

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

OlcaY KALAN

**DİNAMİK ESNEK ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME
PROBLEMİNİN BAKIM KISITLARI ALTINDA ÇÖZÜMÜ**

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2019

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİNAMİK ESNEK ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN
BAKIM KISITLARI ALTINDA ÇÖZÜMÜ**

Olca KALAN

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez / / 2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Cenk ŞAHİN
DANIŞMAN

.....
Prof.Dr.Ali KOKANGÜL
ÜYE

.....
Dr.Öğr.Üyesi Esra KARAKAŞ
ÜYE

.....
Dr.Öğr.Üyesi Fikri EGE
ÜYE

.....
Dr.Öğr.Üyesi Melik KOYUNCU
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tez de kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

DİNAMİK ESNEK ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN BAKIM KISITLARI ALTINDA ÇÖZÜMÜ

Olçay KALAN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Cenk ŞAHİN
Yıl: 2019, Sayfa: 176
Jüri : Doç. Dr. Cenk ŞAHİN
: Prof. Dr. Ali KOKANGÜL
: Dr. Öğr. Üyesi Esra KARAKAŞ
: Dr. Öğr. Üyesi Melik KOYUNCU
: Dr. Öğr. Üyesi Fikri EGE

Esnek atölye tipi üretim sistemlerinde karşılaşılan çizelgeleme problemleri NP-zor sınıfına giren kombinatoriyal optimizasyon problemleridir ve klasik atölye tipi çizelgeleme problemlerinden farklı olarak operasyon sıralamanın yanı sıra işlerin paralel makinelerle atanması da dikkate alınmaktadır. Paralel makinelerin her zaman uygun durumda bulunmaması ve gerçek hayatta karşılaşılan dinamik olaylar nedeniyle bu problemler dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemine dönüşmekte ve çözümü zorlaşmaktadır. Bu problemlerin çözümü için daha hızlı ve daha etkili sonuçlar elde etmek amacıyla birçok yöntem geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, yeni iş gelişlerinin yer aldığı, makinelerin toplu olarak belirli dönemlerde bakıma gönderildiği dinamik esnek atölye tipi üretim sistemleri için robust çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde farklı yeniden çizelgeleme yöntemlerinin matematiksel modelleri (Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Eklemeli Çizelge) karşılaştırılmıştır. Önerilen modeller deneysel veri setleri ile farklı bakım periyotları ve farklı yeni iş geliş zamanları için toplam 45 problem senaryosu üzerinde farklı performans değişkenleri (makine doluluk oranı, gecikmeler ve maksimum tamamlanma zamanı) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu senaryolarda Robust Çizelgede ortalama makine doluluk oranı % 72 olup diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik çizelgeleme, esnek atölye tipi üretim, bakım, dayanıklılık, matematiksel modelleme

ABSTRACT

PhD THESIS

SOLUTION OF DYNAMIC FLEXIBLE JOB SHOP SCHEDULING UNDER MAINTENANCE CONSTRAINTS

Olçay KALAN

CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cenk ŞAHİN

Year: 2019, Pages: 176

Jury : Assoc. Prof. Dr. Cenk ŞAHİN

: Prof. Dr. Ali KOKANGÜL

: Asst. Prof. Dr. Esra KARAKAŞ

: Asst. Prof. Dr. Melik KOYUNCU

: Asst. Prof. Dr. Fikri EGE

Scheduling problems encountered in flexible job shop systems are combinatorial optimization problems which are non-deterministic polynomial time class and different from the classical job shop scheduling problems, besides sequencing of operations, assigning of jobs to parallel machines are also taken into consideration in the problems. These problems are turned into a dynamic flexible job shop scheduling problems due to the fact that parallel machines are not always available and due to the dynamics events encountered in real life and the solution becomes difficult. Many methods have been developed in order to achieve faster and more effective results for solving these problems.

In this study, robust scheduling problem are addressed for dynamic flexible job shop production systems where new jobs arrivals and machines are sent for maintenance in certain periods. In the solution of the problem, mathematical models of different re-scheduling methods (Robust, Non-delay Schedule and End-Inserted Schedule) were compared. The proposed models were evaluated using different performance variables (machine occupancy rate, delays and maximum completion time) over a total of 45 problem scenarios for different maintenance periods and new job arrival times with experimental data sets. According to the results obtained, the average machine occupancy rate in the Robust schedule was 72% in these scenarios and it gave better results than the other methods.

Key Words: Dynamic scheduling, flexible job shop, maintenance, robustness, mathematical modelling

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Günümüzde teknolojinin gelişimi, küreselleşme, müşteri isteklerinin değişkenliği ve artan rekabet nedeniyle üretim sistemlerinde maliyetin düşürülmesi, stokların azaltılması, daha kaliteli üretim ve üretim için kullanılan zamanın azaltılarak değişkenliklere hızlı bir şekilde cevap verilebilmesi önem kazanmıştır. Tüm bu rekabet unsurları üretimde esnekliği de beraberinde getirmektedir. Üretim sistemlerinin esnek olması kullanılan hammadde, kullanılan makine ve ekipman, uygulanan süreç bakımından esnek olması demektir.

Esnek bir üretim sisteminde siparişlerin istenilen zamanda teslimatı önemlidir ve üretimin takibinin iyi yapılması gerekmektedir. Bu durum beraberinde üretim sistemindeki kaynakların verimli şekilde kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır. İyi bir üretim planı ve iyi bir üretim çizelgelemeyle hem zaman hem de maliyet açısından verimliliğin artması sağlanabilmektedir.

Üretim çizelgeleme, işlerin hangi makinelerde hangi sırayla yapılacağı ve ne zaman başlayıp ne zaman bitmesi gerektiğinin belirlenmesidir. Üretim sistemlerine uygun çizelgenin yapılabilmesi amacıyla birçok çizelgeleme problemi ortaya çıkmıştır. Özellikle esnek üretim sistemlerinde işlerin makinelere atanması ve sıralanması problemi oldukça karmaşıktır ve makine sayısı-iş sayısı arttıkça çizelgelemenin zorluğu daha da artmaktadır. Bu tür çizelgeleme problemleri NP-zor problemler olarak adlandırılmaktadır. Bu problemlerin çözümünde, çözüm daha fazla zaman gerektirmektedir.

Bunun yanı sıra gerçek hayatta esnek atölye tipi üretim sistemlerinde birçok beklenmeyen dinamik olaylar meydana gelebilmektedir. Yeni işlerin gelmesi, makinelerin bozulması, makinelerin bakımı, işlerin iptal edilmesi, işlerin teslim tarihinde değişiklik yapılması vs. gibi dinamik olaylar çizelgelemenin zorluğunu arttırmaktadır.

Yapılan bu çalışmada başlangıç çizelgesi oluşturulduktan sonra yeni gelen işlerin yer aldığı ve bunun yanı sıra makinelerin belirli dönemlerde toplu olarak

bakıma gönderilmesinden kaynaklanan dinamik durumun da dahil edildiği dinamik esnek atölye tipi üretim çizelgeleme problemi ele alınmıştır.

Bir üretim sisteminin dinamikliği arttıkça sistemin sürekliliğinin sağlanması ve kararsızlığın oluşmaması için sistemin değişkenliğe karşı duyarlılığının üretimin çizelgelenmesinde dikkate alınması gerekmektedir. Son zamanlarda yapılan birçok çalışmada çizelgeleme problemlerinde sistemin değişkenliklere uyum sağlayabilmesi için dayanıklılık (robustness), performans ölçütü olarak çizelgeleme problemine dahil edilmektedir. İncelenen bu problemin de çözümünde dayanıklı çizelge oluşturulmak için tüm operasyonların tamamlanma zamanı ve değişkenliğe karşı dayanıklılık ölçütü minimize edilmeye çalışılmıştır.

Dinamik olarak yeni iş gelişleri ile farklı bakım periyotlarının ele alındığı problemin çözümünde, üç farklı yeniden çizelgeleme yöntemi için yeni matematiksel modeller oluşturulmuştur. İlk olarak dayanıklılık ölçütün yer aldığı Robust yöntem, ikinci olarak gecikmesiz çizelge yöntemi, üçüncü olarak ise yeni işlerin operasyonlarının makinelerin başlangıç çizelgesindeki ilk boşa düştüğü anda işleme alınması yöntemi (sona ekleme yöntemi) problemde dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra 45 problem senaryosu için önerilen yöntemlerin çizelgeleri karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modeller test edilirken farklı problem veri setleri üzerinde farklı bakım periyotları dikkate alınarak her bir yöntem için çözümün etkinliği test edilmiştir. Ayrıca yeniden çizelgeleme yapılan yeni iş geliş zamanları farklı seçilerek yeni iş geliş zamanlarının bakım periyotlarının değişimi ile birlikte problem üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İncelenen test problem örneklerinin sonuçlarına göre problemin dinamik olması ve dayanıklılığın yanı sıra makine bakımlarının da dikkate alınmasının problemin çözüm süresinde etkili olduğu ayrıntılı bir şekilde ortaya konmuştur. Çözüm sürelerinin Robust çizelgeler oluşturulmak istendiğinde oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra % 72

makine doluluk oranı ile Robust yöntem diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir.

TEŞEKKÜR

Endüstri Mühendisliği Bölümünde asistanlığım boyunca ve tez çalışmalarımız da dâhil tüm Doktora öğrenimim süresince engin bilgisi ve deneyimlerinden faydalandığım, ilgisini ve hoşgörüsünü hiçbir zaman esirgemeyen, öğrencisi olduğum ve asistanlığımı yaptığım için her daim kendimi şanslı hissettiğim değerli danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Cenk ŞAHİN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Görüş ve önerileriyle çalışmama önemli katkılar sağlayan saygıdeğer tez izleme komitesi üyelerim Sayın Prof. Dr. Ali KOKANGÜL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Esra KARAKAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her zaman bana her konuda destek olan, zorlukları aşmamda büyük katkıları olan değerli hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melik KOYUNCU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Z. Figen ANTMEN' e çok teşekkür ederim. Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fikri EGE' ye de çalışmama katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman her konuda her türlü desteğini esirgemeyen, kazandığım başarılarda büyük emeği geçen Sayın Öğr. Gör. Dr. İrfan MACİT' e ve ablam Fahriye MACİT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgileri ve deneyimiyle büyük katkılar sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KUVVETLİ'ye ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cansu DAĞSUYU'na yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Benimle beraber tüm zorluklara göğüs geren ve her anımda yanımda olan çok değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Melek IŞIK'a ve Arş. Gör. Pınar MİÇ'e çok teşekkür ederim.

Doktora öğrenimim süresince sağladığı burslarla maddi yönden katkıda bulunan TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU (TÜBİTAK) BİLİM İNSANI DESTEKLEME DAİRE BAŞKANLIĞI (BİDEB)'na teşekkürlerimi borç bilirim.

Yetişmemde büyük özveri gösteren, sevgi ve desteklerini her zaman hissettiğim AİLEME sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Üretim Sistemleri ve Üretim Çizelgeleme	1
1.2. Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri	11
1.3. Dinamiklik ve Yeniden Çizelgeleme	13
1.3.1. Yeniden Çizelgeleme Stratejileri	15
1.3.2. Yeniden Çizelgeleme Metotları	17
1.3.3. Yeniden Çizelgeleme ve Dayanıklılık (Robustness)	20
1.4. Üretim Sistemlerinde Bakım	22
1.5. Problemin Tanımı	25
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	27
1.7. Çalışmanın Orijinal Katkısı	27
1.8. Çalışmanın Adımları	28
1.9. Çalışmanın Organizasyonu	29
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	31
2.1. Makine Bakımlarının Dikkate Alındığı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri	31
2.2. Dinamik Yapıların Dikkate Alındığı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri	48
2.3. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi	68

3. MATERYAL VE METOT	71
3.1. Materyal.....	71
3.1.1. Çalışmada Kullanılan Veriler	71
3.1.2. Modellerin Test Edilmesi için Deneysel Tasarım	74
3.2. Metot.....	77
3.2.1. Problemin Genel Yapısı ve Formülasyonu	77
3.2.2. Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları.....	80
3.2.3. Bakım Kısıtları Altında Dinamik Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi için Önerilen Matematiksel Modeller	81
3.2.3.1. Varsayımlar	81
3.2.3.2. Notasyon	82
3.2.3.3. Notasyon Başlangıç Çizelgeleri için Oluşturulan Matematiksel Model.....	84
3.2.3.4. Robust Çizelge için Önerilen Matematiksel Model.....	85
3.2.3.5. Gecikmesiz Çizelge Yöntemi için Önerilen Matematiksel Model	87
3.2.3.6. Sona Ekleme Çizelgesi için Önerilen Matematiksel Model....	87
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	91
4.1. 3 İş - 4 Makine ve 7 Operasyondan Oluşan Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar	91
4.2. 3 İş - 4 Makine ve 8 Operasyon Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar	104
4.3. 4 İş - 5 Makine ve 12 Operasyon Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar	123
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
5.1. Çalışmanın Özeti.....	149
5.2. Sonuçlar ve Öneriler.....	149
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ.....	163
EKLER.....	165

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1. Makine bakımlarının dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri	46
Çizelge 2.2. Dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri.....	66
Çizelge 3.1. 3 İş-4 Makine-7 Operasyon' a ait veri seti	72
Çizelge 3.2. 3 İş-4 Makine-8 Operasyon' a ait veri seti	72
Çizelge 3.3. 4 İş-5 Makine-12 Operasyon' a ait veri seti	73
Çizelge 3.4. 3 iş 4 makine veri setleri için yeni gelen işlerin süreleri	74
Çizelge 3.5. 4 iş 5 makine ve 12 operasyon veri seti için yeni operasyonların süreleri	74
Çizelge 3.6. Modellerin test edilmesi için oluşturulan problem senaryoları	76



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Genel olarak bir üretim sistemi	1
Şekil 1.2. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması	2
Şekil 1.3. Üretim çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması	5
Şekil 1.4. Yeniden çizelgeleme süreci	15
Şekil 1.5. Hibrit tahmine dayalı reaktif yaklaşım	17
Şekil 1.6. Çizelgeyi tamir etme metotları	19
Şekil 1.7. Organizasyonun amaçları ve bakım sistemleri arasındaki ilişki	23
Şekil 1.8. Bakım stratejileri	24
Şekil 2.1. Durum bazlı bakımla esnek atölye tipi çizelgeleme	40
Şekil 2.2. Bakım işinin atamasının yapılışı	42
Şekil 4.1. İlk veri seti için başlangıç çizelgeleri	92
Şekil 4.2. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	93
Şekil 4.3. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	94
Şekil 4.4. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler	95
Şekil 4.5. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	96
Şekil 4.6. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	97
Şekil 4.7. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	98
Şekil 4.8. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler	99
Şekil 4.9. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	100

Şekil 4.10. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	101
Şekil 4.11. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	102
Şekil 4.12. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler	103
Şekil 4.13. İkinci veri seti için farklı bakım periyotlarına ait başlangıç çizelgeleri.....	105
Şekil 4.14. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	106
Şekil 4.15. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	107
Şekil 4.16. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler	108
Şekil 4.17. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler	109
Şekil 4.18. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =10 iken elde edilen çizelgeler	110
Şekil 4.19. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =12 iken elde edilen çizelgeler	111
Şekil 4.20. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	112
Şekil 4.21. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	113
Şekil 4.22. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	115
Şekil 4.23. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =6 iken elde edilen çizelgeler	116

Şekil 4.24. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler	117
Şekil 4.25. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	118
Şekil 4.26. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	119
Şekil 4.27. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	120
Şekil 4.28. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =7 iken elde edilen çizelgeler	121
Şekil 4.29. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler	122
Şekil 4.30. Üçüncü veri seti için başlangıç çizelgeleri	124
Şekil 4.31. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	125
Şekil 4.32. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	126
Şekil 4.33. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	127
Şekil 4.34. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =6 iken elde edilen çizelgeler	128
Şekil 4.35. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =7 iken elde edilen çizelgeler	129
Şekil 4.36. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler	130
Şekil 4.37. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	132
Şekil 4.38. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	133

Şekil 4.39. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler	134
Şekil 4.40. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =7 iken elde edilen çizelgeler	135
Şekil 4.41. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler	137
Şekil 4.42. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =11 iken elde edilen çizelgeler	138
Şekil 4.43. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler	139
Şekil 4.44. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler	140
Şekil 4.45. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler	141
Şekil 4.46. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler	142
Şekil 4.47. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler	143
Şekil 4.48. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler	144

SİMGELER VE KISALTMALAR

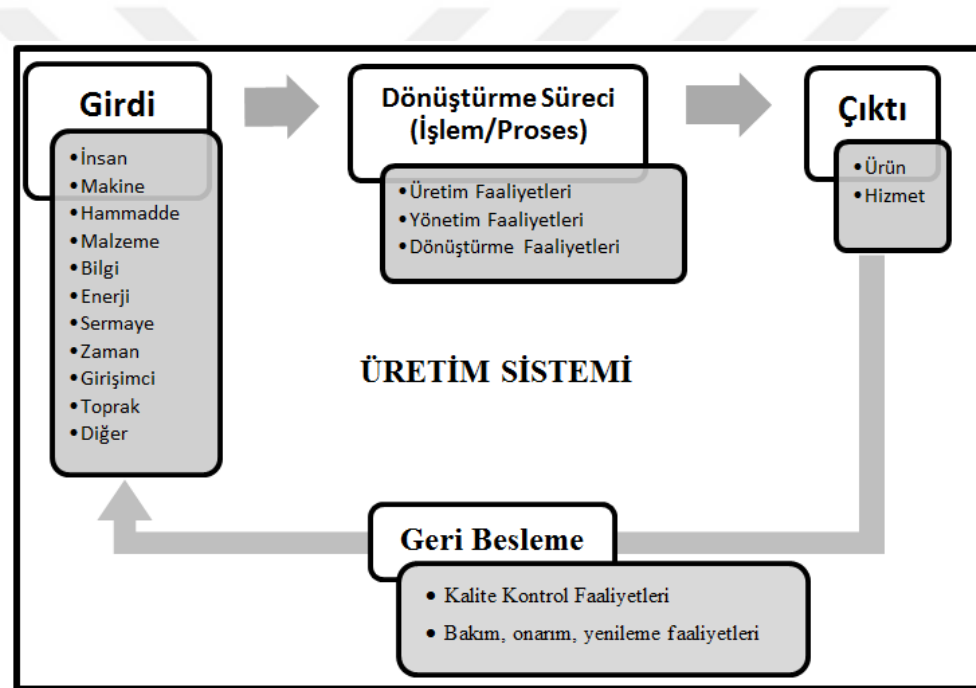
ABC	: Artificial Bee Colony
ACO	: Ant Colony Optimization
ANOVA	: Analysis of Variance
C_{max}	: Makespan Değeri, En Son İşin Tamamlanma Zamanı
CAD/ CAM	: Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
CAE	: Computer Aided Engineering
CNC	: Computer Numerical Control
DEATÇP	: Dinamik Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri
EATÇP	: Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri
EDD	: Earliest Due Date
FIFO	: First In First Out
FAM	: First Available Machine
GA	: Genetik Algoritma
GAMS	: The General Algebraic Modelling System
MWR	: Most Work Remaining
NRGA	: Non-Dominated Ranking Genetic Algorithm
NSGA	: Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
POX	: Precedence Preserving Order-Based Crossover
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
SIMSET	: Similar Setup
SPEA	: Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SPT	: Shortest Processing Time
TR	: Total Rescheduling



1. GİRİŞ

1.1. Üretim Sistemleri ve Üretim Çizelgeleme

Genel olarak *üretim*; insan, makine, hammadde, malzeme, toprak, bilgi, enerji, sermaye, zaman ve girişimci vs. gibi üretim faktörlerini kullanarak ürün veya hizmetin ortaya konmasıdır. *Üretim sistemi* ise belirlenmiş amaçları gerçekleştirmek üzere ürün veya hizmet üretmek için üretim faktörlerinin belirli süreçten geçirildiği sistemlerdir. Bir üretim sistemi Şekil 1.1.' deki gibi ifade edilebilir (Kobu, 2013).

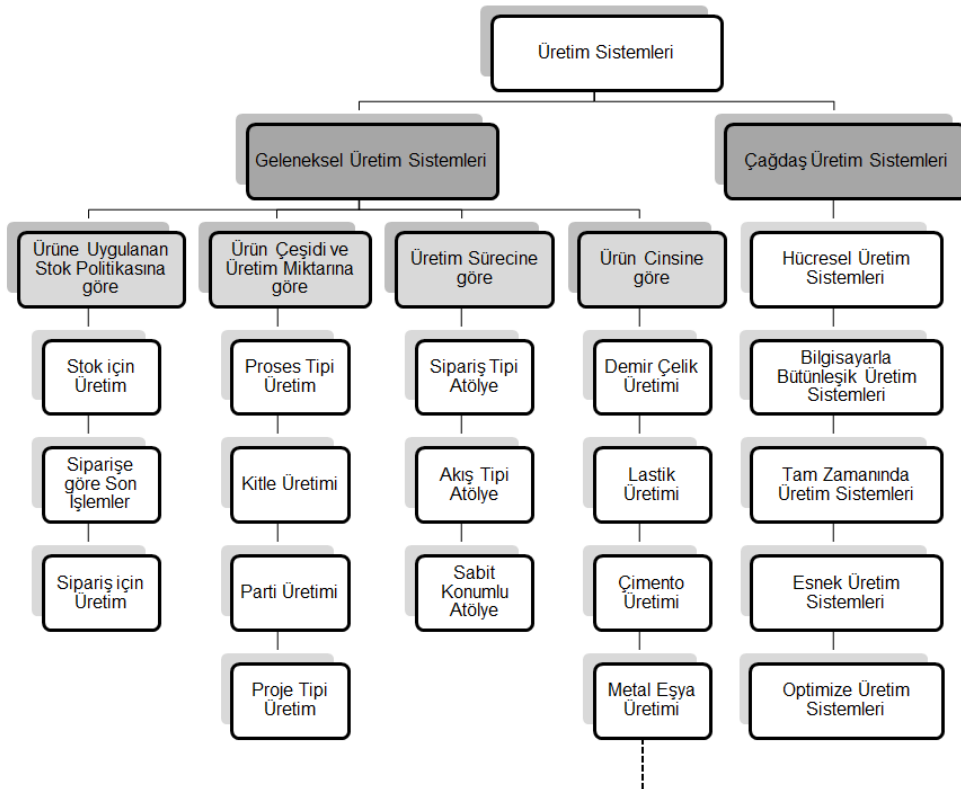


Şekil 1.1. Genel olarak bir üretim sistemi (Kobu, 2013' ten uyarlanmıştır)

Üretim sistemleri; ürün, sipariş, teknoloji vs. gibi unsurlar dikkate alınarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır (Tanyaş ve Baskak, 2003):

1. Geleneksel Üretim Sistemleri
2. Çağdaş Üretim Sistemleri

Geleneksel üretim sistemleri stok politikaları, ürün çeşidi, ürün miktarları, üretim süreci, ürün cinsi olarak dört ana grupta sınıflandırılırken, çağdaş üretim sistemlerinin sınıflandırılmasında esneklik, teknoloji ve stoksuz üretim ön plana çıkmaktadır. Şekil 1.2.' de üretim sistem tipleri ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Üretim sistemlerinin sınıflandırılması (Tanyaş ve Baskak,2003)

Buna göre (Tanyaş ve Baskak,2003);

Stok için üretim sistemi; ürüne sürekli ve düzgün talebin olduğu, müşterinin siparişi vermesinden hemen sonra teslimatın gerçekleştiği ve ancak müşterinin ürün üzerinde özel bir istekte bulunamadığı üretim sistemleridir. Çimento üretimi, somun üretimi, kömür üretimi vb. gibi üretimler bu üretim tipine örnektir.

Siparişe göre son işlemler üretim tipinde; üretilen ürünlerin stoklanarak, müşteri talebi gerçekleştiği an sadece montaj aşamasının gerçekleştiği üretim sistemleridir. Müşterinin isteklerine göre farklı parçaları bir araya getirip bilgisayar üreten, ve tüm parçaların stokta yer aldığı bilgisayar üretimi bu üretim tipine örnek verilebilir.

Sipariş için üretim tipi sistemlerde; müşteri için isteklerinin önemli olduğu üretim beklemenin müşteri için önemli olmadığı, müşterinin istekleri doğrultusunda üretim yapılır. Örnek olarak terzilik verilebilir.

Proses tipi üretim sistemlerinde; üretilen malzeme akışkan yapıya sahiptir ve talep düzenli ve çeşit azdır. Örnek olarak deterjan üretimi veya sıvı maddelerin üretimi verilebilir.

Kitle tipi üretimde; ürünler kitleler halinde ve büyük miktarlarda üretilir ve kullanılan ekipman ve makineler özel amaçlıdır. Otomobil ve beyaz eşya üretimi bu üretim sistemine örnek olarak verilebilir.

Parti tipi üretim sisteminde; aynı ürün tipinin farklı çeşitlerinin üretildiği ve ürün miktarının kısıtlı olduğu üretim sistemleridir. Ürün çeşidinin artması ve ürün miktarının azalmasıyla üretim partiler halinde yapılmaktadır. Örneğin, radyatör fanı üretimi, döküm parça üretimi, pompa üretimi bu üretim tipine örnektir.

Proje tipi üretim sistemlerinde; müşteri isteklerine göre üretilecek ürün sabittir ve ekipman ve malzeme ürün etrafında döner. Üretim bir veya birkaç kereye mahsus yapılır. Gemi üretimi, köprü yapımı vs. türü üretimler bu üretim tipine örnektir.

Üretim sürecine göre sınıflandırmadan bahsedilecek olursa; **sipariş tipi atölye üretim sistemi;** genel amaçlı takım tezgahlarının kullanıldığı gelen siparişlerin makinelerin doluluğuna göre üretime alındığı üretim sistemleridir. Bu tür üretim sistemlerinde ürünün farklı olmasıyla farklı üretim akışları gerçekleşebilir.

Akış tipi üretim sistemleri; üretilecek ürünlerin ardışık olarak aynı sırayı takip ettiği, her tezgahın üretim için belirli süreye sahip olduğu üretim sistemleridir.

Sabit konumlu atölye tipi sistemlerde ise; ürün sabit konumdadır ve tüm malzeme, makine ve ekipman ürün etrafındadır. Uçak, lokomotif üretimi bu tip sistemlere örnektir.

Günümüzde Çağdaş üretim sistemlerinden biri olan **hücreli üretim tipi sistemlerinde;** benzer ürün özelliklerine sahip belirli parça grupları için ayrı şekilde hücre üretimleri gerçekleştirilir.

Diğer bir çağdaş üretim sistemi olan **bilgisayarla bütünleşik üretim sisteminde;** tüm üretim faaliyetleri bilgisayarla entegre şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu üretim sistemlerinde CAD/CAM (bilgisayarla bütünleşik tasarım/bilgisayarla bütünleşik üretim), CNC (bilgisayar destekli nümerik kontrol), CAE (bilgisayar destekli mühendislik), robot gibi üretim teknolojileri yer almaktadır.

Tam zamanında üretim tipi sistemlerde ise; stok düzeylerinin oldukça minimum düzeyde tutulması ve israfı önlemek hedeflenmiştir.

Esnek üretim tipi sistemler ise; birbirleriyle bağlantılı bir grup tezgahın bir merkezi kontrol sistemi ile birlikte entegre olduğu ve otomatik taşıma ve depolamanın gerçekleştirildiği sistemlerdir.

