10.14257/ijmue.2014.9.4.33

Masood, A., Mei, Y., Chen, G., Zhang, M., "Many-Objective Genetic Programming for Job-Shop Scheduling," Proc. Conference, 2016, pp. 209–216.

Ojstersek, R., Tang, M., Buchmeister, B., "Due Date Optimization in Multi-Objective Scheduling of Flexible Job Shop Production," Advances in Production Engineering and Management, 15(4), 481–492, 2020. https://doi.org/10.14743/APEM2020.4.380

Olgun, M.O., Kaçar, T., "Bir Metal Fabrikası İçin İş Çizelgeleme Yazılımı Hazırlanması," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(1), 421–443, 2020. https://doi.org/10.35193/bseufbd.589585

Oral, M., "Karınca Kolonisi Algoritması İle Akış Tipi İş Çizelgeleme," Conference Paper, October 2014. https://doi.org/10.13140/2.1.4501.5048

Pinedo, M., Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, 4th ed., Springer, 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2361-4

Pongchairerks, P., "Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Scheduling Problems," ScienceAsia, 35(1), 89–94, 2009. https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.089

Romanuke V., Tight-Tardy Progressive Idling-Free 1-Machine Preemptive Scheduling by Heuristic's Efficient Job Order Input. Kpi Science News, 2020;0(3):32-42. https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.199850

Romanuke V., A Sorting Improvement in the Heuristic based on Remaining Available and Processing Periods to Minimize Total Tardiness in Progressive

Idling-Free 1-Machine Preemptive Scheduling. Kpi Science News 2021(1). https://doi.org/10.20535/kpisn.2021.1.211935

Saraç, T., Bilgiçer N., ”Çok Amaçlı Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemi İçin Bir NSGA-II Algoritması” Endüstri Mühendisliği, 2020.31(2):105-121 https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.623030

Sel Ç., Hamzadayı A., ”A Simulated Annealing Approach based Simulation-Optimisation to the Dynamic Job-Shop Scheduling Problem.” Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2018;24(4):665-674. https://doi.org/10.5505/pajes.2017.47108

Sharma S., Khanna G., Bi-Criteria Scheduling on Parallel Machines under Fuzzy Processing Time. 2015. https://doi.org/10.36334/modsim.2015.c5.seema

Toksarı M., Atalay B., Under Position Dependent Learning and Nonlinear Deterioration Effect on a Single Machine Scheduling Problem with Job Rejection. Konya Journal of Engineering Sciences 2019;7(4):797-805. https://doi.org/10.36306/konjes.654950

Vazan, P., Cervenanska, Z., Kotianova, J., Krizanova, G., “The Impact of Selected Priority Rules on Production Goals,” 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), Krakow-Wieliczka, Poland, 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/CarpathianCC.2019.8765924

Yazdani, M., Aleti, A., Khalili, S.M., Jolai, F., “Optimizing the Sum of Maximum Earliness and Tardiness of the Job Shop Scheduling Problem,” Computers and Industrial Engineering, 107, 12–24, 2017. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.02.019

Zahmani, M.H., Atmani, B., Bekrar, A., Aissani, N., “Multiple Priority Dispatching Rules for the Job Shop Scheduling Problem,” 2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), Tlemcen, Algeria, 2015, pp. 1–6. doi:10.1109/CEIT.2015.7232991

Zarif, M.A., Hamidzadeh, J., “Chaotic Multi-Population ABC Algorithm Based on Memory and Levy Flight for Solving Dynamic Job Shop Scheduling Problems,” 2021 11th International Conference on Computer Engineering and Knowledge (ICCKE), 2021.