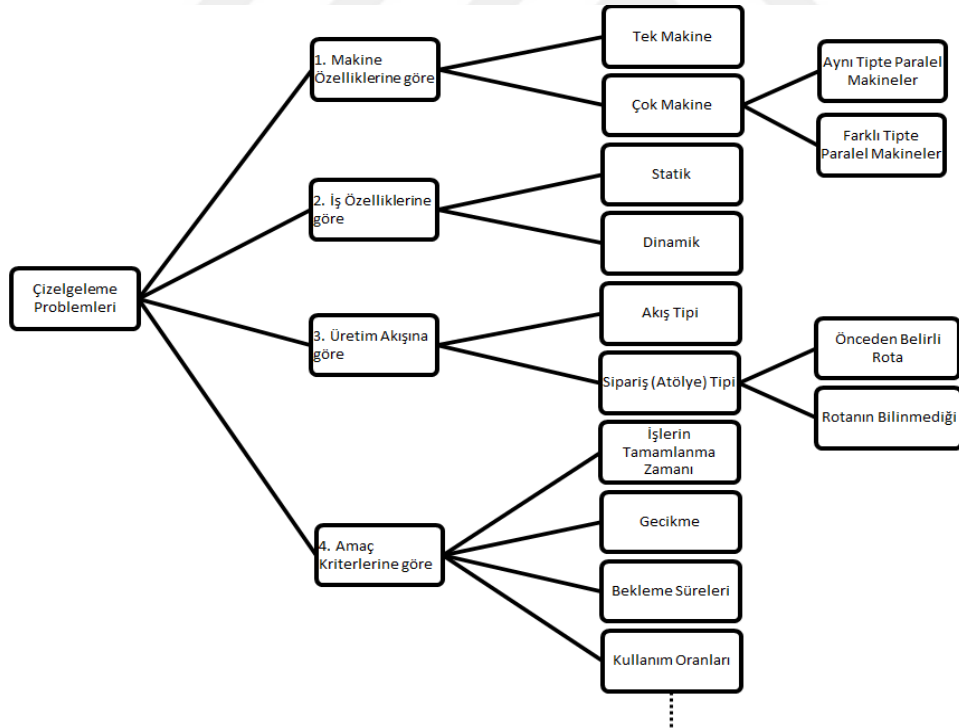
Diğer bir modern üretim sistem tipi **optimize üretim sistemidir.** Optimize üretim sistemlerinde iş öncelikleri ve kapasite sınırları dikkate alınarak tüm iş merkezleri için iş çizelgeleri oluşturulur. Üretim kaynaklarının optimum kullanımı hedeflenmektedir.

Tüm bu üretim sistem tipleri dikkate alınarak üretim sisteminin tipine karar verdikten sonra müşteri isteklerinin karşılanarak, yüksek kalitede ve istenilen zamanda ürün veya hizmetin sunulması ve sürekli iyileştirmeye sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Bir üretim sisteminde sürekliliğin sağlanması için ise hangi kaynakları, ne zaman ve ne şekilde kullanılacağını saptanması elde bulunan kaynakların etkin ve verimli kullanımı açısından oldukça önemlidir. Bu da ancak üretim sisteminin etkili bir şekilde çizelgelenmesiyle gerçekleştirilebilir.

Üretim çizelgeleme, bir veya birden fazla amaca ulaşmak için bir üretim sisteminde yer alan işlerin hangi sırada ve hangi makinelerde yapılması gerektiğinin belirlenmesi sürecidir. Üretim çizelgeleme problemi üretim sistemlerinin tipine göre farklılık göstermektedir. Üretim sistemleri dikkate alındığında çizelgeleme problemleri dört gruba ayrılarak sınıflandırılabilir (Tanyaş ve Baskak, 2003):

1. Makine çevresine göre sınıflandırma
2. İş özelliklerine göre sınıflandırma
3. Üretim akışlarına göre sınıflandırma
4. Amaç kriterlerine göre sınıflandırma

Şekil 1.3.'te ayrıntılı olarak çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Üretim çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması (Tanyaş ve Baskak, 2003)

1. Makine çevresine göre sınıflandırmada; çizelgeleme problemi tek makineli veya çok makineli üretim ortamında ele alınmaktadır. Çok makineli çizelgelemede, üretim ortamındaki makineler farklı tip veya aynı tip olabilmektedir. Her iki tip makinelerin yer aldığı üretimlerde makinelerin hızları da farklı veya aynı olabilmektedir. Yapılacak olan çizelgeleme makinenin tipine ve hızına göre değişebilmektedir.

2. İş özelliklerine göre sınıflandırma kendi içerisinde statik ve dinamik iş gelişleri olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Statik iş gelişlerinin dikkate alındığı çizelgelemede; işler düzenli olarak gelmekte ve iş listesi önceden bilinmektedir. Dinamik iş gelişlerinin yer aldığı üretimlerde ise; işler düzensiz aralıklarda sisteme gelmekte ve iş listesi rastgele değişmektedir. Yapılacak olan çizelgeler işin geliş durumuna göre değişmektedir.

3. Üretim akışına göre sınıflandırma akış tipi üretim çizelgeleme ve sipariş tipi (atölye tipi) çizelgeleme olarak iki gruba ayrılmaktadır. Akış tipi üretim sistemlerinde tüm işler aynı rotayı takip etmektedir. Sipariş tipi üretim sistemlerinde ise işler farklı rotaları izleyebilmektedir.

4. Amaç kriterlerine göre sınıflandırmada ise; üretim sistemlerinin farklı performans ölçütlerine göre farklı çizelgeleme problemleri ortaya çıkmaktadır. Çizelgenin en iyilenmesi için dikkate alınan performans ölçütleri şu şekilde belirlenebilmektedir:

- ✓ İşlerin tamamlanma zamanının minimize edilmesi,
- ✓ Ortalama tamamlanma zamanının minimize edilmesi,
- ✓ Gecikmelerin minimize edilmesi,
- ✓ Ortalama gecikmenin minimize edilmesi,
- ✓ Ortalama ağırlıklı gecikmenin minimize edilmesi,
- ✓ Kuyrukta bekleyen iş sayısının minimize edilmesi,
- ✓ Ağırlıklı geciken iş sayısının minimize edilmesi,
- ✓ Maksimum gecikmenin minimize edilmesi,

- ✓ Kullanım oranlarının minimize edilmesi

Bu çalışmada sınıflandırma ölçütleri dikkate alındığında ele alınan çizelgeleme problemi:

- Makine özelliği olarak; paralel özdeş makinelerin yer aldığı,
- İş özelliği olarak; yeni iş gelişlerinin yer aldığı ve dinamik olaylarla işlerin sıralamasının değiştiği,
- Üretim akışı olarak; işlerin rotalarının önceden bilinmediği,
- Performans ölçütü olarak; bütün işlerin tamamlanma zamanının ve çizelgelemede dayanıklılığın dikkate alındığı dinamik esnek atölye tipi üretim çizelgeleme problemidir.

Genel olarak bir çizelgeleme problemi ifade edilirken, toplam makine sayısı “m” ile toplam iş sayısı “n” ile gösterilmektedir. Bunu yanı sıra işler çeşitli operasyonlardan oluşuyorsa operasyonu ifade etmek için operasyonun yapıldığı makine “i” ile, operasyonun ait olduğu iş ise “j” ile belirtilmektedir. Operasyona ait özellikler (i,j) ikilisi kullanılarak gösterilmektedir.

Bu gösterimler dikkate alınarak bir çizelgeleme problemi aşağıdaki kavramlarla ve gösterimlerle ifade edilmektedir (Pinedo,2016):

İşe ait kavramlar şu şekildedir:

- **İşin işlem süresi (Proses zamanı);** “ p_{ij} ” ile ifade edilir ve i makinesinde j işinin yapılması için geçen süredir.
- **İşin salıverme zamanı;** “ r_{ij} ” ile ifade edilir ve i makinesinde j işinin yapılmak için hazır bulunduğu zaman olarak belirtilir.
- **İşin teslim zamanı;** “ d_j ” ile ifade edilir ve işin tamamlandıktan sonra tesliminin gerçekleştiği zaman olarak belirtilir.

- **İşin ağırlığı;** “ w_j ” ile ifade edilir ve bir j işinin diğer işlere göre öneminin (önceliğinin) belirtilmesinde kullanılır.

Gösterimde ise, bir çizelgeleme problemi ifade edilirken $\alpha/\beta/\gamma$ üçlü gösterimi kullanılmaktadır (Alharkan, 2005).

Burada α , çizelgeleme probleminde makine ortamını ifade etmede kullanılan alandır ve bu alanda tek bir gösterim kullanılmaktadır. Aşağıda α alanında kullanılabilecek gösterimler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ **Tek Makine:** “ I ” ile gösterilir ve üretim ortamında tek bir makinenin yer aldığını belirtmek için kullanılan ifadedir.
- ✓ **Paralel Özdeş Makineler:** “ P_m ” ile gösterilir ve üretim ortamında yer alan m adet makinenin paralel ve birbirine eşdeğer olduğunu ifade etmektedir. Eğer bir j işi sadece belirli makinelerde yapılabilirse bu makineler β alanında M_j gösterimi ile belirtilmelidir.
- ✓ **Hızları Farklı Paralel Makineler:** “ Q_m ” ile gösterilir ve üretim ortamında üretim hızları v_i olarak gösterilen birbirinden farklı m adet paralel makinenin olduğunu ifade eder. Makine hızlarının farklı olmasından dolayı j işinin makinede kalma süresi p_j/v_i kadardır.
- ✓ **Paralel Farklı Makineler:** “ R_m ” ile gösterilir ve üretim ortamında hızları j işine bağlı olarak farklı olan m tane paralel makine vardır. Burada i makinesi j işini, işe göre değişken olarak v_{ij} hızı ile işlemektedir. Bu nedenle j işinin i makinesindeki işlem süresi p_{ij}/v_{ij} olur.
- ✓ **Akış Tipi Üretim:** “ F_m ” ile gösterilir ve üretim ortamında birbirine seri olan m adet makine yer almaktadır. Üretimde bütün işler aynı rotayı takip eder ve bütün makinelere uğramak zorundadır.
- ✓ **Esnek Akış Tipi Üretim:** “ FF_c ” ile gösterilir ve üretim ortamında özdeş paralel makinelerin yer aldığı birbirine seri olan c adet aşama yer almaktadır. Her iş bütün aşamalardan geçmek zorundadır.

- ✓ **Atölye Tipi Üretim:** “ J_m ” ile gösterilir. Üretim ortamında m adet makine yer almaktadır ve işlerin rotaları önceden belirlidir. Bir iş bir makinede en çok bir kez yapılabilir. Eğer işlerin daha önce uğradıkları makineye tekrar uğramaları gerekiyorsa β alanında tekrar faktörü ($rcrc$) de gösterilmelidir.
- ✓ **Esnek Atölye Tipi Üretim:** “ FJ_c ” ile gösterilir ve üretim ortamında paralel makinelerin yer aldığı c adet iş merkezi bulunmaktadır.
- ✓ **Açık Atölye Tipi Üretim:** “ O_m ” ile gösterilir ve üretim ortamında m adet makine vardır. İşlerin rotaları için bir kısıt yoktur ve işler herhangi bir rotada makinelerde işlenebilir.

β , proseslerle ilgili özelliklerin ve problemin kısıtlarına ait bilgilerin yer aldığı alandır. Bunun yanı sıra bu alanda tek bir bilgi yer alabileceği gibi birden çok bilgi de bu alanda ifade edilebilmektedir. Aşağıda β alanında kullanılabilecek gösterimler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ **Serbest bırakılma zamanı:** “ r_j ” ile gösterilir ve işin makinede yapılması için hazır durumda olduğu zamanı göstermektedir. Eğer başlama zamanına ait herhangi bir bilgi β alanında belirtilmemişse, j işi herhangi bir zamanda başlayabilir demektir.
- ✓ **Kesintiler:** “ $prmp$ ” ile gösterilir ve bir j işinin herhangi bir zamanda kesilebileceğini ifade eder. J işi işlem sırasında durdurulup yerine başka iş o makinede yapılabilir.
- ✓ **Öncelik Kısıtı:** “ $prec$ ” ile gösterilir ve işler arasında öncelik olduğunu ve bir iş bitmeden sıradaki işin yapılamayacağını ifade eder.
- ✓ **Sıra bağımlı hazırlık süresi:** “ s_{jk} ” ile gösterilir ve j işi ile k işi arasında geçiş yapılırken hazırlık zamanı olduğunu ifade eder. Eğer hazırlık zamanları makineye göre değişiyorsa bu sembole i indisi de eklenerek

“ s_{ijk} ” ile gösterilir. Eğer bu sembol β alanında belirtilmemişse işlerin sıra bağımlı hazırlık zamanları 0 alınır.

- ✓ **Makine kesintileri:** “**brkdwn**” ile gösterilir ve makinelerin herhangi bir nedenden dolayı kesintiye uğrayabileceğini belirtmektedir.
- ✓ **Permütasyon:** “**prmu**” ile gösterilir ve akış tipi üretim ortamında işler her makinede ilk giren ilk çıkar öncelik kuralına göre yapılıyorsa bu durum alanda bu sembolle belirtilir.
- ✓ **Bloklama:** “**blocking**” ile gösterilir ve akış tipi üretim ortamında makineler arasında sınırlı stok alanının yer aldığını göstermek için bu sembol kullanılır.
- ✓ **Bekleme yok:** “**nwt**” ile gösterilir ve bu sembol yine akış tipi üretim ortamında ardışık iki makine arasında işlerin beklemesine izin verilmediğini belirtmek için kullanılır.
- ✓ **Tekrar işleme:** “**recrc**” ile gösterilir ve Atölye tipi veya esnek atölye tipi üretim ortamında, bir iş daha önce uğradığı makineye tekrar uğruyorsa, bu sembol belirtilir.

γ alanı, probleme ait performans ölçütlerinin yer aldığı alandır. Bir veya birden fazla ölçüt bu alanda ifade edilebilmektedir. Aşağıda γ alanında kullanılabilecek gösterimler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ **En son işin tamamlanma zamanı veya En büyük Tamamlanma Zamanı:** “ **C_{max} , C_{enb}** ” ile gösterilir. Bu alanda C_j her bir j işinin tamamlanma zamanını ifade eder. Üretimi en son terk eden işin tamamlanma zamanı C_{enb} ile gösterilir ve $\max(C_1, C_2, \dots, C_n)$ olarak tanımlanır. Bu değerin minimum olması makinelerin etkili kullanıldığını ifade eder. Çizelgelemelerde bu değer minimize edilmeye çalışılır.

- ✓ **Maksimum Geç Kalma Süresi:** “ L_{max} , L_{enb} ” ile gösterilir. Üretimde erken biten veya geç biten işlerin tamamlanma zamanlarının teslim tarihinden ne kadar saptığını gösterir. Bu değer işin gecikmesini ifade eder ve eğer iş teslim tarihinden sonra bitiyorsa bu değer pozitif, eğer iş bitmesi gereken zamandan önce bitmişse bu değer negatiftir. Maksimum geç kalma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$L_j = C_j - d_j$$

- ✓ **Gecikme:** “ T_j ” ile gösterilir. Bir iş teslim tarihinden önce bitiyor ve işin ne kadar erken bittiği önemsenmiyorsa bu değer gecikme olarak adlandırılır. Gecikme aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_j = \text{Enb} (C_j - d_j, 0) = \text{Enb} (L_j, 0)$$

- ✓ **Toplam Ağırlıklı Tamamlanma Zamanı:** “ $\sum w_j C_j$ ” ile gösterilir ve çizelgelenen işlerin ağırlıklı tamamlanma zamanlarının toplamı minimize edilmeye çalışılır. Literatürde toplam tamamlanma zamanı, akış süresi olarak da ifade edilmektedir ve akış süresi “ F_j ” ile gösterilir. Toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı ise toplam ağırlıklı akış süresi olarak ifade edilir ve “ $\sum w_j F_j$ ” ile gösterilir.
- ✓ **Toplam Ağırlıklı Gecikme ($\sum w_j T_j$):** Toplam ağırlıklı tamamlanma zamanının daha genel maliyet fonksiyonudur.

Bu gösterimler dikkate alındığında bu çalışmada ele alınan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi şu şekilde gösterilmektedir:

$$FJ_c \parallel \text{brkdwn} \parallel C_{max}, \text{robustness}$$

1.2. Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri

Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri (EATÇP), işlerin birden fazla birbirinden farklı paralel makinelerde yapılabildiği ve bir makinenin birden fazla operasyonu işleyebildiği esnek atölye tipi üretim sisteminde ele alınan çizelgeleme problemleridir. Bu problemler iki alt problemden oluşmaktadır. Birincisi, işlerin

operasyonlarının hangi makinelerde işlenmesi gerektiğinin saptanmasını içeren makine **atama problemi**, diğeri ise makinelere atanan operasyonların atandıkları makinelerde hangi sırada yapılması gerektiğinin saptanmasını içeren operasyon **sıralama problemidir**. Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde amaç belirli performans ölçütleri dahilinde işlerin operasyonları için en uygun makinenin ve en uygun sıralamanın belirlenmesidir.

Esnek atölye tipi üretim sistemlerinde birbirinden bağımsız **n adet iş** yer almakta, her iş art arda sıralanmış **h adet operasyondan** oluşmaktadır. Sistemde işlerin atanabileceği **m adet makine** yer almaktadır. Bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde işler kümesi J, operasyonlar kümesi O ve makineler kümesi M ile ifade edilmektedir.

Bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde genel olarak aşağıdaki **varsayımlar** dikkate alınmaktadır:

- ✓ Her bir O_{jh} operasyonu M makine kümesinde yer alan bir makine tarafından yapılmaktadır. Eğer tüm makineler bütün operasyonları işleyebilecek kapasiteye sahipse, problem **tam esnek atölye tipi çizelgeleme problemi** olarak, eğer M makine kümesinde yer alan bazı makineler bazı operasyonları işleyemiyorsa bu tür problemler ise **kısmi esnek atölye tipi çizelgeleme problemi** olarak adlandırılmaktadır (Kacem ve ark., 2002).
- ✓ İşlerin her bir operasyonunun işlem süreleri makinelere bağımlıdır.
- ✓ Atölye sistemindeki her bir işin kendine ait operasyonları arasında işlem önceliği vardır ve bu öncelik daha önceden belirlenmiştir.
- ✓ Bir operasyon herhangi bir makinede yapılabilir. Eğer bir makine bir operasyonu yapamıyorsa o operasyonun o makinedeki süresi çok büyük bir sayı ile ifade edilmektedir.
- ✓ Hiçbir operasyon işlem sırasında yarıda kesilememektedir.

- ✓ Aynı zamanda her makine sadece bir adet operasyonu işleyebilmektedir.
- ✓ İşlerin her bir operasyonu için gereken hazırlık zamanı makinelerden bağımsızdır ve bu hazırlık süreleri operasyon süresine dahildir.

1.3. Dinamiklik ve Yeniden Çizelgeleme

Günümüzde üretim çevresinin dinamik yapısı gereği birçok üretim sisteminde beklenmedik zamanlarda rastgele gerçekleşen birçok gerçek zamanlı olay meydana gelebilmektedir.

Meydana gelen gerçek zamanlı olaylar şu şekilde sınıflandırılabilir (Ouelhadj and Petrovic, 2009; Vieira, 2003):

Kaynak ile ilgili meydana gelen olaylar;

- ✓ Makine bozulmaları,
- ✓ Makine bakımları,
- ✓ Hammadde yetersizliği,
- ✓ Hammadde tedarikinde karşılaşılan sorunlar,
- ✓ Operatörlerin yetkinliklerinin yetersizliği,
- ✓ Operatörlerin hastalanması

İşle ilgili meydana gelen olaylar;

- ✓ Proses zamanlarındaki değişim,
- ✓ Yanlış, eksik veya kayıp bilgi,
- ✓ Acil siparişler,
- ✓ Yeni iş gelişleri,
- ✓ İş iptalleri,
- ✓ Teslim tarihindeki değişiklikler,
- ✓ İş önceliklerinde meydana gelen değişimler,

- ✓ Hazırlık zamanlarındaki değişiklikler

Bu olayların ne zaman gerçekleşeceği önceden kestirilemez ve tam olarak tahmin edilemez. Bunlar sistemin stokastik davranışlarıdır ve çizelgeleme üzerinde önemli etkiye sahip olabilmektedir. Bu dinamik gerçek zamanlı olaylar üretim sistemlerinin performansını ve çizelgenmesini etkilemektedir.

Dinamik durumların gerçekleştiği çevrede üretim sisteminin kontrolü için, bu değişkenliklere karşı çizelgelemede değişiklikler yapılması ve istenen performansların sağlanması için çizelgenin güncellenmesi gerekmektedir. Var olan üretim sistemlerinde çizelgelerde yapılan bu güncelleme sürecine “**yeniden çizelgeleme**” denmektedir. Bir yeniden çizelgeleme süreci;

- Yeniden çizelgeleme çevresi,
- Yeniden çizelgeleme stratejileri ve
- Yeniden çizelgeleme metotlarından oluşmaktadır.

Şekil 1.4.’te yeniden çizelgeleme süreci kısaca özetlenmiştir (Vieira, 2003).

Şekil 1.4.’e göre bir yeniden çizelgeleme çevresi; yeniden çizelgelenecek işlerin özelliklerini tanımlar. Temel olarak iki sınıfa ayrılmaktadır: statik ve dinamik işler. **Statik işler** olarak nitelendirilen iş kümesinde yeniden çizelgelenecek işlerin listesi sınırlıdır ancak dinamik iş kümesinde iş listesi sınırsızdır ve değişebilmektedir. Statik işler de kendi içerisinde iki farklı sınıfa ayrılmaktadır: deterministik ve stokastik. Eğer iş kümesi sınırlı ve işler hakkında gelecekte bir belirsizlik yoksa bu işler **deterministik işler** olarak adlandırılmaktadır. Ancak iş kümesi belirli ama işlere ait bazı belirsiz değişkenler varsa bu iş kümesi **stokastik iş kümesi** olarak adlandırılır.

Yeniden Çizelgeleme Çevresi				
Statik (Sınırlı İş Kümesi)		Dinamik (Sınırsız İş Kümesi)		
Deterministik (bütün bilgiler verilmiş)	Stokastik (bazı bilgiler belirsiz)	Geliş Değişkenliği yok	Geliş Değişkenliği (akış tipi)	Proses Akış Değişkenliği (atölye tipi)
Yeniden Çizelgeleme Stratejileri				
Dinamik		(Oluştur ve Güncelle)		
Öncelik Kuralları	Kontrol	Yeniden Çizelgeleme Politikaları		
		Periyodik	Olay Güdümlü	Hibrit
Yeniden Çizelgeleme Metotları				
Çizelge Üretme		Çizelge Tamir Etme		
Nominal Çizelge	Robust Çizelgeler	Sağa Kaydırmalı Yeniden Çizelgeleme	Kısmi Yeniden Çizelgeleme	Tamamıyla Yeniden Çizelgeleme

Şekil 1.4. Yeniden çizelgeleme süreci (Vieira,2003)

Dinamik işler ise kendi içerisinde üç sınıfa ayrılmaktadır: iş gelişlerinde herhangi bir belirsizliğin olmadığı ve iş kümesinin sınırsız olduğu işler; iş gelişlerinde bazı belirsizliklerin yer aldığı ve iş kümesinin sınırsız olduğu işler ve iş gelişlerinde değişkenliğin ve iş akışlarında değişkenliğin yer aldığı işlerdir.

Yapılan bu çalışmada dinamik esnek atölye tipi üretim için çizelgeleme problemi örneğinde yeniden çizelgeleme yapılırken yeni iş gelişleri sisteme dinamik olarak gelmektedir.

1.3.1. Yeniden Çizelgeleme Stratejileri

Yeniden çizelgeleme stratejisi, bir üretim çizelgesinin hangi sıklıklarda ve ne zaman yeniden çizelgeleneceğine karar vermektir. Yeniden çizelgelemenin yapılacağı zamana “**yeniden çizelgeleme noktası**”, hangi sıklıklarda yeniden çizelgeleme yapılması gerektiği ise “**yeniden çizelgeleme aralığı**” olarak tanımlanır.

Yeniden çizelgeleme aralığı, iki ardışık yeniden çizelgeleme noktası arasındaki zamanı (çizelgeleme sıklığı) ifade etmektedir.

Yeniden çizelgeleme zamanına karar vermek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Genel olarak iki yaygın strateji ile çizelgeler yenilenmektedir:

1. Dinamik Çizelgeleme
2. Tahmine Dayalı Reaktif Çizelgeleme

Dinamik Çizelgeleme stratejisinde; işlerin öncelikleri ön plandadır ve üretim çizelgeleri oluşturulmaz. Belirli bir üretim kaynağında yapılmak üzere bekleyen işlerin önceliklerine, ya yollama kuralları kullanılarak ya da sezgisel yöntemlerle karar verilir. Dinamik çizelgeleme stratejisi, literatürde çevirim içi (online) çizelgeleme olarak adlandırılır.

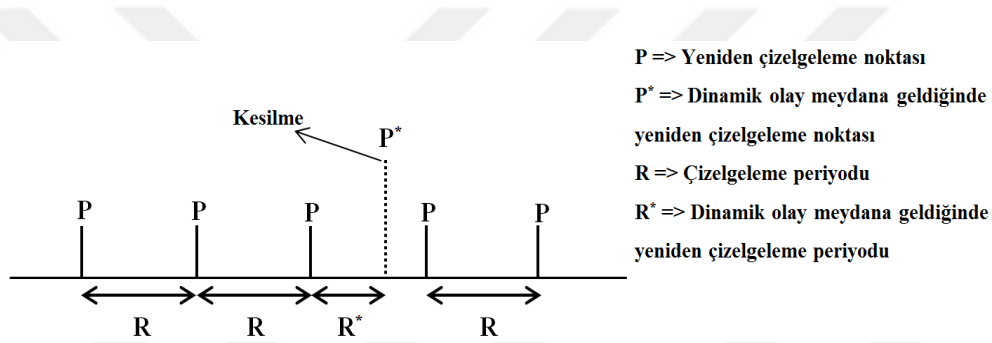
Diğer bir yeniden çizelgeleme stratejisi olan tahmine dayalı reaktif çizelgeleme ise çevirim dışı (offline) çizelgeleme olarak adlandırılır ve çizelgelerin değişen durumlara uyum sağlaması için güncellenmesi sürecini içermektedir. Tahmine dayalı reaktif çizelgelemede öncelikle çizelgeler oluşturulur, daha sonra meydana gelen değişimin sistem performansına etkisinin minimize edilmesi için sürekli çizelge güncellenir.

Üç tip tahmine dayalı reaktif yaklaşım vardır: periyodik olarak çizelge güncellenmesi, olaya dayalı olarak çizelge güncellenmesi veya her ikisinin birleşiminden oluşan hibrit yaklaşım.

Periyodik olarak çizelge güncellenmesi gerçekleştirilirken; belirli zaman periyotlarında yeniden çizelgeleme yapılmaktadır ve iki yeniden çizelgeleme noktası arasında meydana gelebilecek olaylar göz ardı edilmektedir.

Olaya dayalı olarak çizelgelerde güncelleme yapılırken; çizelgenin yürütülmesi esnasında herhangi bir beklenmedik durumla karşılaşıldığında yeniden çizelgeleme yapılmaktadır.

Bunun yanı sıra üçüncü strateji olan **hibrit reaktif yaklaşımda** hem periyodik olarak hem de sistemi etkileyen önemli bir olay meydana geldiğinde yeniden çizelgeleme yapılır. Şekil 1.5.'te hibrit tahmine dayalı reaktif yeniden çizelgeleme yaklaşımı gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi hibrit yaklaşımda, üretim sisteminde işlerin periyodik olarak R zaman aralıklarıyla P noktalarında yeniden çizelgelenmesi gerçekleştirilirken, ek olarak P* anında rastgele gerçekleşen bir olay meydana geldiğinde zamanda da (kesilme) yeniden çizelgeleme yapmaya karar verilmektedir.



Şekil 1.5. Hibrit tahmine dayalı reaktif yaklaşım (Pfeiffer ve ark., 2007)

1.3.2. Yeniden Çizelgeleme Metotları

Bir üretim sisteminde herhangi bir nedenden dolayı bir kesinti meydana geldiğinde yeniden çizelgeleme yapmak için ya yeni çizelgeler oluşturulur ya da çizelge tamir edilir.

Yeni çizelgeler oluşturulurken ufak değişiklikler yapılabilir. (**nominal çizelge**) Örneğin işlerin kesintiden sonra küçük miktarda sağa doğru kaydırılması vs. gibi daha kolay ve zaman almayan bir yöntem kullanılabilir. Ancak bir kesinti meydana geldiği zaman çizelgenin kalitesinde önemli değişiklikler meydana gelmemesi isteniyorsa yeniden çizelgelemede sistemin istenen performansı sağlaması için dayanıklılık ön plana çıkmaktadır. **Dayanıklı çizelgeler** oluşturmada küçük değişikliklere değil, daha dayanıklı (robust) çizelgeler oluşturmaya odaklanılır. Bir çizelgenin **dayanıklı** olarak adlandırılması için kesinti olayı

gerçekleştikten sonra bile çizelgenin iyi performansla sahip olması ve meydana gelen değişikliklerden dolayı sistemin eski durumundan çok farklı olmaması gerekir.

Yeniden çizelgeleme metodlarından bir diğeri ise **çizelgeyi tamir etmektir**. Bir çizelgeyi tamir etmede dinamik olayın meydana geldiği andan itibaren aşağıdaki değişiklikler yapılarak yeniden çizelgeleme yapılır.

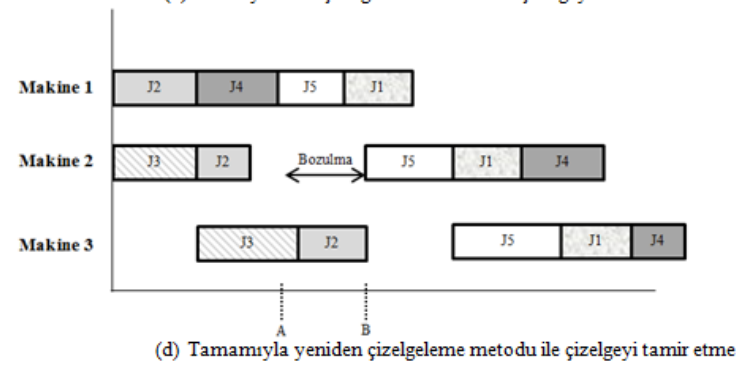
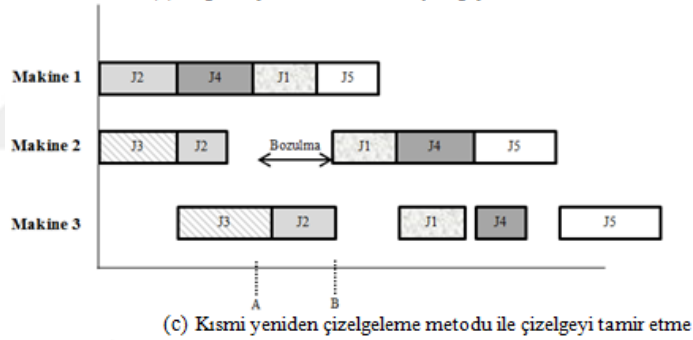
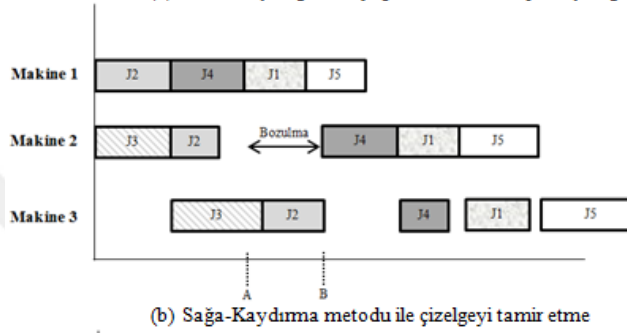
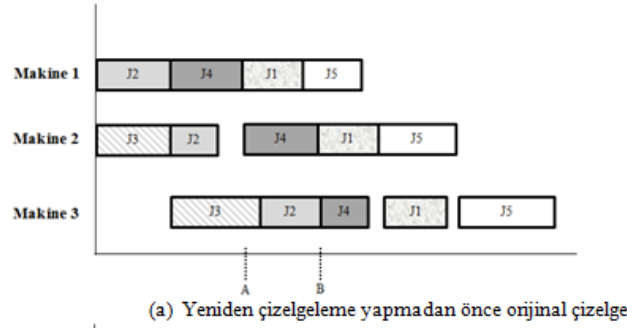
- a. Sağa Kaydırma
- b. Kısmi Yeniden Çizelgeleme
- c. Tamamıyla yeniden çizelgeleme

Sağa kaydırma yönteminde; bir dinamik olay meydana geldiğinde dinamik olaydan etkilenen işlerin sırası değiştirilmez. Olaydan etkilenen tüm işler dinamik olayın bitiminden itibaren çizelgede iş sırası değiştirilmeden sağa doğru kaydırılır.

Kısmi yeniden çizelgeleme tamir etme metodunda; çizelge tamiri yapılırken sadece dinamik olaydan direk ya da dolaylı olarak etkilenen işler iş sırası değişerek ya da değişmeden yeniden çizelgelenir. Başlangıç çizelgesindeki durumlar mümkün olduğunca korunmaya çalışılır.

Tamamıyla yeniden çizelgeleme metodunda ise; dinamik olaydan sonra çizelgelenmeyen işlerin hepsi yeniden çizelgelenir.

Şekil 1.6.'da çizelgeyi tamir etme metodları bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Örnekte 3 makine ve 5 adet işten oluşan bir akış tipi üretim sistemi ele alınmıştır. [A-B] zaman aralığında Makine 2'nin bozulduğu varsayılmış ve her bir çizelge tamir etme metodu ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Çizelgeyi tamir etme metotları

Buna göre;

- ✓ Şekil 1.6.-a 'da üretim sisteminin dinamik olay meydana gelmeden önceki başlangıç çizelgesi yer almaktadır.
- ✓ Şekil 1.6.-b'de Sağa kaydırma yöntemi ile yeniden çizelgelemede; Makine 2'deki bozulmadan dolayı hem Makine 2'deki hem de Makine 3'teki bozulmadan etkilenen işler sağa doğru iş sırası değişmeden kaydırılarak B noktasından itibaren yeniden çizelgeleme yapılmıştır.
- ✓ Şekil 1.6.-c'de Kısmi yeniden çizelgeleme yönteminde; Makine 1'deki işler aynen kalmış ancak Makine 2 ve Makine 3'teki işler iş sırası değişerek yeniden çizelgelenmiştir. Burada başlangıç çizelgesinde 4 nolu iş 1 nolu işten önce biterken, yeniden oluşturulan çizelgede kritik 1 nolu iş 4 nolu işten daha önce bitmiştir.
- ✓ Şekil 1.6.-d'de ise Tamamıyla yeniden çizelgeleme metoduna göre ise; tüm makinelerdeki bozulmadan sonra etkilenen tüm işler iş sırası değişerek tamamıyla yeniden çizelgelenmiştir. Buna göre hem 5 nolu hem de 1 nolu iş, 4 nolu işten önce bitirilmiştir.

1.3.3. Yeniden Çizelgeleme ve Dayanıklılık (Robustness)

Bir üretim sisteminde dinamik olaylar meydana geldiğinde yeniden çizelgeleme yapılırken çizelgenin dinamik özelliğini ifade etmede performans ölçütü önemli rol oynamaktadır. Çizelgeleme problemlerinde yeniden çizelgeleme durumlarında son zamanlarda dikkate alınan önemli bir performans ölçütü çizelgenin dayanıklı (robust, dirençli) olmasıdır.

Dayanıklılık, dinamik bir durumla karşılaşıldığında sistem performansının çok fazla değişmemesi, düşmemesidir. Dinamik durumlardan dolayı değişiklikler meydana geldiğinde robust bir çizelgenin performansının değişikliklere karşı duyarlı olmaması yani kararlı olması gerekmektedir (Gören, 2002). Robust olmayan bir çizelge süreklilik eksikliği ve kararsızlıkla sonuçlanabilir veya sistem sinirliliği

(planlanan durumlarda değişkenlik-nervousness) adı verilen duruma yönelten ek üretim maliyetleri ortaya çıkabilir. Bu durumu engellemek amacıyla dayanıklılık özelliği çizelgeleme problemlerinde önemli bir performans ölçütü olarak dikkate alınmaktadır.

Robust çizelgenin kararlılığı dinamik olay meydana geldikten sonra gerçekleşen çizelgenin başlangıç çizelgesinden sapmaması demektir. Literatürde farklı kararlılık ölçütleri bulunmaktadır:

- ✓ Literatürde kullanılan kararlılık ölçütlerinden biri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\text{Min } \sum |C_i^* - C_i^0|$$

Burada C_i^* dinamik olay meydana geldikten sonra i işinin tamamlanma zamanını gösterirken, C_i^0 başlangıç çizelgesindeki i işinin tamamlanma zamanlarını ifade etmektedir (Al-Hinai ve ElMekkawy, 2011).

- ✓ İkinci olarak işlerin tamamlanma zamanları farkının ortalaması kararlılık ölçütü olarak kullanılabilir. Bu tip kararlılık ölçütü aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\text{Min } \frac{\sum |C_i^* - C_i^0|}{O_i}$$

O_i ise i işinin toplam operasyon sayısını ifade etmektedir. Bu değerin minimize edilmesi çizelgenin kararlı olmasını ifade etmektedir (Al-Hinai ve ElMekkawy, 2011).

- ✓ Başka bir kararlılık ölçütü ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Min } \frac{\sum |C_i^* - C_i^0|}{EO_i}$$

EO_i ise dinamik olaydan etkilenen i işinin toplam operasyon sayısını ifade etmektedir. Bu değerin minimize edilmesi çizelgenin kararlı olmasını ifade edilmektedir (Al-Hinai ve ElMekkawy, 2011).

- ✓ Diğer bir kararlılık ölçütü, işlerin veya operasyonların dinamik olaydan sonra gerçekleşen çizelgedeki ve başlangıç çizelgesindeki başlangıç zamanları farkının toplamının ve toplam sapma cezasının minimize edilmesi ile ifade edilmektedir:

$$\text{Min } \sum |T_i^* - T_i^0| + f(c)$$

Burada $\sum |T_i^* - T_i^0|$ sapmaların toplamını, $f(c)$ ise sapmalardan dolayı gerçekleşen ceza fonksiyonunu ifade etmektedir (Fattahi ve Fallahi, 2010).

Bu ölçütlerin dışında, farklı ifadelerin yer aldığı birçok ölçüt literatürde çizelgenin kararlılığını ölçülmesinde kullanılmaktadır.

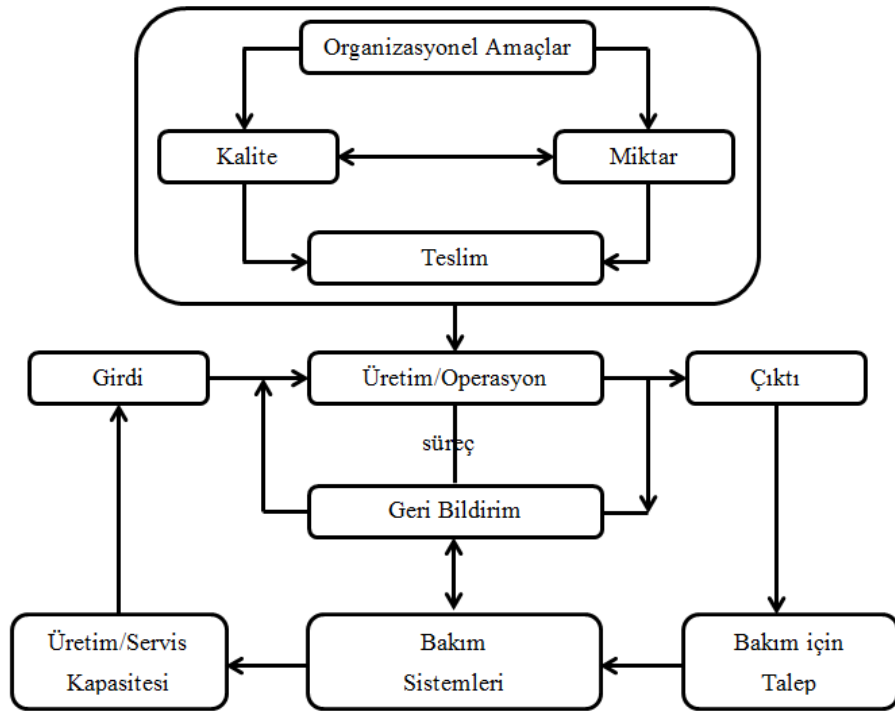
1.4. Üretim Sistemlerinde Bakım

Bir üretim sisteminde rekabette başarı sağlanabilmesi için üretim sisteminin kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Sistemin kalitesinin iyileştirilmesinde önemli faktörlerden biri üretimde kullanılan makine ve teçhizatların bakımudur.

Genel olarak **bakım**; bir ekipmanın veya sistemin iyi durumda kalması ve iyi bir şekilde belirtilen işlevleri yerine getirmesi için gerçekleştirilen faaliyetler bütünüdür. **Üretim sistemlerinde bakım ise**; üretim sisteminde istenen en yüksek verimi almak ve herhangi bir durumda meydana gelebilecek aksamaların en aza indirilmesini sağlamak amacıyla yapılan işlemlerin tümüdür. Bakım faaliyetleri sistemin amaçlarıyla uyumlu olarak ve bir sistem içerisinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.7.' de bir üretim sisteminde sistemin amaçları ve bakım sistemleri arasındaki ilişki gösterilmiştir (Duffuaa ve ark., 2015).

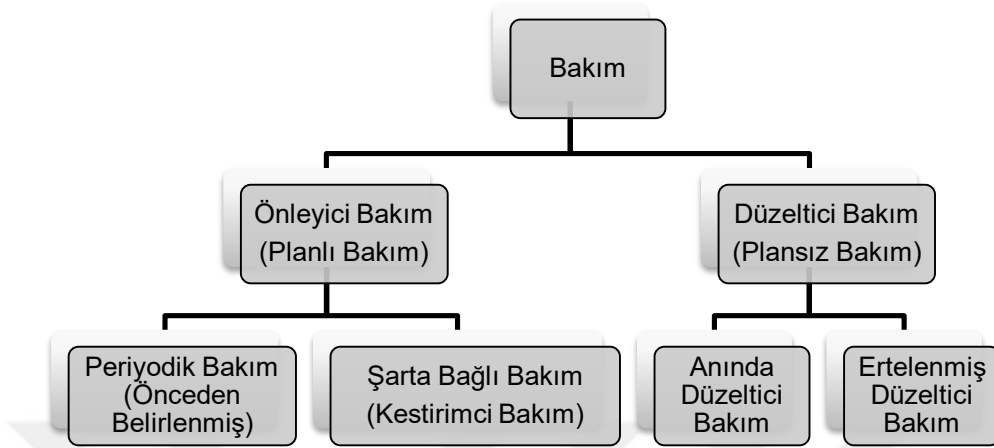
Bu ilişkiye göre üretim sistemlerinde hammadde, insan, makine gibi birçok girdinin müşteri ihtiyaçlarının sağlanması ve istenilen miktarda ve kalitede ürünün

zamanında teslimi gibi organizasyonel amaçların gerçekleştirilmesi için nihai ürüne dönüştürülürken bozulmuş veya arızalı ekipman ortaya çıkabilmektedir. Üretim kalitesinin iyileştirilmesi için ise bu arızaların giderilmesi ve bakımı önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1.7. Organizasyonun amaçları ve bakım sistemleri arasındaki ilişki (Duffuaa ve ark., 2015)

İyi bir bakım sistemi ve stratejisi sayesinde üretimde maksimum çıktı için kaynakların en iyi şekilde kullanılması sağlanmaktadır. Bu yüzden üretim sistemi için hangi bakım stratejisinin uygulanması gerektiğine karar verilmelidir. EN 13306:2001 bakım standardına göre bir üretim sisteminde bakım stratejileri Şekil 1.8.' deki gibi sınıflandırılmaktadır (EN 13306:2010).



Şekil 1.8. Bakım stratejileri (BSI EN 13306:2010)

Bu sınıflandırmaya göre bakım, önleyici bakım ve düzeltici bakım olarak ikiye ayrılmaktadır. **Önleyici bakım** diğer bir ifadeyle planlı bakım, üretim sisteminde kullanılan ekipmanda herhangi bir arıza meydana gelmesi beklenmeksizin gerçekleştirilen bakımdır. Plansız bakım olarak da bilinen **düzeltilici bakım** ise herhangi bir arıza durumunda makine ve ekipmanların bakımı yapılmaktadır.

Bu bakım yöntemlerinden ayrıntılı bir şekilde bahsedilecek olursa;

1. Önleyici Bakım (Planlı Bakım-Proactive maintenance): Bu bakım yönteminde makine ve ekipmanlarda meydana gelebilecek muhtemel arızaların önüne geçilmeye çalışılır. Amaç arızayı tespit etmek değil, ekipmanın arıza gerçekleşme olasılığını düşürmektir. Arızaya sebep olabilecek sebepler ortadan kaldırılır. Kendi arasında önleyici bakım, “**periyodik veya önceden belirlenmiş**” ve “**şarta bağlı**” olarak ikiye ayrılır.

Periyodik Bakım (Koruyucu Bakım-Preventive maintenance): Önceden belirlenen bir zaman periyodu için bakım yapılmaktadır. Düzenli bir şekilde makineler veya ekipmanlar gözden geçirilerek tespit edilen arızalar giderilmektedir. Bu bakım yönteminde arızanın gerçekleşmesi beklenmez ve daha önceki bakım

dönemi dikkate alınarak olası çıkabilecek arızaların önüne geçilir. Bakım işlemleri önceden bakım programlarıyla planlanır. Programlar günlük, haftalık, aylık, üç aylık, altı aylık veya yıllık olarak yapılabilir. Bakım işlemleri

Şarta Bağlı Bakım (Kestirimci Bakım-Uyarıcı Bakım-Predictive maintenance): Üretim sisteminde belli noktalarda makine ve ekipmanlar izlenerek durumları hakkında veriler toplanır. Bu veriler yardımıyla olası değişimlerin gözlemlenmesi ve üretim kayıplarının en aza indirilmesi sağlanır. Bir takım ölçüm cihazlarıyla üretim durdurulmadan toplanan veriler sayesinde meydana gelebilecek arıza ve olumsuz durumlar önceden tespit edilebilmektedir. Uygulama aşamasında öncelikle ölçme işleminin yapılacağı kritik noktalar belirlenir daha sonra elde edilen ölçüm sonuçlarıyla oluşabilecek olumsuzlukların takibi yapılarak önlem alınır. Önleyici bakımdan farkı bakımın zamana dayalı değil de duruma dayalı yapılmasıdır.

1. Düzeltici Bakım: Bir ekipmanın arızalanması durumunda gerekli fonksiyonları tekrar yerine getirebilmesi için gerçekleştirilen bakım faaliyetleridir. Düzeltici bakım da ikiye ayrılmaktadır: “**anında düzeltici bakım**” ve “**ertelenen düzeltici bakım**”.

Anında Düzeltici Bakım: Kabul edilemez sonuçlardan kaçınmak için bir arıza gerçekleştiğinde hemen sonra yapılan bakımdır.

Ertelenen Düzeltici bakım ise; arıza meydana geldikten sonra belirlenen bakım kurallarına göre bakım faaliyetlerinin belirli bir süre ertelendiği düzeltici bakımdır.

1.5. Problemin Tanımı

Bu çalışmada ele alınan problem, makinelerin belirli periyotlarla toplu şekilde bakım gördüğü, yeni iş gelişlerinin yer aldığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemidir. Bu problem literatürde dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin altında yer alan bir problem tipidir. Bu problemin karşılaşıldığı üretim sistemi özelliklerine göre şu şekilde ifade edilebilmektedir:

- **Makine ortamı olarak;** tüm operasyonların bütün makineler tarafından yapılabildiği esnek paralel makinelerin yer aldığı üretim sistemidir.
- **İş özelliği olarak;** yeni iş gelişlerinin yer aldığı dinamik üretim sistemidir.
- **Akış tipine göre;** bir çağdaş üretim sistem tipi olan esnek üretim sistemlerinden esnek atölye tipi üretim sistemidir.

Bunun yanı sıra bu problemde makinelerin belirli dönemlerde **periyodik** olarak toplu şekilde bakıma gönderilmesi, yeni işlerin gelmesi, gibi dinamik durumlar bu problemde dikkate alınmıştır. Bu tipte üretim sistemleri için, meydana gelen bu dinamik durumlardan dolayı yeniden çizelgeleme yapılarak çizelgelemede istenen performansın gerçekleşmesi sağlanmıştır. Çizelgede değişiklik yapılırken, yeniden çizelgelemede yukarıda bahsedilen dinamik olaylar meydana geldiği anda yani bir başka ifadeyle **olaya dayalı olarak** yeniden çizelgeleme yapılmıştır. Çizelgeleme metodu olarak yeni iş geliş zamanından sonra o ana kadar çizelgelenmeyen işlerin operasyonları ile birlikte yeni işlerin operasyonları birlikte yeniden çizelgelenmiş bir başka ifadeyle **tamamıyla yeniden çizelgeleme** yapılmıştır. Diğer bir strateji olarak ise yeni gelen işlerin operasyonlarının başlangıç çizelgesinde **atandığı makinenin boş kalma zamanında** başlamasını sağlamaktır.

Dinamik durumlardan dolayı makinelere yapılan operasyon atamalarının ve makinelerdeki sıralamanın değişmesi nedeniyle üretim sisteminde yer alan işlerin teslim zamanlarındaki değişim, dinamik durumlarda üretimde sinirliliğin oluşması, üretimde süreklilik eksikliği, kararsızlık ve değişen durumların getirebileceği ek maliyetlerin önüne geçebilmek için yapılan çalışma ile bir esnek atölye tipi üretim sisteminde farklı bakım periyotlarının ve farklı zamanlarda yeni iş gelişleri nedeniyle işlerin bitiş zamanlarının başlangıç durumuna göre değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Amaç ele alınan dinamik durumlarda dayanıklı çizelge oluşturma zorluğu ortaya koymaktır.

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ele alınan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin amacı, farklı bakım periyotlarında ve farklı yeni iş geliş zamanlarında çizelgelerdeki değişimleri karşılaştırmak ve dayanıklı çizelgeler oluşturmanın farkını ortaya koymaktır. Burada dayanıklı ve kararlı çizelgeler oluşturmak amacıyla, *tüm işlerin tamamlanma zamanı* ve kararlılığı sağlamak amacıyla ise amaç fonksiyonunda *ilk oluşturulan çizelge ve yeniden oluşturulan çizelge arasındaki tüm işlerin başlama zamanları farkı* minimize edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra bir diğer amaç ise yeni iş gelişlerinde işlerin başlangıç çizelgesindeki makinelerin boş zamanına atanması metodunun çizelgeleme üzerindeki etkisini incelemektir.

Ele alınan problemin kapsamı ise şu şekilde ifade edilebilir:

- **Esnek bir üretim sistemidir:** çok sayıda operasyon birden fazla makinede yapılabilir.
- **Dinamik olaylar mevcuttur:** yeni iş gelişleri ve değişken bakım periyotları mevcuttur.
- **Operasyonlar arasında öncelik ilişkileri yer almaktadır:** Bir işin bir operasyonu kendinden önceki operasyon bittikten sonra başlamaktadır.
- **Deterministik operasyon süreleri mevcuttur:** operasyon süreleri her makinede yapılmak şartıyla (tam esnek) önceden belirlenmiştir.
- **Makine bakımları mevcuttur:** Makineler periyodik zamanlarda toplu olarak bakıma gitmektedir.
- **Makine bakımlarından dolayı operasyonların atanması ve sıralanması değişmektedir.**
- **Yeniden çizelgeleme durumunda iki yöntem ele alınmıştır:** tamamıyla yeninden çizelgeleme ve sona ekleme yöntemi.

1.7. Çalışmanın Orijinal Katkısı

Yapılan bu çalışmanın orijinal katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Bu çalışma ile bakımın dikkate alındığı esnek atölye tipi üretim sistemleri için dinamik durumlarla karşılaşıldığında operasyonların çizelgelenmesi sağlanmaktadır.
- ✓ Ele alınan dinamik probleme özgü iki farklı yeniden çizelgeleme metodu için yeni modeller oluşturulmaktadır.
- ✓ Yeniden çizelgeleme zamanlarındaki değişim ile belirlenen amaç fonksiyonlarının değişimi incelenmiştir.
- ✓ Dinamik yapıya bakım dahil edilerek tam esnek atölye tipi üretim sistemleri için kararlı çizelgeler oluşturulabilecektir.
- ✓ Bakım periyotlarındaki değişim ile belirlenen amaç fonksiyonlarındaki etkisi ortaya koyacaktır.

1.8. Çalışmanın Adımları

Yapılan çalışmada sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir;

1. **Problemin Genel Tanımı:** Çalışmada incelenen problemin genel olarak tanımının yapılması,
2. **Yapılan Önceki Çalışmaların İncelenmesi:** Ele alınan probleme ait literatürde yapılmış çalışmaların ayrıntılı incelenmesi,
3. **Problemin Genel Olarak Matematiksel Modelinin İfade Edilmesi:** Çalışmada ele alınan probleme ait literatürde yer alan genel matematiksel modele ait değişkenlerin, kısıtların, özelliklerin ayrıntılı bir şekilde ifade edilmesi,
4. **Probleme ait Önerilen Matematiksel Modellerin İfade Edilmesi:** Ele alınan probleme ait oluşturulan matematiksel modellerin varsayımlarının ve model notasyonlarının ayrıntılı bir şekilde ifade edilmesi,
5. **Modelin Performansının Test Edilmesi:** farklı problem senaryoları için düzenlenen veri setleri ile önerilen modellerin test edilmesi,

6. **Sonuçların Değerlendirilmesi ve Öneriler:** Çalışmada elde edilen sonuçların özetlenmesi, tartışılması ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerin sunulması.

1.9. Çalışmanın Organizasyonu

Yapılan tez çalışmasının ilk bölümünde çizelgeleme problemleri genel olarak tanıtılmış, çizelgeleme probleminin türleri ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra çalışmada esas alınan esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin yapısı, matematiksel olarak gösterimi ifade edildikten sonra ele alınan problemin dinamiklik yapısı ve dinamik durumlarda çizelgelemede yapılabilecek değişikliklerin çizelgeye aktarıldığı yeniden çizelgeleme durumları ifade edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, probleme ait literatürde yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde incelenen literatür makine bakımlarının dikkate alındığı çalışmalar ve dinamik durumların ele alındığı çalışmalar başlığı altında iki kısımdan oluşmaktadır. İncelenen literatür amaç, kapsam, yöntem ve elde edilen sonuçlar olarak ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, incelenen problem için performans değişkenleri, karar değişkenleri, parametreleri, varsayımları, kısıtları belirtilerek problemin matematiksel modelleri oluşturulmuş, oluşturulan matematiksel modellerin test edilebilmesi için kullanılan verileri tablolar halinde gösterilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, öncelikle dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin dinamikleri hakkında bilgi verildikten sonra, literatürden alınan ve uyarlanan verilerle farklı problem senaryoları için önerilen modeller test edilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise, elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde farklı türde esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde hem atama hem de sıralama alt problemleri için birçok çözüm yaklaşımı mevcuttur. Ele alınan problemler işleyişine, amaç fonksiyonuna, çözüm yaklaşımlarına ve çözüm için kullanılan yöntemlere göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada incelenen problem dinamik yapıda, makine bakımlarının yer aldığı ve amaç olarak kararlılığın ele alındığı bir çalışmadır. Bu nedenle incelenen literatürde, makine bakım durumlarını dikkate alan, beklenmedik zamanda beklenmedik olaylardan kaynaklanan dinamik durumları dikkate alan ve dinamik yapılarda dayanıklılığı dikkate alan esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri ayrı şekilde irdelenerek özetlenmiştir.

2.1. Makine Bakımlarının Dikkate Alındığı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri

Esnek atölye tipi üretim sistemlerinde makineler zaman zaman çalışma koşullarının olumsuzluğu nedeniyle her zaman uygun durumda bulunmayabilir. Üretim esnasında üretim faaliyetlerinin aksamaması, kesintisiz şekilde devam etmesi için makineler düzenli olarak veya herhangi bir anda meydana gelen aksaklık durumunda bakım ve onarıma ihtiyaç duymaktadır. Yapılan bakım ve onarım faaliyetleri sayesinde üretim kayıpları en aza indirilirken aynı zamanda mümkün olan en yüksek düzeyde üretimin gerçekleşmesi sağlanmaktadır.

Genel olarak esnek atölye tipi üretim sistemlerinde farklı çeşit bakım durumları yer almaktadır. Literatürde incelenen sistemlerin çoğunda makine bakımları, belirli zaman aralıklarında bakım planları aracılığıyla yapılmakta bu sayede beklenmeyen arızalar en aza indirilmektedir. Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde bakımın dikkate alındığı çalışmalardan biri olan Zribi ve Borne (2005) tarafından yapılan çalışmada, makine bakımların belirli zaman aralıklarında yapıldığı ve bakım süresi boyunca makinelerin uygun olmayan durumda bulunduğu

kabul edilmiştir. Operasyonların makinelere atanması için ilk gelen iş ilk yapılır (FIFO-First in First Out- Üretim yerinde, işler üretime geliş sıralarına göre işlem görür) ve ilk uygun makine (FAM-First Available Machine) gibi öncelik kuralları kullanılmıştır ve maksimum yüklü makine iş yükü minimize edilmeye çalışılmıştır. Çözüm kalitesini arttırmak için operasyonların makinelere atanmasında Tabu arama algoritmasında dayalı yerel bir arama prosedürü geliştirilmiştir. Ayrıca atama kalitesini değerlendirmek için uygun bir kriter geliştirilmiş, operasyonların makinelerde sıralanmasında ise bakım periyot kısıtlarını dikkate alan hibrit bir genetik algoritma kullanılmıştır. Problemin çözümünde ise en son işin tamamlanma zamanı olan makespan değeri (C_{max}) minimize edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre literatürde yer alan orta ölçekli problemler için Tabu Arama algoritmasına dayalı arama prosedürü makespan değerini geliştirici sonuçlar vermiştir. Esnek atölye tipi üretim sistemlerinde kullanılabilirlik kısıtlarının dikkate alındığı diğer bir çalışma ise Gao ve ark. (2006) yaptıkları çalışmadır. Yapılan çalışmada, çizelgeleme süreci boyunca sabit olmayan kullanılabilirlik kısıtlarının yer aldığı esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü hibrit bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Arama kabiliyetini geliştirmek için genetik algoritma metoduna yerel bir arama prosedürü entegre etmişlerdir. Problemin çözümünde başlangıç çözümü için iki tip komşuluk tanımlanmıştır. Popülasyona dahil etmeden önce her çocuk için genetik algoritmaya bir arama iyileştiricisi eklenmiştir. Yapılan çalışmada her bir makine keyfi sayıda önleyici bakım faaliyetlerine tabi kabul edilmiştir. Varsayımlara göre bir makinede bakım aktivitesi gerçekleştirildikten sonra o makinedeki iş tamamıyla tekrar proses edilmiştir yani operasyonların yarıda kesilmediği durum dikkate alınmıştır. Önceden belirlenmiş olan zaman aralıklarında bakım faaliyetlerinin gerçekleştirildiği ve bakım işlerinin tamamlanma zamanının bu zaman aralığı ile sınırlandırıldığı durum incelenmiştir. Önerilen algorithmada bakım işleri çizelgelenirken aşağıdaki durumlar dikkate alınmıştır:

1. Bakım işleri ilk olarak kendi zaman penceresinin son anına eklenerek çizelgelenmiştir.
2. Yeni bir operasyonun bir makinede çizelgelenmesi gerektiğinde makinedeki bakım işi, bakım işlerinden önce operasyonu çizelgelemek için bakım zaman penceresinin sınırları uygun olduğu sürece mümkün olduğu kadar sağa doğru kaydırılmıştır.
3. Bir operasyonun bakım işinden sonra çizelgelenmesi gerekiyorsa, operasyonun mümkün olduğu kadar daha erken başlaması için bakım işleri mümkün olduğu kadar sola kaydırılmıştır.

Çalışmalarında makespan değerini, maksimum makine iş yükünü ve makinelerin toplam iş yükünü minimize etmeye çalışmışlardır ve literatürde yer alan örnek büyük ölçekli karşılaştırma problemlerinde önerdikleri algoritma ile etkili sonuçlar almışlardır. Gerçek bir üretim sisteminde bakımın dikkate alındığı Lin ve Zhen' in 2009 yılında yaptıkları çalışmada, Çin' de yer alan Baoshan Iron and Steel Complex fabrikasında dikişsiz çelik boru üretiminde esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele aldıkları problemde ara stok kısıtlarını, kapasite ve hız kısıtlı paralel makinelerini ve makine bakımlarını dikkate almışlardır. Hem rotalama hem de sıralama için karışık tam sayılı matematiksel model oluşturmuşlardır. Problemde amaç gecikmeyi azaltmak, üretimde kesintiyi azaltmak ve makine boş zamanını minimize etmektir. Dikişsiz çelik boru üretiminde diğer boru üretimlerinden farklı olarak farklı üretim aşamaları ve her üretim aşamasında farklı paralel makineler bulunduğundan dolayı oluşturulan modelde her aşamada bakım, stoklar, rotalama farklı ele alınmıştır. Makineler farklı hızlara ve farklı hazırlık zamanlarına sahiptir. Makine bakımları ise önceden belirlenmiştir. Problem değiştirilmiş genetik algoritma kullanılarak çözülmüştür. Genetik algorithmada iki parçalı olarak ifade edilen kromozom yapısında tek nokta ve iki nokta çaprazlama operatörü ve mutasyon için ise rastgeleliğin esas alındığı bir operatör kullanılmıştır. 2008 yılının Haziran ayına ait gerçek veri setleri üzerinde önerilen çözüm yöntemi

test edilmiş ve işlerin gecikmesini azaldığı ve makine boş zamanlarının düştüğü görülmüştür. Çok amaçlı bakımı dikkate alan başka bir çalışma ise Jing ve Tomohiro (2010)' nun yaptığı çalışmadır. Yapılan çalışmada ele alınan problem belirli periyotlarda bulanık bakım zamanlarını, bulanık teslim tarihlerini ve bulanık proses zamanlarını içeren çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemidir. Amaç fonksiyonunda tüm operasyonların tamamlanma zamanı (makespan değeri) minimize etmeye çalışılırken, kullanıcı memnuniyeti ve makine kararlılığı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Bakım zamanları önceden belirli aralığı kapsamaktadır. Çalışılan problem için Arı kolonisi algoritması ve tabu arama algoritmasının bir arada kullanıldığı çok amaçlı hibrit bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bulanık proses zamanlarında üçgensel üyelik fonksiyonunu, daha önceden belirli periyodu bulanık teslim tarihlerinde ise yamuk üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen yöntem literatürde yer alan üç karşılaştırma problemi ile test edilmiş, karşılaştırma problemlerinde önerilen yöntemlere göre geliştirilen algoritmanın daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Sabit olmayan kullanılabilirlik kısıtlarının yer aldığı diğer bir çalışma olan Rajkumar ve ark. (2010)' nın çalışmasında bakım zamanlarının önceden belirlenmiş zaman aralığında olduğu problemler için çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Ele alınan problemde bakımlar daha önceden belirli sabit aralıklarda yapılmaktadır. Aynı zamanda varsayım olarak bir operasyonun bakım veya herhangi bir başka operasyon tarafından kesilmesine izin verilmemektedir. Problemin çözümü için açgözlü (greedy) rastsal uyarlamalı arama algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen algorithmada rotalama ve işlerin sıralanması problemleri ayrı ayrı ele alınarak algoritma uygulanmıştır. Problemde makespan değeri, makinelerin toplam iş yükü ve maksimum makine iş yükü (her bir makinede harcanan maksimum çalışma zamanı) minimize edilmeye çalışılmıştır. Önerilen algoritma literatürdeki küçük, orta ve büyük ölçekli hem kısmi esnek hem de esnek dört örnek problem üzerinde test edilmiş ve etkili sonuçlar elde etmiştir.

Bakım faaliyetlerinin belirli bir zaman aralığında yapıldığı ancak bakım başlama zamanının sabit olmadığı problemi ele alan Wang ve Yu (2010)'un

çalışmalarında bakım kaynak kısıtları olarak iki durum dikkate alınmıştır: yeterli sayıda uygun bakım kaynağının mevcut olduğu durum ve sadece bir bakım kaynağının uygun olması durumu. Çalışmada bakım aktivitelerine dayalı problemlerin çözümü için süzölmüş ışın taraması yöntemi geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonunda üç kriteri eş zamanlı olarak minimize etmeye çalışmışlardır: makespan değeri, makinelerin toplam iş yükünü ve maksimum makine iş yükü (kritik makinenin iş yükü). Ele alınan problemde operasyonların yarıda kesilmemesi varsayımı yer almaktadır. Problemin çözümü için önerilen algoritmada dört temel element söz konusudur: çözüm uzayını tanımlamak için ağaç gösterimi ile arama, süzme genişliğine ve ışın genişliğine karar verme, dallandırma düzeni ve yerel ve global değerlendirme fonksiyonlarının seçimi. Bakım faaliyetleri, öncelik kısıtları dikkate alınmaksızın bir iş gibi düşünülmüştür. Önerilen yöntem literatürde yer alan karşılaştırma probleminde sadece bir bakım kaynağı olması ve yeterli sayıda bakım kaynağı olması durumları farklı olarak ele alınarak test edilmiş, iki amaç için literatür problemlerine yakın sonuçlar elde edilirken toplam makine iş yükü açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yöntemin karar vericiler için alternatif çizelgeleme yöntemi olarak tercih edilebileceğini göstermişlerdir.

Bakım sayıları ve bakım zamanı aralıkları değişken olan çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele alan Moradi ve ark. (2011) bütünleşik üretim ve bakım çizelgeleme için bütünleşik model önermişlerdir. Çalışmada uygulanabilir ve kolay genişletilebilir bakım politikasına başvurmuşlar ve etkili öğrenebilen bir genetik mimari gerçekleştirmişlerdir. İki amaçlı ele alınan problemde C_{max} değerini ve sistemin kullanım dışı kalma durumunu (makinelere kullanılamazlığı) minimize etmeye çalışmışlardır. Problem varsayımlarında operasyonların ya da bakım aktivitelerinin yarıda kesilmesine izin verilmemiştir. İki farklı bakım politikası dikkate alınmıştır. Birinci politikada önceden belirlenmiş sabit zaman aralıklarında bakım faaliyetleri gerçekleştirilirken ikinci politikada ise zaman aralıkları ilk başta belirlenir. Daha sonra eğer makinede o ana kadar yapılmış işlem süresi bakım zamanından fazlaysa önce bakım aktivitesi gerçekleştirilir daha sonra operasyon

işlenir. Problemin çözümü için bastırılmayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA) ve sıralamasız genetik algoritma (NRGA) yöntemleri ile birlikte öncelik kurallarının eklenmesi ile elde edilen dört farklı genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntemler büyük ölçekli (4800 ü aşan verilerin bulunduğu) problemlerde oldukça etkin sonuç elde edilmiştir.

Makine bakımlarının dinamik olarak belirli bir aralıkta değişebildiği diğer bir çalışma olan Dalfard ve Mohammadi (2012) yaptıkları çalışmada bakım kısıtları altında çok amaçlı esnek atölye tipi üretim için bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Problemin çözümünde ise iki adet meta sezgisel yöntem önermişlerdir. Hibrit bir genetik algoritma ve tavlama benzetimi olarak iki sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak makespan değeri, ortalama gecikme ve ortalama akış süresi farklı ağırlıklarla çarpılarak toplanmış ve oluşan fonksiyon minimize edilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan algoritmalar zaman ve optimallik açısından ayrı ayrı küçük, orta ve büyük ölçekli problemlerde LINGO yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve oluşturulan sezgisel yaklaşımların matematiksel modelden daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Bunun yanı sıra tavlama benzetimi kullanılarak elde edilen çözümler hibrit genetik algoritma çözümlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bakım kısıtlarını esnek atölye tipi çizelgelemede dikkate alan Li ve Pan (2012) ise çalışmalarında ayrık kimyasal reaksiyon optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada amaç fonksiyonunda makespan değeri, makinelerin toplam iş yükünü ve maksimum makine iş yükü eş zamanlı olarak minimize edilmeye çalışılmıştır. Önerilen algorithmada, tek moleküllü reaksiyon olan duvarda etkisiz çarpışma ve ayrışma ile çok moleküllü reaksiyon olan moleküller arası etkisiz çarpışma ve sentez olarak dört adet geliştirilmiş temel reaksiyon dikkate alınmıştır. Bakım zamanları önceden belirli önleyici bakım olarak ele alınmıştır ve her bir bakım faaliyeti ayrı bir operasyon olarak düşünülmüştür. Bakımın çizelgelenmesinde, bakımlar öncelikle kendi zaman aralığında en sona atılır, ardından operasyonlar ise bakım işleri düşünülmeyen makinelerle atanır, daha sonra ise eğer bir operasyon bakımla

çakışıyorsa bakım sola kaydırılarak çizelgelenecek operasyon bakımdan sonraya yerleştirilir. Yakınsama kabiliyetini geliştirmek için algoritma tabu arama algoritması ile sentezlenmiştir. Komşuluk yapısında birkaç komşuluk yapısı önerilmiştir. Ayrıca literatürde bilinen karşılaştırma problemleri ile önerilen algoritmanın test edilmesi sonucunda bazı sonuçlar optimale yakın değerler verirken bazılarında ise optimal çözümler elde edilmiştir.

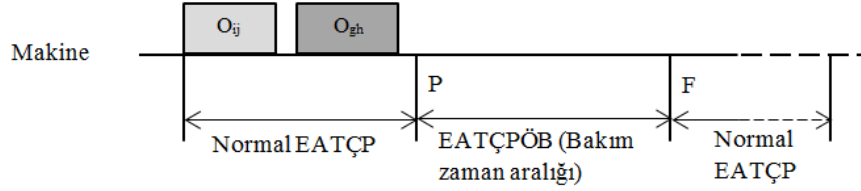
Gerçek üretim sistemlerinde önleyici bakım durumlarının dikkate alındığı çalışmalardan Thörnblad ve ark. (2012), yaptığı çalışmada İsveç’ te Havacılık ve uzay şirketi olan Volvo Aero Corporation’ da çok amaçlı makinelerin yer aldığı çoklu hücrelerde, sınırlı sayıda demirbaşların (10 adet kaynak) yer aldığı bir üretim sisteminde önleyici bakım planlanmasının dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemin zamana bağlı formülasyonunu oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmada gecikme ve C_{max} değerlerinin ağırlıklı toplamaları minimize edilmeye çalışılmıştır. Operasyonların bakım aktiviteleri veya başka herhangi bir operasyon tarafından kesilmesine izin verilmemiştir. Bakım aktiviteleri belirli zaman aralığında yapılmaktadır. Oluşturdukları matematiksel modeli kullanarak şirkete ait 2012 de 3 aylık tutulan gerçek verilerle optimale yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Demir ve İşleyen (2014) literatürde yer alan bir çalışma olan Gao ve ark.’ nın 2006 yılında yaptıkları çalışmada önerilen matematiksel modelin eksik durumlarını düzelteren kısıtlar ekleyerek yeni bir model önermişlerdir. Yapılan çalışmada 2006 yılında yapılan çalışmada önerilen modelin uygun ve optimum çözüm veremeyeceğinden bahsedilmiştir. İşlerin atanacağı makineler ayrı ayrı zamanlarda önleyici bakıma tabi tutulmuştur. Oluşturulan kısıtlarda ayırıcı değişkenlerin kullanılmadığını, bir işin ilk operasyonunun ve makinelerdeki ilk bakımların belirlenen zamanın dışında atanabileceği ifade edilmiş ve uygun çözümü sağlayan kısıtlar modele dahil edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak yine aynı çalışmada belirtilen fonksiyon dikkate alınmış makespan değeri, maksimum makine iş yükü ve makinelerin toplam iş yükü minimize edilmeye çalışılmıştır. Model GAMS programında kodlanmış ve literatürde yer alan karşılaştırma problemleri

kullanılarak test edilmiş ve optimal sonucu veren çizelgelerin önerdikleri kısıtlarla belirlenen zaman aralığında yer aldığını göstermişlerdir.

Sezgisel çözüm yöntemlerinin yer aldığı çalışmalardan biri olan Karthikeyan ve ark. (2014)'nın yaptıkları çalışmada yeni hibrit farklı bir ateşböceği algoritması geliştirilmiştir. C_{max} , maksimum makine iş yükü ve toplam makine iş yükü ağırlıklı toplamaları bir olacak şekilde eş zamanlı olarak minimize edilmeye çalışılmıştır. Makine bakımları belirlenmiş zaman aralıklarında sabit olmayan bakımlar olarak ele alınmıştır. Operasyonların makinelere atanması ve operasyonların sıralanması, çekicilik, uzaklık ve hareket fonksiyonlarının uygun olarak dönüştürülmesi ile belirlenmiştir. Başlangıç çözümlerinin belirli yüzdesinde makine atama için minimum proses zamanı kuralı ile global iş yükü denge kuralı, sıralama için ise öncelik kurallarından en uzun kalan süre kuralı ile arta kalan iş sayısının maksimum olduğu kural dikkate alınmıştır. Başlangıç popülasyonunun geri kalan yüzdesi ise çeşitliliği sağlamak amacıyla rastgele oluşturulmuştur. Ayrıca arama kabiliyetini geliştirmek için yerel arama prosedürü geliştirilmiştir. Literatürdeki karşılaştırma problemlerinde önerilen algoritma test edilmiş bazılarında literatürde yer alan çalışmalardaki gibi optimum değer elde edilirken bazılarında ise baskın olmayan çözümler elde edilmiştir. Diğer bir çalışma olan Li ve ark.'nın (2014) çalışmasında ise yine bakımın yer aldığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için yeni farklı arı kolonisi algoritması geliştirilmiştir. Genelde sürekli optimizasyon problemleri için kullanılan bu yöntemde kesikli olan çok amaçlı ve bakım aktivitelerinin yer aldığı bu problemin çözümü için bazı modifikasyonlar yapmışlardır. Amaç fonksiyonunda çoğu çalışmada dikkate alınan makespan değeri, maksimum makine iş yükü ve toplam makine iş yükü minimize edilmeye çalışılmıştır. İşçi arılar, izleyici arılar ve kaşif arılar için komşu yiyecek kaynakları yaratmak amacıyla tabu arama algoritmasına başvurulmuştur. Bakım işleri belirli sürelerde ve belli zaman aralığında çizelgelenmiştir ancak sabit değildir. Çizelge oluştururken bakımı atamada dinamik olarak sunulan yeni bir sezgisel metot geliştirilmiştir. İş yükü kuralları veya değiştirme, ekleme ve tersine hareket durumlarına başvurarak iki tip

komşuluk yapısı kullanmışlardır. Ele alınan problem için geliştirilen algoritmanın literatürde yer alan algoritmalara göre yüksek derecede etkili olduğu vurgulanmıştır. Zamanın yanı sıra maliyetin de minimize edildiği durumlar da yapılan çalışmalar da yer almaktadır. Bu amaçla Song ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, esnek atölye tipi üretim ortamında makine bozulmalarından kaynaklanan enerji tüketim maliyetlerini ve bakımlardan kaynaklanan maliyetleri azaltan bir çizelgeleme yapılmıştır. Bakım işleri çizelgelenirken Li ve ark. 'nın (2014) te önerdikleri sezgisel atama yöntemini kullanmışlardır. Problemin çözümünde C_{max} değeri, toplam üretim enerji maliyeti ve bakımların toplam enerji maliyetleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada sunulan optimizasyon modelinin çözümü için çok amaçlı evrimsel algoritmalarından bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma çözüm yöntemi kullanılmıştır. Genetik algoritmada tek noktalı ve çok noktalı çaprazlama ile ekleme ve değiştirme mutasyon yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım test edilmiş ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Bakımın ele alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde şartlı bakım türü de literatürde çalışılmıştır. Buna örnek olarak incelenen Zheng ve ark. (2014)'nın yaptığı çalışmada ekipmanlar gerçek zamanlı (on-line) olarak izlenerek, arızalar gerçekleşmeden önce gizli olarak saptanan bir olumsuzluk tespit edildiği durumda bakım dikkate alınmıştır. Çalışmada çizelgeleme algoritması olarak Ekleme algoritması kullanılmıştır. Bu bakım politikasına göre işlerin yapılması esnasında eş zamanlı olarak önleyici bakım yapılması yerine durum izleme teknikleri yardımıyla yaklaşan başarısızlığa dair bir bulgu tanımlandıktan sonra önleyici bakım çizelgeye dahil edilmiştir. Makinelerin P-F eğrilerine bakılarak Şekil 2.1.' de gösterilen çizelgeleme yapısı kullanılır. Gizli herhangi olumsuz bir durum (P) saptanana kadar normal çizelgeleme kuralları uygulanmıştır. Bu zaman aralığında bakım işlemleri gerçekleştirilmez. P noktasına ulaşıldığında bakım işleri çizelgeye eklenir.



Şekil 2.1. Durum bazlı bakımla esnek atölye tipi çizelgeleme (Zheng ve ark., 2014)

Bakım işleri özel bir iş gibi düşünülmüş ve bakım sonrası makinelerin iyi çalışır durumda olduğu varsayılmıştır. Problemin çözümünde en iyi çözümü elde etmek için üç sezgisel algoritmaya başvurulmuştur: Genetik algoritma (GA), karınca kolonisi optimizasyon algoritması (ACO) ve yapay arı kolonisi algoritması (ABC). İncelenen problemde makespan değeri minimize edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca literatürdeki karşılaştırma problemlerinde önerilen algoritma test edilmiş küçük ölçekli problemlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bakım zamanlarının belirli bir zaman aralığında sabit olmadığı durumu ele alan diğer bir çalışma ise Ziaee (2014) yaptığı çalışmadır. Yapılan çalışmada kısa zamanda problem çözümü için hızlı işleyen bir prosedürün yer aldığı bir sezgisel yöntem önermiştir. Amaç fonksiyonunda ağırlıklı toplamaları bir olacak şekilde makespan değerini, makinelerin toplam iş yükünü ve makinelerin maksimum iş yükünü minimize etmeye çalışmıştır. İşin yarıda kesilmediği, hazırlık ve taşıma zamanlarının ihmal edildiği varsayımları altında incelenen problemde algoritmanın performansını değerlendirmek için literatürdeki karşılaştırma problemleri ile algoritmayı test etmiştir. Önerdiği sezgisel yöntemde çözüm kalitesi ve hesaplama zamanı açısından verimli sonuçlar elde etmiştir.

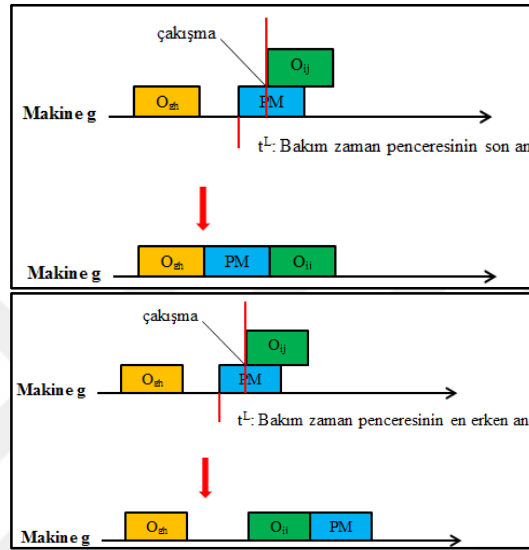
Çok amaçlı ve makinelere birden fazla bakım uygulandığı durumları içeren esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele alan Abbasian ve ark. (2015)'nın yaptıkları çalışmada matematiksel model oluşturulmuştur. Karmaşık tamsayı matematiksel modelde amaç fonksiyonunda son işin tamamlanma zamanı (C_{max}), ortalama akış zamanı (F) ve ortalama gecikme (T) belirli ağırlıklarla çarpılarak

minimize edilmeye çalışılmıştır. Problem yapısında iş istasyonları, iş istasyonlarında yer alan makineler, rastgele zamanlarda gelen parçalar, her bir parçanın tamamlanması için belirlenmiş operasyonlar, önceden belirlenmiş zaman aralığında makine bakımları dikkate alınmıştır. Her bir parçanın istasyonlar arası taşıma sırası farklı olarak belirlenmiştir. Problem üç alt probleme bölünerek çözülmüştür: rotalama, atama ve her bir bakım aktivitesinin çizelgelenmesi. Rotalama ve sıralama alt problemleri dinamik iki boyutlu genetik algoritma yardımıyla, bakım alt problemi ise yenilikçi bir algoritma ile çözülmüştür. Bakım alt problemi için geliştirilen yenilikçi algoritmada her makine için birden fazla bakım aktivitesi yapılabileceği durumlar incelenmiştir. Algoritma ise şu adımlardan oluşturulmuştur:

1. Bütün bakım işleri her makinede kendi zaman aralığının son anına eklenerek çizelgelenir.
2. Bütün işlerin bütün operasyonları önceliklerine göre sıralanır.
3. Eğer bakımdan önce operasyon yapma olasılığı var ve makine uygunsa bakımdan önce operasyon atanır aksi taktirde bakım işi sola doğru en yakın başlama zamanına doğru kaydırılır. (Şekil 2.3.)
4. Eğer bakımdan sonra operasyon yapma olasılığı var ve makine uygunsa bakımdan sonra operasyon atanır.
5. Bütün işlerin bütün operasyonları atanana kadar çizelgelemeye devam edilir.

Yerel optimuma takılmama ve erken yakınsamayı önlemek için algoritmanın uygulanması ve optimizasyon prosesi boyunca kontrol parametreleri dinamik olarak değiştirilmiştir. Genetik algoritmada kromozom genişliğinde ilk dizi istasyon, ikinci dizi makine, üçüncü dizi ise operasyon önceliği olarak belirtilmiştir. Önerilen kromozom yapısından dolayı yenilikçi bir mutasyon operatörü kullanılmıştır. Bu operatör iki adet mutasyon oranı kullanmaktadır: atama alt problemi için mutasyon oranı ve sıralama problemi için mutasyon oranı. Bunun yanı sıra mutasyon oranı

azaltılarak veya çaprazlama oranı artırılarak iyi çözüme yakınsama olasılığı artırılmaya çalışılmıştır. Literatürdeki örnek problem veri setleriyle değerlendirilen önerilen metotla geliştirici sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.2. Bakım işinin atamasının yapılışı (Abbasian ve ark., 2015)

Mokhtari ve Dadgar (2015) ise yaptıkları çalışmada üretim etkinliğini geliştirmek ve sistem verimliliğini maksimize etmek için bakım durumunun yanı sıra makine arıza oranlarının zamanla değiştiği esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Çalışmada yer alan problemde proses zamanları ve teslim tarihleri stokastik parametreler olarak belirlenmiştir. Geciken işlerin ve minimum toplam kullanılabilirliğin amaç olarak ele alındığı problem yapısı için karma tam sayılı lineer model geliştirmişlerdir. Problemin çözümünde ise tavlama benzetimine dayalı simülasyon iyileştiricisi ve Monte Carlo simülatörü sunmuşlardır. Operasyonlar makine bakımları tamamlanana kadar makinelerde proses edilememektedir. Çalışmalarında makine bozulma oranlarının farklı çevresel durumlarda farklı oranlara sahip olduğunu vurgulamışlardır. Problemin çözümünde komşuluk belirleme adımlarında atama ve sıralama için süpürme ve tersine komşuluk tekniği

kullanılırken bakım politikaları için tamsayı ve tersine komşuluk tekniği kullanılmıştır. Önerilen algoritma küçük, orta ve büyük ölçekli problemlerde bilgisayar zamanı, geciken işler, maksimum tamamlanma zamanı açısından değerlendirilmiştir.

Makine bozulmalarını ele alan başka bir çalışmada Ye ve Ma' nın (2015) yaptığı çalışmada zamanının yanı sıra maliyet de amaç fonksiyonunda dikkate alınmıştır. Ele alınan problem tüm operasyonların tamamlanma zamanı ve bakım maliyetlerinin birleştirilmiş optimizasyon problemidir. Problemden makine bozulma oranları Weibull dağılımından elde edilmiştir. Yapılan çalışmada amaç fonksiyonunda üretim ve bakım departmanlarının amaçlarını dengelemek esas alınmıştır. Üretim ve bakım departmanlarının planlanan çizelge ve gerçekleşen çizelge arasındaki sapmalar da fonksiyona dahil edilmiştir. Problemin çözümü için çift koldu genetik algoritma kullanılmıştır. Algoritmada her bir kromozom iki kısım halinde ifade edilmiştir. İlk kısımda yollama, ikinci kısımda ise makine çizelgeleme gösterilmiştir. Sıralama kısmında kullanılan dizi iki parçadan oluşmaktadır. İlk parça operasyon sırasını gösteren kısım, ikinci parça ise operasyonların atandığı makinelerin gösterildiği kısımdır. Makine çizelgeleme kısmında makine bakımları belirtilmiştir ve 0-1 tam sayılı olarak ifade edilmiştir. “0” o makinede bakımın olduğunu, “1” ise makinede bakımın yer almadığını göstermektedir. Yollama parçasında ise operasyonlar ve atanabileceği makineler tamsayı kodlama ile ifade edilmiştir. Genetik algoritmada seçim aşamasında seçilme olasılığı uygunluk değerine göre belirlenmiş, çaprazlama aşamasında ise rastgele çaprazlama noktası seçilerek kromozomlar arasında çaprazlama yapılmıştır. Mutasyonda aşamasında ise rastgele iki pozisyon seçilerek yer değiştirme işlemi yapılmıştır. Ele alınan problemde oluşturulan bütünleşik optimizasyon modeli bağımsız karar verme ile karşılaştırılmıştır. Yapılan simülasyon deneyleri ile de modelin geçerliliği ve uygulanabilirliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hem hedef değer, hem makespan değeri hem de birim zaman başına birim maliyet açısından bütünleşik karar verme yöntemi bağımsız karar verme yöntemine göre daha iyi sonuçlar

vermiştir. Daha düşük tamamlanma zamanı, daha düşük birim başına bakım maliyeti elde edilmiştir. Bunun yanı sıra hem bütünleşik karar verme modeli için ve hem de bağımsız karar verme modeli için amaç fonksiyonunda makespan değeri ve birim başına bakım maliyeti katsayıları değiştirilerek katsayı değişiminin etkisi incelenmiştir.

Khoukhi ve ark.'nın (2017) yılında yaptıkları çalışmada ise yine esnek atölye tipi üretim sistemlerinde makine bozulmalarının ve önleyici bakımın dikkate alındığı problem için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada makespan değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Problemden başlangıcı sonu ve süresi önceden belirlenmiş zaman periyotlarında önleyici bakımlar yer almıştır. Ele alınan problem tipi kısmi esnek problem tipidir. Problemin çözümü için yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Bakım politikası olarak bakım ve üretimin eş zamanlı olarak planlanmasını ele almışlardır. Oluşturulan matematiksel modelin yanı sıra çift seviyeli birleştirici/ayırıcı grafik önermişlerdir. Problemin çözümü için dinamik durumlarda yollama kuralları ve yerel aramanın birlikte yer aldığı hibrit bir karınca kolonisi algoritması önerilmiştir. Çözümlerin iyileştirilmesi, arama uzayını genişletmek ve yerel minimuma takılmamak için üç adet mutasyon operatörü kullanılmıştır. Çalışmada önerilen dual karıncalar iki seviyeli birleştirici/ayırıcı grafikler için tasarlanmıştır. Dual karıncalarda iki yönlü hareket bulunmaktadır. Birincisi operasyonların atanması için geçiş kuralına göre seçmek, diğeri ise makine seçildikten sonra geçiş kuralına göre makinedeki operasyon sıralamasına karar vermek. Önerilen yöntem hem atölye tipi üretim problemleri hem de esnek atölye tipi üretim problemleri üzerinde bakımın yer aldığı ve bakımın olmadığı karşılaştırma problemlerinde makespan değerini minimize etmek amacıyla test edilmiştir. Çalışmada makinelerin toplam iş yükü, bakımdan önce maksimum üretimi garantilemek ve bakımdan sonra yönetilen makine sayısı gibi performans ölçütleri dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem oldukça etkili sonuçlar ortaya koymuştur.

Son yıllarda yapılan çalışmalardan bakım için stokastik durumları dikkate alan Rahmati ve ark. 'nın (2018) yaptıkları çalışmada, duruma dayalı bakım esas alınmıştır. Düzeltici bakım ve önleyici bakım durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilme zamanları ve bakım süreleri stokastik olarak belirlenmiştir. İnceledikleri problem için sistemin bozulma durumları incelenerek uyum arama optimizasyon algoritmasına dayalı çalışan simülasyon optimizasyon yaklaşımını kullanmışlardır. Önerdikleri yaklaşımı farklı test problemleri üzerinde denemişler ve önerilen yöntemin incelenen problem için pratik olduğunu belirtmişlerdir.

Yine son yıllarda bakım kısıtlarını ele alan başka bir çalışma ise Tessaro ve ark. (2018)'ni yaptıkları çalışmada, makinelerin kullanılabilirliğini dikkate alan esnek atölye tipi üretim sistemleri için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve ayrık ateş böceği algoritması sunmuşlardır. Amaç fonksiyonu olarak tüm işlerin tamamlanma zamanını dikkate almışlardır. Önerdikleri algoritmayı literatürdeki farklı algoritmalarla karşılaştırarak önerdikleri yaklaşımın problem için uygun bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 2.1. Makine bakımlarının dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri

Yapılan Çalışma	Problemin Amacı	Bakım	Kullanılan Algoritma ve Yaklaşım
Zrubi ve Borne (2005)	C_{max} minimize etmek	Önleyici bakım, bakım zamanları önceden biliniyor ve belirli zaman aralığında	Makinelere atamada, Sezgisel Yöntem (farklı öncelik kuralları ve yerel arama prosedürü) Operasyonların sıralanması için, Hibrit Genetik Algoritma
Gao ve ark. (2006)	C_{max} , maksimum makine iş yükünü ve toplam makine iş yükünü minimize etmek	Belirli zaman aralıklarında yapılabilen belirli zamanlara sahip önleyici bakım	Genetik algoritma Yerel arama prosedürü
Lin ve Zhen (2009)	Gecikmeyi azaltmak ve makine boş zamanını minimize etmek	Her üretim aşamasında bakım, stoklar, rotalama farklı ele alınmış	Karışık tam sayılı matematiksel model Genetik algoritma
Jing ve Tomohiro (2010)	C_{max} minimize etmek	Bulanık proses zamanlı, bulanık teslim tarihli ve belirli bir bakım periyodu Proses zamanları üçgensel üyelik fonksiyonunu, teslim tarihlerinde yamuk üyelik fonksiyonu	An kolonisi algoritması Tabu arama algoritması
Rajkumar ve ark. (2010)	C_{max} değeri, makinelerin toplam iş yükü ve maksimum makine iş yükünü minimize etmek	Bakım zamanları önceden belirlenmiş zaman aralığında	Açgözü (greedy) rastsal uyarlamalı arama algoritması
Wang ve Yu (2010)	C_{max} değeri, makinelerin toplam iş yükü ve maksimum makine iş yükünü minimize etmek	Planlanan periyot boyunca önleyici bakım, Bakım kaynak kısıtı olarak iki durum: yeterli sayıda uygun bakım kaynağının mevcut olduğu durum ve sadece bir bakım kaynağının uygun olması durumu	Süzülmüş ışın taraması yöntemi
Moradi ve ark. (2011)	Makespan değeri, Sistemin kullanım dışı kalma durumu minimize	Bakım sayıları ve bakım zamanı aralıkları değişken	Bastınlamayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA) ve sıralamasız genetik algoritma (NRGA) yöntemleri ile birlikte öncelik kurallarının eklenmesi ile elde edilen toplam dört genetik algoritma yöntemi
Dalfard ve Mohammadi (2012)	C_{max} değeri, ortalama gecikme ve ortalama akış süresi değerlerinin ağırlıklı toplamlarını minimize etmek	Bakım zamanları önceden belirlenmiş zaman aralığında	Matematiksel model Genetik algoritma Tavlama benzetimi
Li ve Pan (2012)	C_{max} değeri, makinelerin toplam iş yükü ve maksimum makine iş yükünü minimize etmek	Bakım zamanları önceden belirlenmiş zaman aralığında	Kimyasal reaksiyon optimizasyon algoritması Tabu arama algoritması

Çizelge 2.1. (devam)

Yapılan Çalışma	Problem Amacı	Bakım	Kullanılan Algoritma ve Yaklaşım
Thornblad ve ark. (2012)	Gecikme ve C_{max} değerlerinin ağırlıklı toplamalarını minimize etmek	Önleyici bakım	Zamana bağlı formülasyon
Demir ve İşleyen (2014)	C_{max} minimize etmek	Belirli zaman aralıklarında yapılabilen belirli zamanlara sahip önleyici bakım	Gao ve ark.'nin 2006 yılında yaptıkları çalışmada önerilen modelin eksik durumlarını düzelterek kısıtlar ekleyerek yeni bir matematiksel model
Karthikeyan ve ark. (2014)	C_{max} , maksimum makine iş yükü ve toplam makine iş yükü eş zamanlı olarak minimize etmek	Bakım aktivitelerinden dolayı sabit olmayan kullanılabilirlik kısıtları	Ateşböceği algoritması Yerel arama algoritması
Li ve ark. (2014)	C_{max} , maksimum makine iş yükü ve toplam makine iş yükü eş zamanlı olarak minimize etmek	Belirli zaman aralıklarında yapılabilen belirli zamanlara sahip önleyici bakım	Yeni ayrık an kolonisi algoritması Tabu arama algoritması
Song ve ark. (2014)	C_{max} değeri, toplam üretim enerji maliyetleri minimize etmek	Önleyici bakım	Matematiksel model Genetik algoritma
Zheng ve ark. (2014)	Makinelerin kullanılabilirliğini azaltmak	Durum bazı önleyici bakım (durum izleme teknikleri yardımıyla yaklaşan başarısızlık durumunda bakım yapılır)	Evrimsel algoritmayla elde edilen ön çizelge semasına bakımı eklemek için Ekleme Algoritması Birleştirilmiş Genetik algoritma
Ziaee (2014)	C_{max} , maksimum makine iş yükü ve toplam makine iş yükü eş zamanlı olarak minimize etmek	Daha önceden belirlenmiş zaman aralığında bakım	Hızlı sonuç veren bir algoritma
Abbasian ve ark. (2015)	C_{max} , ortalama akış zamanı ve ortalama gecikme değerlerinin ağırlıklı toplamalarını minimize etmek	Önleyici bakım	Alama ve sıralama için Genetik Algoritma Bakım işlerinin atanması problemi için yenilikçi bir yaklaşım
Mokhtari ve Dadgar (2015)	Geciken işlerin sayısını minimize etmek	Toplam sistem kullanılabilirliğini maksimize edecek bakım planları	Karma tam sayılı lineer model, Tavlama benzetimine dayalı simülasyon optimizasyon Monte Carlo simülasyonu
Ye ve Ma (2015)	C_{max} , birim zaman başına bakım maliyeti	Önleyici bakım	Bütünleşik optimizasyon modeli Çift kodlu genetik algoritma Simülasyon
Khokhi ve ark. (2017)	C_{max} değerini minimize etmek (özellikle kısmi esnek problemler)	Önleyici bakım	Matematiksel model Çift Anı kolonisi algoritması
Rahmatyev ark. (2018)	C_{max} minimize etmek	Duruma dayalı bakım, önleyici bakım Stokastik bakım zamanları ve süreleri	Uyum arama optimizasyon algoritmasına dayalı simülasyon optimizasyon
Tessarove ark. (2018)	C_{max} değerini minimize etmek	Kullanılabilirlik kısıtları	Karma tamsayılı matematiksel model Ayrık ateş böceği algoritması

2.2. Dinamik Yapıların Dikkate Alındığı Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri

Gerçek hayatta üretim sistemlerinin performansını ve çizelgelenmesini etkileyen, rastgele gerçekleşen ve beklenmeyen birçok olayla karşılaşmak mümkündür. Bu beklenmeyen olaylar şöyle sıralanabilir:

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| ✓ Beklenmedik İş Gelişleri | ✓ Teslim Tarihlerindeki Değişiklikler |
| ✓ Makine Bozulmaları | ✓ Sipariş İptalleri |
| ✓ Makine Bakımları | ✓ Hazırlık Zamanlarındaki |
| ✓ Proses Zamanlarındaki | Değişiklikler |
| Değişiklikler | ✓ Acil Siparişler |

Bu olaylarla karşılaşıldığı zaman yeniden çizelgeleme yapılmaktadır. Yeniden çizelgeleme, kesintiler veya değişiklikler meydana geldiğinde var olan bir çizelgede güncelleştirme sürecidir. Günümüzde literatürde yapılan birçok çalışmada dinamiklik ön plana çıkmıştır ve yapılan çalışmalarda farklı yeniden çizelgeleme kuralları kullanılarak bu beklenmedik durumlara çözüm geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Fahmy ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada, gerçek hayatta meydana gelen kesintiler olarak; makine bozulmaları, proses zamanlarının değişmesi, var olan siparişlerin acilliğinin değişimi, yeni iş gelişleri, sipariş iptallerinin olması durumlarını dikkate alarak Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için genel kilitlenmesiz reaktif çizelgeleme yaklaşımı önermişlerdir. Amaç olarak makespan değerini ve revize edilmiş çizelge ile orijinal çizelgedeki operasyonların başlangıç zamanları farklarını minimize etmeye çalışmışlardır. Önerdikleri yaklaşımı literatürdeki Toplam Yeniden Çizelgeleme (TR) ve Değişimden Etkilenen Operasyonların Tekrar Çizelgelenmesi (mAOR) adlı iki metotla karşılaştırmışlardır. Metotların performanslarının karşılaştırılmasında 5 deneysel faktör dikkate alınmıştır: yeniden çizelgeleme metodu, kesintilerin meydana geliş zamanları, kesintilerin büyüklüğü,

orijinal çizelgenin optimallığı ve sistem esnekliği. Faktörlerin ana etkilerini ve etkileşimli etkilerini görmek için ANOVA (Analysis of Variance) analizi yapılmıştır. Faktörlerin her tip kesintiye göre problemde dikkate alınan performans ölçümleri açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Geliştirilen algoritmanın diğer algoritmalara göre oldukça etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Gholami ve Zandieh (2009) ise çalışmalarında, makinelerin sürekli olarak hazır olamaması (bozulma, bakım vb. nedenlerle) veya işlerin kesintiye uğraması durumları gibi gerçek hayatta karşılaşılan durumlar da rastsal olarak modele dâhil edilmiştir. Dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için simülasyon ve genetik algoritma yaklaşımlarını bütünleştirmiştir. Tekrar çizelgeleme için izledikleri politika olay güdümlü politikadır. Yani beklenmedik olay gerçekleştiği zaman tekrar çizelgeleme yapılmıştır. Bunun yanı sıra sağa kaydırma yöntemi ile yeniden çizelgeleme yapmışlardır. İki bozulma arasındaki ortalama zamanın üstel dağılıma uyduğu, tamir zamanlarının dağılımının da üstel dağılıma uyduğu varsayımlarıyla hareket etmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak, makespan değerini ve ortalama gecikme zamanının minimize edilmesini ele almışlardır. Sundukları algoritmalarını çeşitli büyüklükteki problem setleriyle test etmişler ve makinelerin ortalama tamir süresinin ve makinelerin ortalama arızalanma seviyesinin çizelgeleme verimi üzerinde önemli etkiye sahip olduklarını varyans analizi testiyle tespit etmişlerdir. Vinod ve Sridharan (2009) yılında yaptıkları çalışmada işlerin sisteme dinamik olarak geldiği tipi bir dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Yapılan çalışmada akış zamanı ortalaması, akış zamanı standart sapması, gecikme ortalaması, gecikme standart sapması ve geciken işlerin yüzdesi problemin performans ölçütü olarak dikkate alınmıştır. İncelenen problemin çözümü için simülasyon modeli önerilmiş ve hiyerarşik çözüm yaklaşımı kullanılmıştır. Ele alınan problemde üç farklı makinede operasyonlar işlenmekte ve birinci makinede her bir operasyonlar verimli bir şekilde yapılırken diğer iki makinede operasyonları yapılmasının verimi daha düşük olarak ele alınmıştır. Bu durum ilk makinede %10 ikinci makinede ise %20 lik proses zamanı artışı yapılarak modele yansıtılmıştır.

İşlerin gelişler arası süresi üstel dağılıma uygun olarak modele dahil edilmiştir ve gelişlerarası sürenin 21 dakika ve 23 dakika olduğu iki durum için senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modelinde 21 adet sıralama kuralı kullanılmıştır. Her iş için teslim tarihleri Baker (1984) tarafından önerilen toplam iş yükü kavramına göre belirlenmiştir. Simülasyonda makine seçim kuralları şu şekilde belirlenmiştir: en erken bitme zamanına sahip makineyi seçme, en az iş yüküne sahip makineyi seçme ve kuyrukta bekleyen iş sayısı en az olan makineyi seçme. Yapılan simülasyon deneylerinde hem senaryo 1 için hem de senaryo 2 için hem makine atama kuralları hem de sıralama kuralları ayrı ayrı incelenmiş ve istenilen performans ölçütlerine göre sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir. Her iki senaryo için de atama kurallarından en erken bitirme zamanına sahip makineyi seçme kuralı diğer iki atama kuralından daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca 21 sıralama kuralı da her iki senaryo için incelenmiş ve sonuçları grafiklerle ortaya konmuştur.

Makine bozulmalarının ele alındığı Nasım ve Mohammad (2011) çalışmalarında çok amaçlı dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde bakım kısıtlarını dikkate almışlardır. Amaç fonksiyonu olarak, makespan değerini, ortalama akış zamanını ve ortalama gecikmeyi minimize etmeye çalışmışlardır. Deterministik makine uygunluklarını dikkate alarak hem matematiksel bir model hem de dinamik kontrol parametrelerinin olduğu bir genetik algoritma yaklaşımı geliştirmişlerdir. Makine alt problemlerini çözmek için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Önerdikleri algoritmanın diğer yöntemlere göre üstün olduğunu göstermişlerdir. Dinamik faktörlerin dikkate alındığı diğer bir çalışma olan Rajabinasab ve Mansour (2011)'un çalışmalarında farklı bir dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Yaptıkları çalışmada dinamiklik olarak stokastik iş gelişleri, makine bozulmaları gibi dinamik olayları birlikte inceleyen belirsiz proses zamanlarına sahip problem için ajan tabanlı yaklaşım geliştirmişlerdir. Üretimde operasyon ve proses esnekliğinin ele alındığı çalışmada oluşturulan ajan tabanlı yaklaşımda iki tip ajan kullanılmıştır: iş ajanı ve makine ajanı. Ayrıca iş ajanları ile makine ajanları arasında koordinasyonu sağlamak için bir

de yönetici ajan yer almaktadır. Çizelgelemede iş ajanları ve yönetim ajanlarında arı kolonisi optimizasyonu kullanılmıştır. Varsayımlarda bir işin varış zamanı iş gelene kadar bilinmemektedir ve geliştirilen simülasyon modelinde bu zaman ve makine bozulma zamanları üstel dağılımdan belirlenmiştir. Model için proses zamanları ise gama dağılımından elde edilmiştir. Bir makine bozulduğu zaman makine tamir süresi sonuna kadar hiçbir operasyonu yapamamaktadır. Operasyonların kesilmesine izin verilmekte ve operasyon kesildiği zaman geriye kalan proses makine bozulma süresinin sonuna eklenmiştir. Çalışmada performans ölçütü olarak ortalama akış zamanı, maksimum akış zamanı, akış zamanının varyansı, ortalama gecikme, maksimum gecikme, gecikmenin varyansı ve geciken işlerin yüzdesi ele alınmıştır. Çalışmanın amacı verilen performans ölçütlerine göre en iyi proses planını, her bir operasyon için en iyi makinenin seçilmesini ve her bir makinede en iyi operasyon sırasının belirlenmesini sağlamaktır. Önerilen ajan tabanlı yaklaşım beş farklı yollama kuralları ile simülasyon yaklaşımı kullanılarak karşılaştırılmış ve önerilen ajan tabanlı yaklaşım yollama kurallarına göre daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Yollama kuralları olarak makineye ilk gelen iş ilk işlem görür (FIFO), proses zamanı en kısa olan ilk işlem görür (SPT), atölyeye ilk gelen ilk işlem görür (AT), proses zamanı ve arta kalan iş sayısının toplamı az olan ilk işlem görür kuralı (P+WinQ), proses zamanı-arta kalan iş sayısı-bolluk zamanının toplamı az olan ilk işlem görür (P+WinQ+SL) kuralı ele alınmıştır. Hem dinamik hem de stokastik durumları ele alan başka bir çalışmada dinamik ve stokastik bir üretim ortamında olurlu en iyi parça rotalarının üretilmesini sağlayan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Dosdoğru (2012)'nin yaptığı bu çalışmada her bir parça için en iyi parça proses planı ve sonra belirlenen parça proses planına göre her bir parçanın her bir operasyonu için uygun makinenin seçilmesini sağlayan simülasyon ve optimizasyon aşamasından oluşan bir metodoloji geliştirmiştir. Optimizasyon aşamasında genetik algoritma geliştirmiştir ve daha sonra simülasyon aşamasına entegre edilmiştir. Çalışmada proses zamanları üstel dağılımdan stokastik olarak belirlenmiştir. Genetik algorithmada çaprazlama kuralı olarak makine seçimi için düzgün çaprazlama kuralı,

operasyon sıralaması için POX (öncelik sırasını koruyarak çaprazlama) çaprazlamasını kullanmıştır. Başlangıç popülasyonlarını belirlemek için dört farklı strateji kullanmıştır: global seçim (Zhang ve ark.'nın 2011 yılında geliştirdikleri strateji; toplam proses zamanı minimum olan makineyi seç), yerel seçim (proses zamanı minimum olan makineyi seç), minimum iş yüküne sahip makineyi seçme, rastgele makine seçimi. Önerilen metodolojiyle tüm parçalar için toplam ortalama akış değerini minimize etmeye çalışmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre esneklik seviyesi arttığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Rastgele iş gelişlerinin ve makine bozulmalarının yer aldığı problemi ele alan Zhang ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada problemin çözüm için etkili bir memetik algoritma önermişlerdir. İlk olarak erteleme noktaları yaratmak ve problem şartlarını güncelleştirmek için periyodik bir algoritma sunmuşlar, ikinci olarak her bir erteleme noktasında problemi optimize etmek için yeni bir yerel arama prosedürü ile etkili bir memetik algoritma geliştirmişlerdir. Memetik algoritmada seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanmışlardır. Algoritmada dizi yapısı iki kısımdan oluşmuştur: makine atama dizisi ve operasyon sıralama dizisi. Başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuştur. Başlangıç popülasyonunda rastgele seçim metodu ile çaprazlama operatörü kullanılarak yeni yavrular oluşturulmuştur. Mutasyon operatörü ile de çeşitliliğin artırılması sağlanmıştır. Her bir yavruya yerel arama prosedürü uygulanarak çözüm kalitesi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Algoritmada sonlanma kriteri sağlanana kadar seçim turnuva metodu kullanılarak seçim yapılmış, iki nokta çaprazlama yöntemini makine dizisi için öncelik operasyon çaprazlamayı da operasyon dizisi için kullanarak mutasyon aşaması gerçekleştirilmiştir. Yerel arama prosedüründe makine dizisinde ve operasyon dizisinde farklı noktalarda gen değişimi yapılarak beş adet komşuluk yöntemi ile kaliteli çözümler elde etmeye çalışmışlardır. Amaç olarak makespan değerini ve ortalama gecikmeyi minimize etmeye çalışmışlardır. Yeniden çizelgeleme yaparken operasyonların tamamıyla çizelgelenmesi metodunu kullanmışlardır ve periyodik olarak yeniden çizelgeleme yapmışlardır. Oluşturdukları algoritmayı çeşitli

deneylerle değerlendirmişler ve etkili sonuçlar almışlardır. Ayrıca yeni iş gelişleri ile yeniden çizelgeleme sıklığı arttıkça makespan değerinin arttığını incelemişler, aynı şekilde çizelgeleme sıklığının artmasıyla keskin bir şekilde artan ortalama gecikme dolayısıyla üretim sisteminde sinirliliğe sebep olunabileceğini vurgulamışlardır. Dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde sezgisel yöntemleri yanı sıra simülasyon yaklaşımları da kullanılmaktadır. Geyik ve Dosdoğru (2013) çalışmalarında dinamik problemlerin çözümünde simülasyon aracılığıyla optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Üretimde her bir parça için en iyi proses planına karar vermek ve daha sonra bu plana göre en uygun makine seçimine karar vermek için bir genetik algoritma yaklaşımı uyarlamışlardır. Genetik algoritma çözüm metodolojisinin optimizasyon aşamasını çözerken, performans tahmini için proses planları ve makine operasyon eşleştirmeleri kesikli olay sistem simülasyon içine beslenmiştir. Öncelik kuralı olarak ilk gelen iş ilk yapılır kuralı olan FIFO (First In First Out) kuralı kullanılmıştır. Parça gelişleri üstel dağılım ve operasyonların proses zamanları üçgen dağılım olarak belirlenmiştir. Simülasyon aşamasında ısınma periyodu simülasyon zamanının %20 si olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma aşamasında kromozom yapısı iki kısımdan oluşturulmuştur. İlk ortalama politikası için oluşturulan proses planlarının yer aldığı kısım, diğeri ise makine-operasyon eşleşmesinin gösterildiği kısımdır. Genetik algoritmanın seçim aşamasında erken yakınsamadan kaçmak için daha yaygın olarak kullanılan turnuva seçim yöntemi kullanılmıştır. Çaprazlama operatöründe kromozomun iki kısmı için de ayrı ayrı çaprazlama kuralı uygulanmıştır. Simülasyon aşaması için ARENA programında kodlama yapılmış ve OptQuest aracı kullanılmıştır. Karar değişkenleri girdi, amaç fonksiyonu ise çıktı yerine kullanılmıştır. Çalışmanın karar değişkenleri proses planları ve makine operasyon eşleşmeleri iken amaç fonksiyonu ise ortalama akış zamanlarının toplamı olarak belirlenmiştir. Çalışmada tüm parçaların ortalama akış zamanlarının toplamı minimize edilmeye çalışılmıştır. Akış zamanı olarak hazırlık zamanlarının, taşıma zamanlarının, kuyrukta bekleme zamanının ve proses zamanının toplamı dikkate alınmıştır. Hem kısmi esnek hem de tam esnek durumlar

için simülasyon deneyleri yapılmış ve oldukça etkili sonuçlar elde edilmiştir. Makine bozulmalarının ele alındığı başka bir dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi Pan ve ark. (2013a) tarafından çalışılmıştır. Yapılan çalışmada, üstel dağılıma bağlı olarak meydana gelen makine bozulmaları durumunda problemin çözümü için uyarlanabilir genetik algoritmaya dayalı simülasyon modeli önermişlerdir. Başlangıç çizelgesi oluşturma yönteminde öngörme fonksiyonu, hata yönetimi algoritması ve dinamik simülasyon çözümü kullanılarak oluşturulmuştur. Problemin çözümünde dikkate alınan amaçlar makespan değerini, toplam makine iş yüklerini, toplam maliyetleri minimize etmektir. Makineler bakım periyodu boyunca çalışmamaktadır ve makinelerin ortalama bakım süresi ve bakımlar arası süresi üstel dağılıma uymaktadır. Önerilen dinamik simülasyon çözüm yönteminde maliyetler, işçi saatleri, bakım periyotları, siparişlerin, malzemelerin ve personelin bilgileri kullanılmaktadır. Simülasyon çözümü, dinamik olarak meydana gelen sipariş değişmesi veya makine bozulması durumlarında hızlı bir şekilde cevap verecek şekilde fonksiyonu yinelemektedir. Simülasyon modelinde kullanılan genetik algoritma çözümü çözüm parametrelerinin dinamik olarak yenileyebilme kabiliyetine sahiptir. Problemin örnek bir veri seti üzerinde test edilmesiyle gerçek optimal sonuçlar elde edilmiştir. Yazarların yaptığı başka bir çalışmada ise (2013b) dinamik olarak makine bozulma meydana geldiğinde farklı çizelgeleme stratejileri kullanılarak optimizasyon yapılmaya çalışılmıştır. Olay güdümlü olarak makine bozulması gerçekleştiği anda yeniden tamamıyla çizelgeleme veya çizelge tamiri yapılmıştır. Dinamik çizelgeleme metodu olarak robust kestirimci çizelgeleme yöntemi dikkate alınmıştır. Küçük ölçekli problemlerde yeniden çizelgeleme metodu gerektiğinde sağa kaydırmalı strateji ile birlikte kullanılırken büyük ölçekli problemlerde çizelgeyi yenileme düzeltme metodu ile yüksek verimlilik ve kararlılık sağlanmaya çalışılmıştır. Örnek veri seti üzerinde her iki metodun etkisi incelenmiştir.

Yine aynı yıl makine bozulmalarını dikkate alan diğer bir dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemini inceleyen Wang ve ark. (2013)'nın yaptıkları

çalışmada, makine kesintilerinin dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için özel kromozom kodlaması ile yeni bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Operasyonların atanmasında Giffler ve Thompson algoritması kullanılmıştır. Operasyonların atanmasında makine seçimi kuralları, operasyonların atanmasında ise farklı öncelik kuralları uygulanmıştır. Yeniden çizelgelemede makine bozulmasından etkilenen operasyonlar bozulmanın sonuna eklemişler ve etkilenen operasyonlar tümüyle yeniden çizelgelenmiştir. Amaç olarak kayıp zamanı azaltarak makespan değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Geliştirdikleri algoritmayı literatürdeki, sağa kaydırmalı yeniden çizelgeleme (kesintiler giderilene kadar etkilenen operasyonların geciktirilmesi) ve ön çizelgeleme (planlanmış kesintileri dikkate alarak ayrı ayrı senaryolarla çizelgeleme) olmak üzere iki kıyaslama algoritmasıyla karşılaştırmışlardır. Ayrıca literatürde yer alan karşılaştırma problemleri ile oluşturdukları algoritmayı değerlendirmişlerdir. Örnek problemlerde bozulma senaryoları stokastik olarak oluşturulmuştur. Diğer iki algoritmaya göre oldukça etkili sonuçlar elde etmişlerdir.

Rey ve ark. (2014)'nın yaptıkları çalışmada esnek atölye tipi üretimin yer aldığı tam zamanında üretim sistemlerinde dinamik durumlarda çizelge kontrolü için yaklaşım önermişlerdir. Çözümün değerlendirilmesi için fabrika simülasyonuna odaklanılmıştır. Sistemin sürekli değişkeninin kontrolünü sağlamak amacıyla problemde kontrol algoritması sunmuşlardır. Dağıtık geliş zamanının kontrol edildiği algorithmada performans ölçümü için işleri erken tamamlanma ve işlerin gecikme cezaları arasındaki kuadratik ilişkiyi temsil eden teslim tarihlerindeki meydana gelen ortalama karesel sapma dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra çoğu çalışmada ihmal edilen sistemdeki işlerin maksimum sayısı, sınırlı kuyruk kapasitesi, işin yeniden dolaşımı ve taşıma zamanları da problemin çözümünde dikkate alınan diğer unsurlardır. Çalışmada iki yaklaşım kullanılmıştır. İlk olarak önce genetik algoritma daha sonra dağıtık geliş zamanı kontrol algoritması sırayla kullanılarak, ikinci olarak da dağıtık geliş zamanı kontrol algoritması genetik algorithmayla birlikte eş zamanlı kullanılarak bütünleşik yaklaşım önermişlerdir.

Algoritmanın performansı gerçek bir montaj hücresinin esnek atölye tipi üretim kısmında uygulanarak incelenmiştir. Önerilen algoritmalar öncelikle statik çevrede simüle edilerek, daha sonra iş sayısının artışı ve rastgele zamanda gerçekleşen makine bozulması gibi dinamik çevrede simüle edilerek sistemin davranışı incelenmiş ve algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Önerilen algoritmada teslim tarihlerindeki sapmalar kontrol edilerek geliş zamanları durağan duruma gelinceye kadar ayarlanmaktadır. Bu ayarlama yapılırken eğer kuyruk kapasitesi yeterliyse kuyruk oluşmamakta ve teslim tarihi sifıra yakınsamaktadır. Ancak eğer kapasite yeterli değilse kontrolör erken bitme veya gecikmeyi cezalandırarak geliş zamanlarını durağan duruma getirmeye çalışmaktadır. Hem hiyerarşik genetik geliş zamanı kontrol algoritması hem de bütünleşik genetik geliş zamanı kontrol algoritması, hem statik hem de dinamik çevrede değerlendirilmiştir. Bütünleşik hibrit yaklaşımda dinamik durumlarda oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca hem kısıtlı hem de kısıtsız ortalama kareler sapması problemleri için statik senaryolarda iş sayısının artımında bütünleşik yaklaşımın hiyerarşik yaklaşımdan daha iyi olduğu saptanmıştır. Makine rotalamada bütünleşik yaklaşım, genetik algoritma, kuadratik lineer programlama ve dağıtık geliş zamanı kontrol algoritmalarına göre daha iyi performans sunmuştur.

Esnek atölye tipi üretim sistemlerinde yeni iş gelişlerini dikkate alan Gao ve ark. (2015)'nın yaptıkları çalışmada yeni iş gelişleri durumunda yeniden çizelge oluşturma problemini ele almışlardır. Amaç fonksiyonu olarak makespan değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Ele alınan problem için iki aşamalı yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. İlk aşamada, operasyonlar başlangıç anından itibaren çizelgelenmiş, ikinci aşamada ise yeni iş gelişinden sonra çizelge yeniden oluşturulmuştur. İş gelişlerinden sonra yeniden çizelgeleme aşamasında üç farklı strateji kullanılmıştır. İlk olarak yeni gelen işler başlangıç aşamasında oluşturulan çizelgenin en sonuna eklenmiş, ikinci olarak yeni gelen işin operasyonları ile başlangıç çizelgesinde yeni iş geliş anına kadar çizelgelenmeyen operasyonlar birlikte çizelgeye dahil edilmiş, üçüncü olarak ise yeni gelen işler başlangıç

çizelgesindeki makinelerin boş zaman aralıkları dikkate alınarak aralıklara yerleşecek şekilde çizelgelenmiştir. Problemin çözümü için önerilen yapay arı kolonisi algoritmasında iki adet çözüm vektörü kullanılmıştır: makine atama vektörü ile operasyon sıralama vektörü. Başlangıç çözümlerin oluşturulması aşamasında operasyonların makineye atanmasında rastgele kuralı ile global minimum proses zamanı kuralı dikkate alınırken, operasyonların sıralanmasında rastgele kuralı, arta kalan operasyon sayısı kuralı ve en çok arta kalan iş sayısı kuralı kullanılmıştır. Bunun yanı sıra hiyerarşik yaklaşım uygulanırken farklı bir strateji izlenerek ilk önce operasyon sıralaması gerçekleştirilip daha sonra operasyon sırasına göre makine atama yapılması stratejisi incelenmiştir. Problemin çözümünde çözüm kalitesini iyileştirmek için grup yerel arama algoritması önerilmiştir. İki aşamalı yapay arı kolonisi algoritmasının performansı ve önerilen stratejiler literatürde yer alana karşılaştırmalı problemlerle test edilmiştir. Farklı problem büyüklükleri, farklı zamanlarda iş gelişleri ve ele alınan üç farklı yeniden çizelgeleme stratejisi ile test edilen algoritma literatürde yer alana beş farklı diğer algoritmayla karşılaştırıldığında daha iyi sonuç vermiştir. Büyük ölçekli problemlerde önerilen algoritmayla oldukça iyi sonuçlar elde edilmiş ve önerilen algoritmanın çok iyi yakınsama kabiliyetine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Dinamikliğin yanı sıra bulanıklığın çalışıldığı Liu ve ark. (2015)'nin yaptıkları çalışmada, bulanık zamanlı dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için bir hızlı dağılım tahmini algoritması geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak C_{max} (makespan) değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Proses zamanlarının üyelik fonksiyonu üçgensel bulanık sayılar olarak belirlenmiştir. Önerdikleri modelde yeni bir iş gelişi durumunda ilk yapılan çizelgedeki biten işler ihmal edilip o anda yapılan operasyonlar ve geriye kalan operasyonlar ile yeni gelen işin operasyonları yeniden çizelgelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dağılım tahmini algoritmasında standardize edilmiş makine atama ve sıralama vektörleri ile optimuma daha hızlı yakınsandığını saptamışlar ve dağılım tahmini algoritmasında, algoritmanın duyarlı olduğu parametrelerin çözümde ne kadar önemli olduğunu tam

esnek karşılaştırmalı problemlerle göstermişlerdir. Sharma ve Jain (2015) ise diğer çalışmalardan farklı olarak, işlerin dinamik olarak sisteme geldiği, sıra bağımlı hazırlık zamanlarının dikkate alındığı ve operasyon sürelerinin stokastik olarak belirlendiği esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Performans kriterleri olarak ortalama akış zamanını, maksimum akış zamanını, ortalama gecikmeyi, maksimum gecikmeyi ve geciken işlerin sayısını dikkate almışlardır.

Modelde;

- ✓ İlk gelen iş ilk önce yapılır (FCFS),
- ✓ İşlem süresi en kısa olan iş önce yapılır (SPT),
- ✓ Teslim tarihi en önce olan iş ilk önce yapılır (EDD),
- ✓ En kısa hazırlık zamanına sahip iş önce yapılır (SIMSET),
- ✓ Kalan işlem süresi en uzun olan iş önce yapılır (MWRK) ve
- ✓ Arta kalan operasyon sayısı fazla olan iş önce yapılır (MOPN) sıralama

kurallarını kullanırken, rotalamada 5 adet farklı esneklik seviyelerini incelemişlerdir. Çalışmada gelişlerarası süre üstel dağılım, proses süreleri düzgün dağılım olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, sıra bağımlı hazırlık süreleri de çalışmaya dahil edilmiştir. İki farklı çalışmanın yürütüldüğü bu çalışmada ilk olarak her bir simülasyon deneyi için performans ölçütleri grafiksel olarak analiz edilmiş ikinci olarak stokastik problem için hem sıralama kurallarının hem de rotalamada esneklik seviyelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda farklı rotalama seviyelerinin öncelik kurallarına göre sistem performansında daha etkili olduğu saptanmıştır. Dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde yapılan diğer bir çalışma ise Shen ve Yao (2015)' nun yaptığı çalışmadır. Çalışmalarında, dinamik olarak iş gelişlerinin ve rastgele makine bozulmalarının yer aldığı problem için çok amaçlı evrimsel algoritma ve yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Yeni iş gelişleri ve makine bozulmaları gibi dinamik durumlardan dolayı gerçekleştirilen

yeniden çizelgeleme anlarında verimlilik ve kararlılığı üç amaçla eş zamanlı olarak iyileştirilmeye çalışmışlardır. Yeniden çizelgeleme durumlarında C_{max} değeri, gecikme, maksimum makine iş yükü ve eski ve yeni çizelgedeki sapmaları belirten kararlılık, amaç fonksiyonunda dikkate alınmıştır. Dinamik olayların meydana gelişi ile yeniden çizelgeleme stratejisi olarak kestirimci reaktif çizelgeleme stratejisi uygulanmıştır. İncelenen dinamik çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için evrimsel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma başlangıç popülasyonu oluşturulurken sezgisel algoritmalarla birleştirilmiştir. Önerilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için gerçek bir atölye tipi üretim sistemi simüle edilmiştir. Yapılan değerlendirmede sistem, kararlılığın dikkate alınması, sezgisel başlama stratejilerinin kullanılması ve karar verme yaklaşımlarının etkisinin incelenmesi amacıyla ve NSGA-II, SPEA2 ve önerilen algoritmanın dinamik atölye tipi çevresinde karşılaştırmasını yapmak amacıyla simüle edilmiştir. Operasyonların sıralanmasında özelleştirilmiş bir çaprazlama operatörü, mutasyon aşamasında ise süpürme ve ekleme operatörleri kullanılmıştır. Ayrıca karar vericilerin önceliklerini belirlemek için bir karar verme prosedürü tasarlanmışlardır. Önerilen algoritmanın diğer iki yönteme göre daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Dinamikliğin ele aldığı bir diğer çalışma Alotaibi ve ark.(2016)'nın yaptıkları çalışmada hem makine bozulmaları hem de dinamik iş gelişleri ele alınmıştır. Ele alınan problemin çözümü için çoklu ajan tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada makineyi ifade eden kaynak ajanı ve ürünü ifade eden ürün ajanı olarak iki tip ajan yer almaktadır. Makine bozulmaları ve ürün gelişleri rastgele olarak meydana gelmektedir. Dinamik durumlarda dört farklı karar kuralı farklı kombinasyonlarla denenerek farklılıkların etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. İncelenen karar kuralları; ilk giren ilk çıkar, en az süreye sahip olanı seçme, en uzun süreye sahip olanı seçme, en az enerji gerektireni seçme. Önerilen yaklaşımda dikkate alınan amaçlar; ürün gecikmelerini minimize etmek, toplam enerji tüketimini minimize etmek, makespan değerini minimize etmek ve kararlılığı dikkate almaktır.

Sabit sistem ile dinamik durumların yer aldığı sistem karşılaştırılmış ve gecikmenin sadece makine bozulması meydana geldiğinde arttığı bunun yanı sıra da sadece iş gelişi durumunda azaldığı tespit edilmiştir. Makine bozulması ve iş gelişi gibi dinamik durumlarda karar verme kuralları karşılaştırıldığında her iki ajan için en kısa süreli olanı seçme kuralı (SPT) istenilen amaçları sağlamada en iyi sonuçları vermiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda makine bozulması durumunda sabit sisteme göre kayda değer derecede enerji tüketiminin azaldığı belirtilmiştir.

Yine dinamik iş gelişinin ve makine bozulmasını yer aldığı başka bir çalışma olan Ning ve ark. (2016)'nın yaptığı çalışmada, belirlenmiş bir zamanda yeni iş gelişleri ve yine belirli bir zamanda makine bozulmasının dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için bir hibrit çok aşamalı kuantum parçacık sürüşü algoritması önerilmiştir. Yeniden çizelgeleme yapılırken periyodik çizelgeleme stratejisi uygulanmıştır. Önerilen algoritmada problem hem makine ataması hem de operasyon sıralaması alt problemlerine bölünmüş ve alt problemleri simüle edebilmek için çift dizi kodlama yöntemi önerilmiştir. Yeninden çizelgelemede dikkate alınan amaç fonksiyonunda kararlılık, gecikme ve makespan değeri için ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntemi değerlendirmek için literatürde yer alan örnek veri setleri kullanılmıştır. Öncelikle belirli bir zamanda meydana gelen iş eklenmesi durumu için iki adet yeni iş gelişi, amaç fonksiyonunda makespan değerinin yanı sıra kararlılık da dikkate alınarak çözüm yöntemi test edilmiştir. Daha sonra makine bozulması meydana geldiğinde orijinal çizelgede yer alan makine bozulmadan önceki proses edilmemiş operasyonlar ile bozulmadan dolayı etkilenen operasyonlar yeniden çizelgelenmiştir. Bunun yanı sıra, kayan pencere stratejisi yeni iş gelişinin yer aldığı dinamik durumda farklı periyotlar için incelenmiştir. Periyodun çok kısa tutulması, çok sık yeniden çizelgeleme yapılacağından çizelgenin kararlılığını etkilemekte, periyodun çok uzun tutulması ise makine kullanımının azalmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda periyodun çok kısa tutulmasının kararlılığı ciddi şekilde etkilediği belirtilmiştir. Önerilen algoritma zaman maliyeti ve makespan değeri arasındaki iyileşme oranı

açısından dört farklı algoritmayla karşılaştırılmış ve algoritmanın diğer algoritmalara göre çok daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Yeni iş gelişi ve makine bozulmasının yanı sıra iş iptalini de dikkate alan Li ve ark. (2017)'nin yaptığı çalışmada, dinamik durumların meydana geldiği zamanlarda yeniden çizelgeleme yapmak için üç farklı strateji kullanmışlardır. Yeni iş ekleme durumunda yeni gelen işin operasyonlarının en sona eklendiği yeniden birleştirme stratejisi, yeni gelen işi operasyonları ile daha önceki orijinal çizelgede yer alan henüz proses edilmemiş işlerin operasyonların birlikte yeniden çizelgelendiği kesişim çizelgeleme ve yeni gelen işin operasyonlarının orijinal çizelgede uygun olan boşluklara orijinal çizelgede değişiklik yaparak/yapılmadan eklendiği ekleme çizelgeleme stratejileri kullanılmıştır. Tüm işlerin aynı önceliğe sahip olduğu durumda kesişim çizelgeleme, orijinal çizelgede yer alan işlerin öncelikli olduğu durumda ise ekleme çizelgeleme stratejisinin daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Makine bozulması ve iş iptali durumunda ise kesişim çizelgeleme stratejisi kullanılmıştır. Ele alınan problemlerin çözüm aşamasında tabu arama algoritmasının yer aldığı bir hibrit arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Çözüm aşamasında popülasyonun başlatılmasında küme gruplama rulet yaklaşımı ile seçim yapılmıştır. Çaprazlama yapılırken sıralı çaprazlama yöntemi, mutasyon aşamasında ise süpürme, ekleme ve ters çevirme yöntemleri kullanılmıştır. Literatürde yer alan test verileri ile test edilerek Tabu arama algoritmasının güçlü yerel arama kabiliyetini kullanan yöntemle optimale yakın sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntem literatürde yer alan beş farklı algoritma ve klasik arı kolonisi algoritması ile karşılaştırılmıştır. Hibrit algoritma yaklaşık optimal çözüm kalitesi ve yakınsama performansı açısından klasik arı kolonisi algoritmasından daha iyi sonuç vermiştir. Makespan değeri, geçerlilik, uygulanabilirlik ölçütleri dikkate alındığında diğer beş algoritmadan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak çözüm uzayından daha iyi faydalanma ve daha iyi güvenilirliğe sahip olmasından dolayı hibrit arı kolonisi algoritmasının esnek atölye tipi çizelgelemede dinamik durumlarda daha yüksek performansa sahip olduğu saptanmıştır.

Çizelgeleme problemlerinde son zamanlarda dikkate alınan önemli bir performans ölçütü çizelgenin robust (amaç değerleri belirsizliklere karşı duyarlı, dirençli, dayanıklı) olmasıdır. Amaç fonksiyonunda makespan değerini ve robustlığı dikkate alan Fattahi ve Fallahi (2010) yaptıkları çalışmada, dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Yeniden çizelgeleme durumlarında dört adet strateji kullanmışlardır. İlk strateji, yeni iş gelişi ve bir makinenin eklendiği durumda yeni gelen işlerin başlangıç noktalarının eski çizelgedeki makespan değerine eşitlemedir. İkinci strateji, yeni gelen işlerin çizelgelemede her makinenin bitiş zamanlarından sonraya eklenmesidir. Üçüncü strateji, çizelgelenmeyen işlerin yeni iş geldiği durumda yeni işlerin operasyonları ile birlikte çizelgelenmesi ve dördüncü strateji, robustluğun sağlayacak şekilde yeni gelen işlerle birlikte çizelgelenmeyen işlerin çizelgelenmesidir. Robust bir çizelge oluştururken yeni oluşan çizelgedeki ve eski çizelgedeki operasyonların başlangıç zamanları farkını dikkate almışlardır. Ayrıca büyük ölçekli problemlerde etkili bir çizelge oluşturmak için yerel arama genetik algoritması geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın performansını küçük (15 operasyondan az), orta (15 ile 20 operasyon arası) ve büyük ölçekli (20 operasyondan çok) problemlerle test etmişlerdir. Önerdikleri algoritmanın küçük ölçekli problemlerde optimal sonuçlar verdiğini orta ölçekli problemlerde ise optimale yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Matematiksel modelin çözümünde Lingo yazılımını, önerilen sezgisel algoritmanın çözümü için ise FORTRAN programlama dilini araç olarak kullanmışlardır.

Kararlılığı dikkate alan diğer bir çalışma olan Xiong ve ark. (2013)'nın yaptığı çalışmada da dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için robust çizelge oluşturulmaya çalışılmıştır. Rastgele makine bozulmalarının dikkate alındığı bu çalışmada geliştirdikleri yöntemde makespan değerini minimize ederken eş zamanlı olarak kararlılığı arttırmaya çalışmışlardır. Makine bozulmalarında iki tip belirsizlik ele alınmıştır: İlki makine bozulmalarının olasılığı, ikincisi ise makine bozulmalarının ve toplam bolluk zamanlarının yeridir. Problemin çözümü için kararlılığı dikkate alarak iki farklı yaklaşım önermişlerdir. İlk olarak farklı

senaryolar kullanarak, ikinci olarak ise kararlılık yerine geçebilecek ölçütler kullanarak makine bozulmalarından sonra kararlılık değişimini değerlendirmişlerdir. Problemin çözümünde büyük ölçekli problemler için algoritma olarak çok amaçlı evrimsel algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmada bilgiye dayalı sezgisel arama mimarisi önerilmiştir. Mimaride sezgisel arama modülü ve bilgi modülü olarak iki modül kullanmışlardır. Sezgisel arama modülü arama uzayını araştırırken bilgi modülü sezgisel algoritma için gereken bilgiyi sağlamak için kullanılmıştır. Evrimsel algoritma için kromozom yapısı iki bölümden oluşturulmuştur: makine atama ve operasyon sıralama yapıları. Başlangıç popülasyonunda makine atama için Kacem ve ark.(2002)'nin atama kuralı ile Pezella ve ark. (2008)'nin önerdiği iki atama kuralı kullanılmıştır. Başlangıç popülasyonu için operasyon sıralamada ise öncelik kuralları dikkate alınmıştır. Makine bozulmalarından sonra çizelgelemede sağa kaydırma metodu uygulanmıştır. Kararlılık ölçümünde önerdikleri her bir operasyonun bolluk sürelerinin ağırlıklı toplamı ve bolluk süresi ve bozulma periyodu arasındaki çakışmanın derecesi ile literatürde yer alan hem kısmi hem de tam esnek örnek problemlerde oldukça etkili sonuçlar elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre küçük ölçekli problemlerde ilk ölçüt daha iyi sonuç verirken, büyük problemlerde ikinci ölçüt daha iyi sonuç vermiştir.

Dayanıklılığın dikkate alındığı bir diğer çalışma Zhang ve ark.(2016)'nın yaptıkları çalışmada esnek atölye tipi üretim sistemlerinde esnek çalışma saatleri dikkate alınmıştır. Çalışmada performans ölçütü olarak işlerin gecikmesi, fazla mesai ve dayanıklılık kullanılmıştır. Ele alınan problemin çözümü için hedef güdümlü çok amaçlı tabu arama algoritması ve bu algoritmayla bastırılmayan sıralı genetik algoritmanın birleşiminden oluşan hibrit bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmada kodlama yapısı olarak makine seçimi ve fazla mesai kararı sunulmuştur. Ayrıca Önerilen algoritma gerçek hayatta bir havacılık üretim tesisinde denenmiştir. Üretim tesisi, havacılık ile ilgili ürünlerin üretimi için alüminyum alaşım parçaları üretmektedir. Yapılan örnek olay çalışmasında Pareto analizi kullanılarak gecikme

ile fazla mesainin çatıştığı, aynı zamanda gecikme ve dayanıklılığın çatıştığı ve fazla mesai ile dayanıklılığın birbirini desteklediği Pareto analizi ile ortaya konmuştur. Önerilen yaklaşımın etkinliği literatürde yer alan karşılaştırma problemleri üzerinde test edilmiş ve üç yöntem karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre küçük ölçekli problemlerde hedef güdümlü tabu arama algoritması bastırılmayan sıralı genetik algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verirken, büyük ölçekli problemler için bastırılmayan sıralı genetik algoritma daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Ayrıca önerilen hibrit algoritma küçük ölçekli problemlerde hedef güdümlü tabu arama algoritmasından daha iyi sonuç verirken, tüm test edilen örneklerde bastırılmayan sıralı genetik algoritmadan daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yine dayanıklılığın performans ölçütü olarak dikkate alındığı bir diğer çalışma Shen ve ark. (2017)'nin yaptığı çalışmada ise, stokastik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemden operasyonların proses zamanları stokastik olarak belirlenmiştir ve zamanların üstel dağılımdan geldiği varsayılmıştır. Çalışmanın performans ölçütü olarak makespan değeri, maksimum makine iş yükü minimize edilmeye çalışılırken çizelgenin dayanıklılık ölçütü de amaçlar arasında dikkate alınmıştır. Çizelgede belirsizliklere karşı etkiyi minimize eden dayanıklılığın sağlanması için iki yeni senaryoya dayalı dayanıklılık ölçütü dikkate alınmıştır. Çalışmada yer alan üç amaç için Pareto önceliği kullanılarak farklı amaçlar arasında denge ölçülmeye çalışılmıştır. Çalışmanın temel amacı çizelge dayanıklılığını dikkate alarak stokastik esnek atölye tipi çizelgeleme problemini çözmektir. Çalışmada beklenen değer ve veri değişkenliklerinin dikkate alındığı kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılarak hesaplanan dayanıklılık ölçütünün yanı sıra, düzensizlikten sonraki değerler ile başlangıç değerleri arasındaki çizelgeleme verimliliğini düşüren sapmayı kullanan ikinci dayanıklılık ölçütü kullanılmıştır. Problemin çözümünde, yeni bireyleri aramada yeni bir operatör ve çeşitliliğin sağlanmasında yeni bir strateji tasarlayarak bir değiştirilmiş çok amaçlı evrimsel algoritması önerilmiştir. Değiştirilmiş evrimsel algoritmada global bilgiyi kullanan güncelleme yöntemi önerilmiştir. Çeşitliliğin sağlanması için özel genetik

operatörler kullanılmıştır. Önerilen algoritma gerçek dünya esnek atölye üretim verileri ile test edilmiştir. Bunun yanı sıra var olan senaryolara dayalı dayanıklılık ölçütleri ile önerilen iki yeni dayanıklılık ölçütü karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda önerilen değiştirilmiş evrimsel algoritma belirsiz çevrede üç farklı evrimsel algoritma ile karşılaştırılmıştır. Ele alınan üç farklı performans ölçütü aralarındaki dengeler açısından analiz edilmiş ve parametre ayarlarının duyarlılık analizi yapılmıştır. Var olan dayanıklılık ölçütleri ile karşılaştırıldığında önerilen iki yeni dayanıklılık ölçütünün yakınsama performansı ve amaç değerinde daha düşük varyansı elde etme performansı açısından daha etkili olduğu ve önerilen değiştirilmiş çok amaçlı evrimsel algoritmanın literatürdeki diğer evrimsel algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Son yıllarda yapılan başka bir çalışma olan Yang ve Gao (2018)'nın yaptıkları çalışmada yeni iş gelişlerinin yer aldığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için paralel hibrit optimizasyon algoritması önermişlerdir. Amaç fonksiyonunda proses maliyeti, tüm operasyonların tamamlanma zamanını ve çizelgelemede meydana gelen sapmaları dikkate almışlardır. Önerdikleri algoritmanın literatürde yer alan çok amaçlı tavlama benzetimi algoritması (AMOS) ve baskın olmayan sıralı genetik algortima (NSGA-II) yöntemlerinden daha iyi sonuç verdiklerini belirtmişlerdir.

Aynı yılda yapılan başka bir çalışma olan Öztürk ve ark. (2018)' in yaptıkları çalışmada, yeni iş gelişlerinin dikkate alındığı esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde tüm işlerin tamamlanma zamanı, ortalama gecikme, ortalama akış zamanını minimize etmeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı öncelik kuralları ve hibrit olarak kullandıkları öncelik kuralları için dinamik çizelgeleme yapılmıştır. Ele alınan problemin çözümü için simülasyon ve gen ifadeli programlama yöntemlerini kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemleri literatürde yer alan kısmi esnek karşılaştırma problemlerinde test etmişler ve inceledikleri kurallardan bazılarının literatürden daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Çizelge 2.2. Dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri

Yapılan Çalışma	Problem Amacı	Dinamiklik	Kullanılan Algoritma ve Yaklaşım
Fahmy ve ark. (2009)	C_{max} ve çizelgede başlangıç zamanları sapmasını minimize etmek	Makine bozulmaları, değişen proses zamanları, acil iş gelişleri, sipariş iptalleri	Genel kilitlemesiz reaktif çizelgeleme yaklaşımı
Gholami ve Zandieh (2009)	Ortalama C_{max} değeri ve ortalama gecikme zamanını minimize etmek	Rastasal bozulma ve rastasal bakım	Tekrar çizelgeleme için olay güdümlü politika Sağa kaydırma yöntemi ile yeniden çizelgeleme Simülasyon entegre edilmiş genetik algoritma yaklaşımı
Vinod ve Sridharan (2009)	Ortalama akış zamanı, akış zamanının standart sapması, ortalama gecikme, gecikmenin standart sapması, geciken işlerin yüzdesi	İşlerin dinamik sisteme gelişleri Yeni çizelgeleme kuralları	Simülasyon
Fattahi ve Fallahi (2010)	C_{max} değerini minimize etmek ve çizelgede başlangıç zamanları sapmasını minimize etmek	Makine sayısı artışı Yeni iş gelişleri Operasyon süresi değişimi	Çok amaçlı matematiksel model (küçük ölçekli problemler) Yerel arama genetik algoritması (orta ve büyük ölçekli problemler)
Nasim ve Mohammad (2011)	C_{max} değerini, ortalama akış zamanını ve ortalama gecikmeyi minimize etmek	Sabit olmayan belirli makine kullanılabilirliği	Matematiksel bir model Dinamik kontrol parametrelerinin olduğu bir genetik algoritma Makine alt problemlerini çözmek için sezgisel bir algoritma
Rajabinasab ve Mansour (2011)	Ortalama akış, maksimum akış zamanı, akış zamanının varyansı, ortalama gecikme, maksimum gecikme, gecikmenin varyansı, geciken işlerin yüzdesini minimize etmek	Stokastik iş gelişleri, belirsiz proses zamanları ve rastgele makine bozulmaları	Ajan tabanlı yaklaşım
Dosdoğru (2012)	Toplam ortalama akış değerini minimize etmek	Proses zamanları stokastik	Başlangıç popülasyonları için dört farklı strateji: Global seçim, yerel seçim, minimum iş yüküne sahip makineyi seçme, rastgele makine seçimi. Genetik algoritma, simülasyon
Zhang ve ark. (2012)	C_{max} değerini ve ortalama gecikmeyi minimize etmek	Rastgele iş gelişleri ve makine bozulmaları	Memetik algoritma
Geyik ve Dosdoğru (2013)	Ortalama Akış Zamanları Toplamını minimize etmek	Rastgele iş gelişleri ve rastgele proses zamanları	Yerel arama prosedürü Genetik algoritma Simülasyon Optimizasyon
Pan ve ark. (2013) -a	C_{max} değerini, toplam makine iş yükünü, toplam maliyeti minimize etmek	Makine bozulmaları	Uyarlanabilir Genetik Algoritmaya dayalı dinamik Simülasyon modeli
Pan ve ark. (2013) -b	C_{max} değerini minimize etmek	Makine bozulmaları	Kestirimci reaktif çizelgeleme Olay güdümlü strateji Yoğunlaşmış etki alanında yeniden çizelgeleme Çizelgeleme düzeltme güncelleme

Çizelge 2.2. (devam)

Yapılan Çalışma	Problem Amacı	Dinamiklik	Kullanılan Algoritma ve Yaklaşım
Wang ve ark. (2013)	C_{max} değerini minimize etmek	Makine bozulmaları	Yeni bir genetik algoritma
Xiong ve ark. (2013)	C_{max} değerini minimize etmek ve makine bozulmaları ile birlikte her bir operasyonun bolluk sürelerinin dikkate alındığı kararlilik ölçütleri minimize etmek	Rastgele makine bozulmaları	Senaryoya dayalı simülasyon Çok amaçlı evrimsel algoritma
Rey ve ark. (2014)	Teslim tarihlerindeki ortalama karesel sapmayı minimize etmek	Hiyerarşik yaklaşım Bütünleşik yaklaşım Makine Bozulması (tek makine) Yeni iş gelişleri	Dağıtık Geliş Zamanı Kontrolü Genetik algoritma Quadratik programlama Simülasyon
Gao ve ark. (2015)	C_{max} değerini minimize etmek	Yeni iş gelişleri	İki aşamalı yapay an kolonisi algoritması Yerel arama algoritması Uç farklı yeniden çizelgeleme stratejisi
Liu ve ark. (2015)	C_{max} değerini minimize etmek	Rastgele iş gelişleri, Bulanık operasyon süreleri	Hızlı dağılım tahmini algoritması
Sharma ve Jain (2015)	Akış zamanı, maksimum akış zamanı, ortalama gecikme, maksimum gecikme ve geçen işlerin sayısını minimize etmek	İşlerin dinamik geliş, belirsiz sıra bağımlı hazırlık zamanları ve belirsiz operasyon süreleri	Simülasyon yaklaşımı
Shen ve Yao (2015)	C_{max} değeri, gecikmeyi, maksimum makine iş yükünü ve eski ve yeni çizelgedeki sapmaları minimize etmek	Yeni iş gelişleri ve makine bozulmaları	Evrimsel algoritma Matematiksel model
Alotaibi ve ark. (2016)	C_{max} değeri, gecikmeyi ve enerji tüketimini minimize etmek Dayanıklılık	Yeni iş gelişleri Rastgele makine bozulmaları	Çoklu Ajan tabanlı yaklaşım
Ning ve ark. (2016)	C_{max} değerini, gecikmeyi ve başlangıç çizelgesi ile yeni oluşan çizelgedeki başlama zamanları arasındaki sapmayı minimize etmek	Yeni iş gelişleri ve makine durmaları	Hibrit çok aşamalı kuantum parçacık sürüşü optimizasyonu Dinamik simülasyon Kayan pencere metodu
Zhang ve ark. (2016)	Gecikme, fazla mesai ve dayanıklılık	Esnek çalışma günleri	Hedef güdümlü çok amaçlı tabu arama Hedef güdümlü çok amaçlı hibrit algoritma (Hedef güdümlü çok amaçlı tabu arama ve bastırılmayan sıralı genetik algoritmayla birleştirilmiş) Pareto Analizi
Li ve ark. (2017)	C_{max} değerini minimize etmek	Yeni iş gelişleri, makine bozulmaları, iş iptalleri	Uç farklı yeniden çizelgeleme stratejisi, Hibrit yapay an kolonisi algoritması Tabu aramaya dayalı arama stratejisi
Shen ve ark. (2017)	C_{max} değeri, maksimum makine iş yükü ve dayanıklılık (robustness)	Stokastik proses zamanları	Çok amaçlı matematiksel model Çok amaçlı evrimsel algoritma
Öztürk ve ark. (2018)	C_{max} değeri, ortalama gecikmeyi ve ortalama akış zamanı minimize etmek	Yeni iş gelişleri	Simülasyon, gen ifadeli programlama Öncelik kuralları
Yang ve Gao (2018)	C_{max} değeri, maliyet ve çizelge sapma zamanları	Yeni iş gelişleri	Paralel hibrit optimizasyon algoritması

2.3. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Esnek atölye tipindeki üretim sistemlerinde makine ve iş sayısı arttıkça veya dinamik olaylarla karşılaşıldıkça işlerin çizelgelenmesi oldukça zor ve karmaşık hale gelmektedir. Bu yüzden dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde optimal çözümleri bulmak zor olduğundan genellikle literatürde çözüme yönelik matematiksel, sezgisel veya hibrit modelleme yaklaşımları oluşturulmaktadır.

Bu çalışma kapsamında literatürde yer alan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için çalışma alanları incelenmiş ve önceki çalışmalar derlenmiştir. Bu amaçla hem makine bakımlarının hem de dinamik olayların dikkate alındığı birçok çalışma incelenmiştir.

Yapılan incelemelere göre ele alınan problem türleri, problemlerin karakteristiklerine, problemlerin çözüm yaklaşımlarına ve amaçlarına göre farklılık göstermektedir.

Literatürde makine bakımlarının dikkate alındığı çalışmalar incelendiğinde, makineler belirli zamanlarda bakıma gönderilebilmekte veya bakım zamanlarının veya sayılarının değişken olduğu çalışmalar yer almaktadır.

Bunun yanı sıra çalışmalarda aşağıda ele alınan alternatif problem tipleri incelenmiştir:

- ✓ Tekrar işlemlerin dikkate alındığı problemler
- ✓ İş kesintilerinin dikkate alındığı problemler
- ✓ Makineler arası taşıma sürelerinin dikkate alındığı problemler
- ✓ Makineler arası taşıma uzaklıklarının dikkate alındığı problemler
- ✓ Çözüm yöntemi olarak farklı hibrit yaklaşımların dikkate alındığı problemler
- ✓ Literatürde incelenmeyen birden fazla amacın bir arada dikkate alındığı problemler
- ✓ Dayanıklılık ve kararlılığın dinamik durumlarda dikkate alındığı problemler

- ✓ Operasyonların sıralanmasında aşağıdaki yöntemlerin dikkate alındığı problemler
 - Sıralama Kuralları
 - Sezgiseller Yöntemler
 - Yapay Zeka Teknikleri
 - Ajan Tabanlı Yaklaşımlar

Sonuç olarak esnek atölye tipi çizelgeleme ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ancak esnek atölye tipi üretim sistemlerinde toplu bakımın yer aldığı, dinamik iş gelişlerinin olduğu, dayanıklılık ölçütünün amaç fonksiyonunda yer aldığı entegre problemlere literatürde yer verilmemiştir. Bu amaçla, bu çalışmada tüm bu özellikleri dikkate alan problem tipi için matematiksel model geliştirilmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada ele alınan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi (DEATÇP) 'nde tam esnek atölye tipi üretim sistemlerinde işlerin operasyonlarının makinelerle atanması ve operasyonların atandıkları makinelerde sıralanması problemi eş zamanlı olarak ele alınmaktadır. Bütünleşik yaklaşımın esas alındığı bu problemde performans ölçütü olarak tüm operasyonların tamamlanma zamanı olan makespan (C_{max}) değeri ve yeni iş gelişleri nedeniyle üretimde istikrarın sağlanması amacıyla çizelgelemede dayanıklılığı ifade eden operasyonların başlangıç zamanlarındaki sapma (dayanıklılık ölçütü-robust) dikkate alınmıştır.

Çalışmada bu amaçlar için geliştirilen matematiksel modellerin test edilmesi için deneysel tasarım yapılmıştır. Ele alınan 45 problem senaryosuna ait Robust yöntemin, Gecikmesiz çizelge yönteminin ve Sona ekleme yönteminin değerlendirilmesi amacıyla 45 problem senaryosu için literatürde yer alan esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerindeki veri setleri problem türlerine göre düzenlenerek kullanılmıştır. Bu veri setleri literatürde yer alan Xia ve Wu'nun 2005 yılında yaptıkları çalışmadan, Pezella ve ark.'nın 2008 yılında yaptıkları çalışmadan ve Kacem ve ark.'nın 2002 yılında yaptıkları çalışmalardan temin edilmiştir.

3.1.1. Çalışmada Kullanılan Veriler

Yapılan çalışmada önerilen matematiksel modellerin test edilmesi için literatürde yer alan 3 adet veri seti, 45 farklı problem senaryolarında problemlerin yapılarına özgü düzenlenerek kullanılmıştır.

Veri setlerinde yer alan çizelgelerde (Çizelge 3.1., Çizelge 3.2, Çizelge 3.3., Çizelge 3.4., Çizelge 3.5.) ilk sütunda işler, ikinci sütunda işlerin operasyonları ve diğer kalan sütunlarda da her bir operasyonun tüm makinelerdeki süreleri belirtilmiştir. Örnek olarak tam esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri ele alınmıştır.

İlk kullanılan veri seti olan ve Xia ve Wu' nun 2005 yılındaki çalışmasından alınan 3 iş, 4 makine ve 7 adet operasyondan oluşan veri seti Çizelge 3.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. 3 İş-4 Makine-7 Operasyon' a ait veri seti (Xia ve Wu, 2005)

İşler	Op	Makineler			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
1. İş	O ₁₁	2	3	4	1
	O ₁₂	3	1	8	2
2. İş	O ₂₁	1	4	1	2
	O ₂₂	5	3	2	9
	O ₂₃	3	1	1	4
3. İş	O ₃₁	7	6	3	5
	O ₃₂	4	5	6	2

Çizelge 3.1.'e göre her biri sırasıyla 2-3-2 operasyondan oluşan 3 adet iş, 4 adet makinede yapılmaktadır.

Diğer bir veri seti ise Pezella ve ark.'nın 2008 yılında yaptıkları çalışmada yer alan 3 iş, 4 makine ve 8 operasyona ait verilerden oluşmaktadır. Çizelge 3.2.'de yer alan işler sırasıyla 3-3-2 olmak üzere toplam 8 operasyondan oluşmaktadır.

Çizelge 3.2. 3 İş-4 Makine-8 Operasyon' a ait veri seti (Pezella ve ark., 2008)

İşler	Op	Makineler			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
1. İş	O ₁₁	7	6	4	5
	O ₁₂	4	8	5	6
	O ₁₃	9	5	4	7
2. İş	O ₂₁	2	5	1	3
	O ₂₂	4	6	8	4
	O ₂₃	9	7	2	2
3. İş	O ₃₁	8	6	3	5
	O ₃₂	3	5	8	3

Son olarak 4 iş, 5 makine ve her bir işin sırasıyla 3-3-4-2 operasyondan oluştuğu veri seti ise Kacem ve ark.'nın 2002b çalışmasından alınmıştır. Çizelge 3.3'te bu veri setine ait veriler yer almaktadır.

Çizelge 3.3. 4 İş-5 Makine-12 Operasyon' a ait veri seti (Kacem ve ark.,2002b)

İşler	Op	Makineler				
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1. İş	O ₁₁	2	5	4	1	2
	O ₁₂	5	4	5	7	5
	O ₁₃	4	5	5	4	5
2. İş	O ₂₁	2	5	4	7	8
	O ₂₂	5	6	9	8	5
	O ₂₃	4	5	4	5	4
3. İş	O ₃₁	9	8	6	7	9
	O ₃₂	6	1	2	5	4
	O ₃₃	2	5	4	2	4
	O ₃₄	4	5	2	1	5
4. İş	O ₄₁	1	5	2	4	12
	O ₄₂	5	1	2	1	2

Çizelge 3.3.'te yer alan O₃₁ operasyonunun 1. makinedeki ve 5. makinedeki süreleri farklı problem senaryolarında bakım periyodunun değişiminin ve yeni iş geliş zamanının etkisini daha iyi gösterebilmek için “4” olarak değiştirilmiştir.

Bu veri setlerinde dinamikliğin sağlanması için iki adet iş belirli bir zamanda çizelgeye dahil edilmektedir.

Modellerin test edilmesi esnasında yeni işlerin geliş zamanları farklı olarak belirlenerek çizelgelerin hem istenen amaç fonksiyonu açısından hem de bilgisayar çözüm zamanı açısından irdelenmesi sağlanmıştır.

İlk veri seti 3 iş-4 makine-7 operasyon için ve ikinci veri seti 3 iş-4 makine-8 operasyon için yeni gelen işlerin operasyonlarının makinelerdeki süreleri rastgele olarak Çizelge 3.4.'teki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. 3 iş 4 makine veri setleri için yeni gelen işlerin süreleri

İşler	Op	Makineler			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
4. İş	O ₄₁	1	4	3	4
	O ₄₂	4	1	2	3
	O ₄₃	3	2	5	1
5. İş	O ₅₁	2	3	4	5
	O ₅₂	4	5	3	1
	O ₅₃	3	4	2	1

Üçüncü veri seti 4 iş-5 makine-12 operasyon için yeni gelen işlerin operasyonlarının makinelerdeki süreleri rastgele olarak Çizelge 3.5.' teki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. 4 iş 5 makine ve 12 operasyon veri seti için yeni operasyonların süreleri

İşler	Op	Makineler				
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
5. İş	O ₅₁	2	4	3	5	1
	O ₅₂	4	1	2	3	4
	O ₅₃	4	5	4	5	2
6. İş	O ₆₁	1	3	5	2	2
	O ₆₂	3	1	3	4	4
	O ₆₃	2	3	4	5	3

İşlerin dahil edildiği zamanlar her problem için ayrı şekilde ele alınarak yeniden çizelgeleme noktasından sonra meydana gelen değişimler belirlenen metotlar açısından irdelenmiştir.

3.1.2. Modellerin Test Edilmesi için Deneysel Tasarım

Önerilen matematiksel modellerin test edilmesi için 45 problem senaryosu tasarlanmıştır. Bu deneyler 3 farklı çizelgeleme yönteminin 45 farklı problem senaryosu için uygulanmıştır. Ele alınan problem senaryoları Çizelge 3.6.'da yer almaktadır. Uygulanan deneylerde problem senaryoları

Çizelge 3.6.'ya göre,

Bakım periyotları ele alınan veri setinde her bir işin makinelerdeki en küçük operasyon süresinin maksimumu dikkate alınarak belirlenmiştir.

Yeni iş geliş zamanları ise başlangıç çizelgelerinde her bir bakım aralığında mantıklı çizelgeler elde etmek için önemli görülen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir.

3 iş 4 makine ve 7 operasyondan oluşan veri seti için üç farklı bakım periyodu ve her bir bakım periyodunda sırasıyla 3 adet, 4 adet ve 4 adet farklı yeni iş geliş zamanları dikkate alınarak toplamda 11 adet problem deneyi dikkate alınmıştır.

3 iş 4 makine ve 8 operasyondan oluşan veri seti için yine üç farklı bakım periyodu ve her bir bakım periyodunda sırasıyla 6 adet, 5 adet ve 5 adet farklı yeni iş geliş zamanları dikkate alınarak toplamda 16 adet problem deneyi dikkate alınmıştır.

4 iş 5 makine ve 12 operasyondan oluşan veri seti için ise yine üç farklı bakım periyodu ve her bir bakım periyodunda sırasıyla 6 adet, 6 adet ve 6 adet farklı yeni iş geliş zamanları dikkate alınarak toplamda 18 adet problem deneyi dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.6. Modellerin test edilmesi için oluşturulan problem senaryoları

Senaryo	İş Sayısı	Makine Sayısı	Operasyon Sayısı	Bakım Periyodu	Yeni İş Geliş Zamanı
1	3	4	7	3	1
2					2
3					4
4				4	1
5					2
6					3
7					5
8				5	1
9					2
10					3
11					4
12	3	4	8	4	1
13					2
14					5
15					8
16					10
17					12
18				5	1
19					2
20					3
21					6
22					8
23				6	1
24					2
25					3
26					7
27					9
28	4	5	12	5	1
29					2
30					3
31					6
32					7
33					9
34				6	1
35					2
36					4
37					7
38					9
39					11
40				7	1
41					2
42					3
43					4
44					5
45					8

3.2. Metot

Çalışmanın bu bölümünde, ele alınan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin karakteristikleri ve çözüm yöntemleri ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. İlk kısımda literatürde genel bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için genel olarak ifade edilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtları ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. İkinci kısımda ele alınan problem için önerilen matematiksel modeller amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtları ifade edilmiştir.

3.2.1. Problemin Genel Yapısı ve Formülasyonu

Genel olarak bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Fattahi, Fallahi, 2010):

n : toplam iş sayısı

m : toplam makine sayısı

j : iş için kullanılan indis ($j = 1, 2, \dots, n$)

i : makine için kullanılan indis ($i = 1, 2, \dots, m$)

l : makinelere atanan operasyonlar arasındaki önceliği ifade etmek için kullanılan indis

O_{jh} : j . işin h . operasyonunu gösteren operasyon kümesi

h_j : j . işe ait operasyon sayısı ($h = 1, \dots, h_j$)

os_{ijh} : i . makinede O_{jh} operasyonunun yapılması için geçen süre

Karar Değişkenleri:

$$y_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } O_{jh} \text{ operasyonu } i. \text{ makinede yapılacaksa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

b_{jh} : j . işin h . operasyonunun başlama zamanı

l_i : i . makineye atanan operasyon sayısı ($l = 1, \dots, l_i$)

ms_{jh} : Makineye atanan O_{jh} operasyonunun atandığı makinedeki süresi

Bz_{il} : i . makine için l . öncelikte atanan operasyonların başlama zamanı

$$x_{ijhl} = \begin{cases} 1 & O_{jh} \text{ operasyonu için } i. \text{ makine seçilirse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$C_{\max}$: Tüm O_{jh} operasyonlarının tamamlanma zamanı

Modelin amaç fonksiyonun tüm işlerin tamamlanma zamanı olan makespan değerinin, maksimum makine iş yükünün ve toplam makine iş yükünün minimize edilmesi olduğu varsayılırsa, tüm parametreler, indisler ve karar değişkenleri dikkate alınarak matematiksel model aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

Amaç Fonksiyonları:

$$\min Z = C_{\max} \quad (3.1)$$

$$\min Y_M = \max_i \{Y_i\} \quad (3.2)$$

$$\min Y_T = \sum_{i=1}^m \{Y_i\} \quad (3.3)$$

Kısıtlar:

$$C_{\max} - b_{jh} - ms_{jh} \geq 0 \quad \forall j, h \quad (3.4)$$

$$\sum_i y_{ijh} \cdot os_{ijh} = ms_{jh} \quad \forall j, h \quad (3.5)$$

$$b_{jh} + ms_{jh} \leq b_{jh+1} \quad \forall j, h \quad h=1, \dots, h_j-1 \quad (3.6)$$

$$Bz_{il} + os_{ijh} \cdot x_{ijhl} \leq Bz_{i(l+1)} \quad \forall i, j, h, l \quad l=1, \dots, l_i-1 \quad (3.7)$$

$$Bz_{il} \leq b_{jh} + (1 - x_{ijhl}) \cdot M \quad \forall i, j, h, l \quad (3.8)$$

$$Bz_{il} + (1 - x_{ijhl}) \cdot M \geq b_{jh} \quad \forall i, j, h, l \quad (3.9)$$

$$y_{ijh} \leq a_{ijh} \quad \forall i, j, h \quad (3.10)$$

$$\sum_j \sum_h x_{ijhl} \leq 1 \quad \forall i, l \quad (3.11)$$

$$\sum_i y_{ijh} = 1 \quad \forall j, h \quad (3.12)$$

$$\sum_l x_{ijhl} = y_{ijh} \quad \forall i, j, h \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.1)'de birinci amaç fonksiyonu olarak tüm operasyonların tamamlanma zamanı, ($C_{\max}$)

Eşitlik (3.2)'de ikinci amaç fonksiyonu olarak maksimum makine iş yükü, (Y_M)

Eşitlik (3.3)'te üçüncü amaç fonksiyonu olarak toplam makine iş yükü, (Y_T) minimize edilmeye çalışılır.

Eşitlik (3.4), her O_{jh} operasyonunun bitiş zamanını gösteren kısıttır.

Eşitlik (3.5), her O_{jh} operasyonunun atandığı makinedeki süresi hesaplayan kısıttır.

Eşitlik (3.6)'da operasyonlar arasındaki öncelikler gösterilir. Bir operasyon kendinden önceki operasyon tamamlandığında gerçekleştirilir.

Eşitlik (3.7), bir makinede l. önceliğe sahip operasyonun tamamlanmasından sonra (l+1). önceliğine sahip operasyonun yapıldığını gösteren kısıttır.

Eşitlik (3.8) ve Eşitlik (3.9), operasyonların atanmasından sonra, atandıkları makinede makinenin boş olduğu zamanda operasyonun başlamasını sağlayan kısıttır. Burada M ilgisiz kısıtları etkisiz hale getirmek için kullanılan büyük bir sayıdır.

Eşitlik (3.10), her bir operasyonun atanabileceği alternatif makinelerden sadece bir tanesine atanabileceğini gösteren kısıttır. Burada O_{jh} operasyonu, i. makine tarafından yapılabilirse a_{ijh} "1" dir, aksi halde "0" değerini almaktadır.

Eşitlik (3.11), bir operasyonun bir makinede sadece bir önceliğe sahip olabileceğini gösteren kısıttır. Burada, eğer O_{jh} operasyonu l. Öncelikte i. makineye atandıysa x_{ijhl} değişkeni "1", aksi halde "0" değerini almaktadır.

Eşitlik (3.12), bir makinenin sadece bir operasyona atanabileceğini gösteren kısıttır.

Eşitlik (3.13), bir önceliğin sadece bir operasyona verilebileceğini gösteren kısıttır.

3.2.2. Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları

Esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri iki alt problemden oluşmaktadır. Üretim sisteminde yer alan paralel makinelerde hangi işlerin yapılması gerektiği yani **makine atanması problemi**, diğeri ise makinelere atanan operasyonların o makinelerde hangi sırada işlenmesi gerektiği problemi yani **operasyon sıralama** problemidir. Bu tür problemlerin çözümünde literatürde birçok çözüm yaklaşımı mevcuttur. Bu çözüm yaklaşımları temelde iki gruba ayrılmaktadır: hiyerarşik yaklaşım ve bütünlük yaklaşım olarak. Bütünlük çözüm yaklaşımı hiyerarşik çözüm yaklaşımlarından daha iyi sonuç vermesi nedeniyle daha çok kullanılmaktadır (Pezella, 2008).

Hiyerarşik yaklaşımda operasyonların makinelere atanması ve operasyonların sıralanması alt problemleri ayrı olarak çözülmektedir. İlk olarak makine ataması gerçekleştirilmekte daha sonra makinelere atanan operasyonların sıralanması problemi çözülmekte veya ilk olarak operasyonların sıralanması problemi çözülmekte ve daha sonra operasyonların makinelere atanması yapılmaktadır. Alt problemlerin bu şekilde ayrı yapılmasıyla problemin karmaşıklığı azaltılmaya çalışılmaktadır. İlk olarak Brandimarte'nin 1993 yılında yaptığı çalışmada bu yaklaşım kullanılmıştır.

Bütünlük yaklaşımda ise makine atama ve operasyon sıralama alt problemleri eş zamanlı olarak çözülmektedir. Üretim sırasında, bir operasyonun yapılmasına karar verildiği anda o operasyonun kendinin işlenebileceği makine alternatiflerinden bir makineye atanması eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece sıralama yapıldığında makine ataması da tamamlanmış olmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan dinamik esnek atölye tipi problem bütünlük yaklaşım ile çözülmüştür. Önerilen modellerle hem makine ataması hem de sıralaması eş zamanlı olarak çözülerek sonuçlar elde edilmiştir.

3.2.3. Bakım Kısıtları Altında Dinamik Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi için Önerilen Matematiksel Modeller

3.2.3.1. Varsayımlar

Yapılan çalışmada aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır;

1. j ile belirtilen birbirinden bağımsız toplam n adet iş vardır.
2. İşlerinin yapılması için i ile belirtilen toplam m adet makine bulunmaktadır.
3. Her bir j işi O_{jh} olarak belirtilen birçok operasyondan oluşmaktadır. Her bir işin operasyonları önceden belirlenmiş sıraya sahiptir.
4. Bütün işler $t=0$ anında başlamak için hazır durumdadır.
5. Bütün makineler $t=0$ anında başlamak için hazır durumdadır.
6. Operasyonların işlem süreleri belirlidir ve makinelere bağımlıdır.
7. Tüm makineler tüm operasyonları (O_{jh}) işleyebilme kapasitesine sahiptir. (Tam esnek)
8. Bir işin bir operasyonu kendinden önceki operasyon tamamlanana kadar yapılamaz.
9. Operasyonların hazırlık zamanları makinelerden bağımsızdır ve işlem zamanı içindedir.
10. Makineler arası taşıma süreleri ihmal edilmiştir ve operasyon süresi içerisine dahildir.
11. Operasyon işlem sırasında yarıda kesilemez.
12. Her makine aynı anda sadece bir operasyon işleyebilir.(operasyonları ve bakımı içeren)
13. Planlanan amaç doğrultusunda her bir makinede bakım süreçleri mevcuttur.
14. Bakım süreleri sabit ve bir birim zaman olarak ele alınmıştır.
15. Makine bakımları toplu şekilde yapılmakta ve önceden belirlenmiş zaman aralığında makine bakımları gerçekleştirilmektedir.

16. Bakım başladığı zaman bakım periyodu tamamlanana kadar makinelerde işlem yapılmamaktadır.
17. Sisteme yeni iş gelişleri mevcuttur (dinamik çevre) ve iş gelişleri rastgele zamanlarda meydana gelmektedir.
18. Makineler için sınırsız sayıda stok yer almaktadır.
19. Yeni iş geliş durumu, olaya dayalı yeniden çizelgeleme stratejisi ve tamamıyla yeniden çizelgeleme metodu kullanılmıştır.

3.2.3.2. Notasyon

Çalışmada ele alınan yeni iş gelişlerinin olduğu ve belirli dönemlerde makinelerin bakıma gönderildiğı dinamik esnek atölye tipi çizelgeme problemi üç farklı yöntemi için ayrı ayrı modellenmiştir. İlk yöntem kararlılığın sağlandığı robust çizelge yöntemi, ikinci yöntem amaç fonksiyonunda tüm işlerin tamamlanma zamanının dikkate alındığı gecikmesiz çizelge yöntemi ve üçüncü yöntem ise yeni gelen işlerin makinelerin boş zamanından sonra çizelgelendiğı sona ekleme çizelge yöntemidir.

Her üç yöntem için oluşturulan modeller iki alt modelden oluşmaktadır. Her üç yöntemin ilk alt modelleri aynı olarak ifade edilmekte ve başlangıç çizelgesinin çözümünü içermektedir. İkinci alt modelleri ise metotlara özgü olarak hem kısıtlar hem de amaç fonksiyonu açısından farklılıklar içermektedir.

İlk alt model sonucunda elde edilen başlangıç çizelgesine ait atama ve sıralama sonuçları dikkate alınarak ikinci alt modeller çözülmektedir.

Modeller için kullanılan notasyon aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

İndisler:

z: Toplam bakım dönemi sayısı

n: Toplam iş sayısı **n':** Yeni toplam iş sayısı

m: Toplam makine sayısı

j: İşler için kullanılan indis $j = 1, 2, \dots, n;$

j': Yeni iş seti için kullanılan indis $j' = 1, 2, \dots, n'$;

i: Makineler için kullanılan indisi $i = 1, 2, \dots, m$;

d: Bakım için kullanılan indis $d = 1, 2, \dots, z$;

O_{jh}: j. işin h. operasyonunu gösteren operasyon kümesi

O_{j'h}: j'. işin h. operasyonunu gösteren operasyon kümesi (yeni iş setinin dahil olduğu işlerin operasyonlarını belirtmede kullanılmaktadır.)

I: makinelerde atanan operasyonların sırasına karar vermek için kullanılan indis

N: başlangıç çizelgesinde yer alan işler kümesi

N': yeniden çizelgeleme anından sonra çizelgelenecek işler kümesi

Parametreler:

h_j: j. iş için gerekli operasyon sayısı (her bir işe ait operasyon sayısını ifade etmek için kullanılmaktadır.)

h_{j'}: j'. iş için gerekli operasyon sayısı

os_{ijh}: O_{jh} operasyonunun i. makine üzerindeki işlem süresi

os'_{ij'h}: O_{j'h} operasyonunun i. makine üzerindeki işlem süresi

BB_d: d. Dönem bakıma kadar olan aralığın başlama zamanı

BBit_d: d. Dönem bakıma kadar olan aralığın bitiş zamanı

Karar Değişkenleri:

$$y_{ijh} = \begin{cases} 1 & i \text{ makinesinde } O_{j,h} \text{ operasyonu işlenecekse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$y'_{ij'h} = \begin{cases} 1 & i \text{ makinesinde } O_{j',h} \text{ operasyonu işlenecekse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

b_{jh}: j. işin h. Operasyonunun başlama zamanı

b_{j'h}: j'. işin h. Operasyonunun başlama zamanı

l_i: i. makineye atanan operasyon sayısı

bs_i: yeni iş geldikten sonra makinelerin operasyonu işlemek amacıyla müsait olması için geçen süre

ms_{jh} : Makine seçiminden sonra $O_{j,h}$ operasyonunun işlem süresi

$ms_{j'h}$: Makine seçiminden sonra $O_{j'h}$ operasyonunun işlem süresi

Bz_{il} : i. makine için l. öncelikte atanan operasyonların başlama zamanı

Bz'_{il} : i. makine için yeni işler için l. öncelikte atanan operasyonların başlama zamanı

$$x_{ijhl} = \begin{cases} 1 & O_{jh} \text{ operasyonu i. makinede l. önceliğe atanırsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$x'_{ij'hl} = \begin{cases} 1 & O_{j'h} \text{ operasyonu i. makinede l. önceliğe atanırsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$U_{ijhd} = \begin{cases} 1 & \text{i. makineye atanan } O_{jh} \text{ operasyonu} \\ & \text{d. dönem bakım aralığına atanırsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$U'_{ij'hd} = \begin{cases} 1 & \text{i. makineye atanan } O_{j'h} \text{ operasyonu} \\ & \text{d. dönem bakım aralığına atanırsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu;

$C_{\max}$: O_{jh} operasyonlarının tümünün tamamlanma zamanı

$C_{\max}'$: $O_{j'h}$ operasyonlarının tümünün tamamlanma zamanı

$|b_{jh} - b_{j'h}|$: Yeni iş gelişinden sonra kalan operasyonlardaki başlama zamanları farkı

$\sum_j \sum_h b_{jh}$: Operasyonların başlama zamanlarının toplamı

3.2.3.3. Notasyon Başlangıç Çizelgeleri için Oluşturulan Matematiksel Model

Ele alınan problem için önerilen matematiksel modellerde dinamik iş gelişinden önce başlangıç çizelgesinin oluşturulması için önerilen matematiksel modelde notasyon ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$\forall j \in N$ için;

Amaç fonksiyonu:

$$\min z = C_{\max} + \sum_j \sum_h b_{jh} \quad (3.14)$$

Kısıtlar:

Oluşturulan bu alt modelde Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.13. arasındaki tüm kısıtlar aşağıda ifade edilen Eşitlik 3.15. ve Eşitlik 3.17. arasındaki kısıtlar ile birlikte ele alınarak çözülmektedir.

$$BB_{it_d} + (1 - U_{ijhd}).M \geq b_{jh} + ms_{jh} \quad \forall i, j, h, d \quad (3.15)$$

$$b_{jh} + (1 - U_{ijhd}).M \geq BB_d \quad \forall i, j, h, d \quad (3.16)$$

$$\sum_d U_{ijhd} = y_{ijh} \quad \forall i, j, h \quad (3.17)$$

Burada;

Eşitlik 3.14.'te bu model için bütün operasyonların tamamlanma zamanı olan makespan değerinin (C_{max}) ve operasyonların mümkün olduğunca erken başlamasını sağlayan başlangıç noktalarının toplamının minimize edileceği ifade edilmiştir.

Eşitlik 3.15. ve Eşitlik 3.16. her bir operasyonun, bakım dönemine kadar olan aralığın bitişinden önce ve bakım dönemine kadar olan aralığın başlangıcından sonra yapılmasına karar verme kısıtıdır. M kısıtları etkisiz hale getirmek için kullanılan çok büyük bir sayıdır.

Eşitlik 3.17. bir operasyonun atandığı makinede sadece bir bakım aralığına atanması kısıtıdır.

Tüm bu kısıtlar ve amaç fonksiyonu dikkate alınarak başlangıç çizelgeleri oluşturulmaktadır.

3.2.3.4. Robust Çizelge için Önerilen Matematiksel Model

Robust çizelge oluşturmak için önerilen bu yöntemde matematiksel model iki alt model kullanılarak çözülmektedir. İlk alt model ile başlangıç çizelgesi oluşturulduktan sonra ikinci alt modelde yeni işlerin geliş zamanında o ana kadar gerçekleştirilen operasyonlar aynı kalarak, yeni gelen işlerin operasyonları ile ilk çizelgede o ana kadar gerçekleştirilmemiş operasyonlar ile birlikte yeniden

çizelgelenmektedir. Bu metot modellenirken başlangıç noktalarının mümkün olduğunca değişmemesini sağlayan dayanıklılığı ifade eden başlangıç noktaları sapması amaç fonksiyonuna dahil edilmektedir. Bu sapma, yeniden çizelgeleme anına kadar gerçekleştirilmemiş operasyonların başlangıç çizelgesindeki başlama zamanı ile yeniden çizelgelemeden sonraki başlangıç zamanları farkının mutlak değerini içermektedir.

İkinci alt model ise yeni iş gelişi ile eklenen operasyonların yeniden çizelgeleme anına kadar yapılan operasyonlardan elenerek geriye kalan operasyonlarla birlikte çizelgelenmesini sağlayan matematiksel modeldir. İkinci alt model çözülürken, $\forall j' \in N'$ için Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.13. arasındaki tüm kısıtlar, Eşitlik 3.15. ve Eşitlik 3.17. arasındaki tüm kısıtlar ve aşağıda ifade edilen Eşitlik 3.19. kısıtı ile birlikte ele alınarak çözülmektedir.

İkinci alt model için notasyon aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$\forall j' \in N'$ için;

Amaç fonksiyonu:

$$\min z = \alpha \times C_{\max}' + \beta \times |b_{jh} - b_{j'h}| + \gamma \times \sum_j \sum_h b_{jh} \quad (3.18)$$

Kısıtlar:

$$b_{j'h} \geq b_{Si} \cdot y'_{ij'h} + \zeta Z \quad \forall i, j', h \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.18'de ikinci alt modelde geriye kalan operasyonlar ile yeni gelen işlerin operasyonların tamamlanma zamanı olan makespan değerinin ($C_{\max}'$), yeni iş geldikten sonra operasyonların başlama zamanları arasındaki fark ve operasyonların mümkün olduğunca erken başlamasını sağlayan başlangıç noktalarının toplamının minimize edileceği ifade edilmiştir. Çalışmada iki ayrı amaç değeri toplanırken literatürde dikkate alınan değerler $\alpha=5$, $\beta=1$ ve $\gamma=1$ ağırlıklarıyla çarpılmıştır. (Zhang ve ark.,2013)

Eşitlik 3.19' da her bir operasyonun başlama zamanı yeni iş geldikten sonra makinelerin operasyonu başlatması için geçen süreden küçük olmalıdır. Burada bs_i i. makinenin yeni iş geldikten sonra boş olana kadarki geçen süreyi ifade etmektedir. ÇZ ise yeni işin geliş zamanını ifade etmektedir.

3.2.3.5. Gecikmesiz Çizelge için Önerilen Matematiksel Model

Gecikmesiz çizelge oluşturmak için önerilen bu yöntemde de matematiksel model iki alt model kullanılarak çözülmektedir. Yine ilk alt model ile başlangıç çizelgesi oluşturulduktan sonra ikinci alt modelde yeni işlerin geliş zamanında o ana kadar gerçekleştirilen operasyonlar aynı kalarak, yeni gelen işlerin operasyonları ile ilk çizelgede o ana kadar gerçekleştirilmemiş operasyonlar ile birlikte yeniden çizelgelenmektedir. Amaç fonksiyonunda geriye kalan operasyonlar ile yeni gelen işlerin operasyonların tamamlanma zamanı olan makespan değeri ile operasyonların mümkün olduğunca erken başlamasını sağlayan başlangıç noktalarının toplamı minimize edilmeye çalışılmıştır.

İkinci alt model çözülürken, $\forall j' \in N'$ için Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.13. arasındaki tüm kısıtlar, Eşitlik 3.15. ve Eşitlik 3.17. arasındaki tüm kısıtlar, Eşitlik 3.19. ve aşağıda ifade edilen Eşitlik 3.20.' de yer alan amaç fonksiyonu ile birlikte ele alınarak çözülmektedir.

İkinci alt model için notasyon aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$\forall j' \in N'$ için;

Amaç Fonksiyonu:

$$\min z = C_{\max}' + \sum_j \sum_h b_{j'h} \quad (3.20)$$

3.2.3.6. Sona Ekleme Çizelgesi için Önerilen Matematiksel Model

Üçüncü yöntem olan sona ekleme yönteminde yeni gelen işlerin operasyonları başlangıç çizelgesindeki her makinenin boş olduğu anda çizelgelenmektedir. Bu yöntem için oluşturulan matematiksel model de iki alt

modelden oluşmaktadır. İlk alt model ile başlangıç çizelgesi oluşturulduktan sonra ikinci alt model ile yeni gelen işlerin operasyonları çizelgelenmektedir.

Amaç fonksiyonunda yine geriye kalan operasyonlar ile yeni gelen işlerin operasyonların tamamlanma zamanı olan makespan değeri ile operasyonların mümkün olduğunca erken başlamasını sağlayan başlangıç noktalarının toplamı minimize edilmeye çalışılmıştır.

İkinci alt model çözülürken, $\forall j' \in K'$ için, Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.13. arasındaki tüm kısıtlar, Eşitlik 3.15. ve Eşitlik 3.17. arasındaki tüm kısıtlar, aşağıda ifade edilen Eşitlik 3.21.' de yer alan amaç fonksiyonu ve Eşitlik 3.22. ve Eşitlik 3.25. arasındaki tüm kısıtlar ile birlikte ele alınarak çözülmektedir.

Bu yöntem için ikinci alt modele ait notasyon aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

K' : yeni gelen iş kümesi

$bitis_{jh}$: başlangıç çizelgesindeki O_{jh} operasyonunun bitiş zamanı

Amaç Fonksiyonu:

$$\min z = C_{\max}' + \sum_j \sum_h b_{j'h} \quad (3.21)$$

Kısıtlar:

$$b'_{j'h} \geq M_{soni} * y'_{ij'h} \quad \forall i, j', h \quad M_{soni} \geq \text{ÇZ} \quad (3.22)$$

$$b'_{j'h} \geq \text{ÇZ} * y'_{ij'h} \quad \forall i, j', h \quad M_{soni} < \text{ÇZ} \quad (3.23)$$

$$(b'_{jh} + os'_{ijh}) * y'_{ijh} = bitis_{jh} \quad \forall i, j', h \quad \forall j \in N \quad (3.24)$$

$$b'_{jh} * y'_{ijh} = b_{jh} \quad \forall i, j', h \quad \forall j \in N \quad (3.25)$$

Bu yöntemde ikinci alt model için dikkate alınan kısıtlar sadece yeni gelen işler için oluşturulmuştur.

Eşitlik 3.22.' ve 3.23.'e göre, yeni gelen işlerin her bir operasyonu için;

Eğer atandığı makinenin başlangıç çizelgesindeki boşa düştüğü zaman yeni iş geliş zamanından büyük veya eşitse yeni gelen işlerin operasyonlarının başlama zamanı, makinenin boşa düştüğü zamandan büyük veya eşit olmalıdır. (Eşitlik 3.22.)

Eğer başlangıç çizelgesindeki boşa düştüğü zaman yeni iş geliş zamanından küçükse yeni gelen işlerin operasyonlarının başlama zamanı, yeni iş geliş zamanından büyük veya eşit olmalıdır. (Eşitlik 3.23.) Burada ÇZ, yeni işin geliş zamanını ifade etmektedir.

Eşitlik 3.24., başlangıç çizelgesindeki operasyonlarının bitiş zamanlarının yeniden çizelgelemeden sonra aynı kalmasını ifade eden kısıttır.

Eşitlik 3.25., başlangıç çizelgesindeki operasyonlarının başlangıç zamanlarının yeniden çizelgelemeden sonra aynı kalmasını ifade eden kısıttır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada, bakım kısıtları altında dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde üç farklı yöntem test edilmiştir. İlk olarak yeni iş gelişlerinden sonra eski çizelgedeki çizelgelenmeyen operasyonların başlangıç zamanlarının mümkün olduğunca az değişmesi yöntemi (robust yöntem), daha sonra amaç fonksiyonunda bütün operasyonların tamamlanma zamanının dikkate alındığı (C_{max}) gecikmesiz çizelge yöntemi, son olarak yeni gelen işlerin makinelerin boş zamanlarına eklenmesi yöntemidir (Sona ekleme yöntemi). Problem her üç yöntem için 45 problem senaryosu ile 3 adet örnek veri seti üzerinde değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmelerde incelenen dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için oluşturulan matematiksel modellerin çözümünde kolay kullanılabilirliği, büyük ölçekli ve karmaşık problemlerin modellenmesine olanak sağlayan GAMS (The General Algebraic Modeling System) programlama dili kullanılmıştır. Yapılan çalışmada istenen performans değerini sağlaması için yazılan kodlar GAMS 24.5 programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Probleme ait önerilen matematiksel modellerin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçların Gantt şemasında gösterimi için oldukça hızlı ve etkili çözüm sunan C++ programlama dili kullanılmıştır.

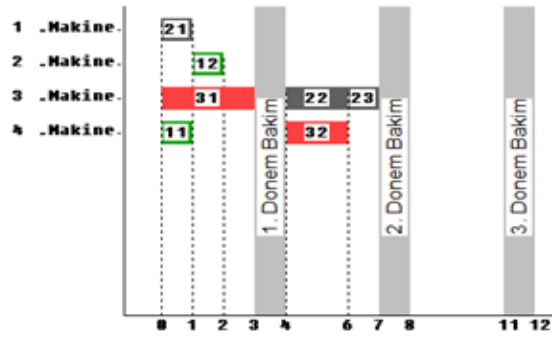
Probleme ait çözümler Intel Core i7-4770, 3.40 GHz işlemcili ve 16 GB RAM'li bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

4.1. 3 İş - 4 Makine ve 7 Operasyondan Oluşan Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar

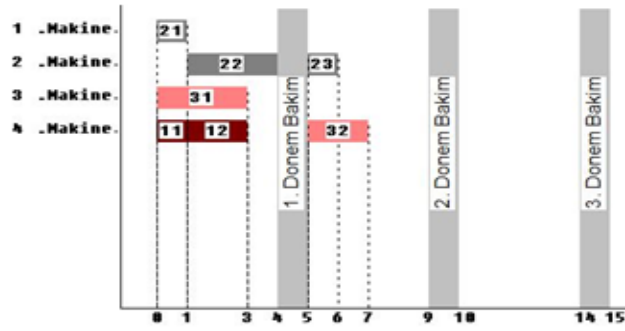
İlk veri setinin bakım periyotlarına ait elde edilen başlangıç çizelgeleri Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere bakım periyodu değiştirildiğinde C_{max} değeri Bakım periyodunun 3 birim olduğu ve Bakım periyodunun 4 birim olduğu

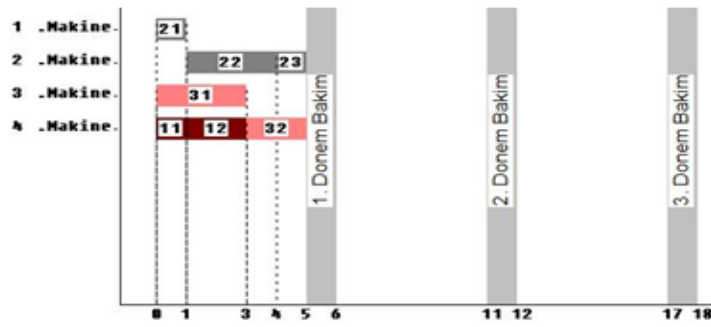
durumlarda aynı olup, 7 birimdir. Ancak bakım periyodu 5 birim olduğunda C_{max} değeri 5 birim zamana düşmüştür.



Bakım Periyodu = 3



Bakım Periyodu = 4



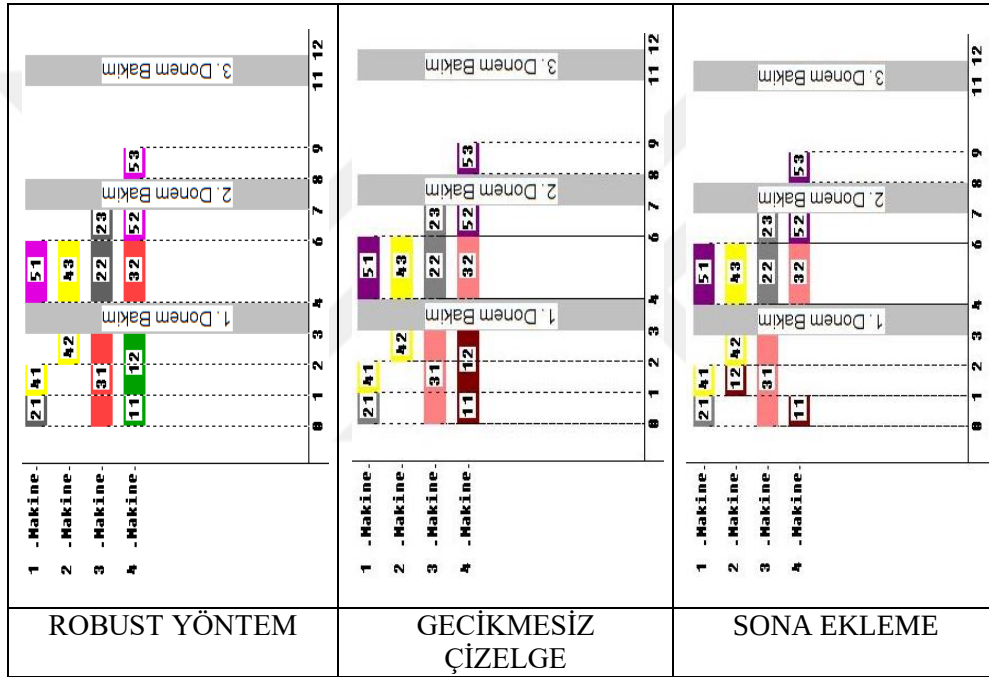
Bakım Periyodu = 5

Şekil 4.1. İlk veri seti için başlangıç çizelgeleri

Bakım periyodunun 3 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

3 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

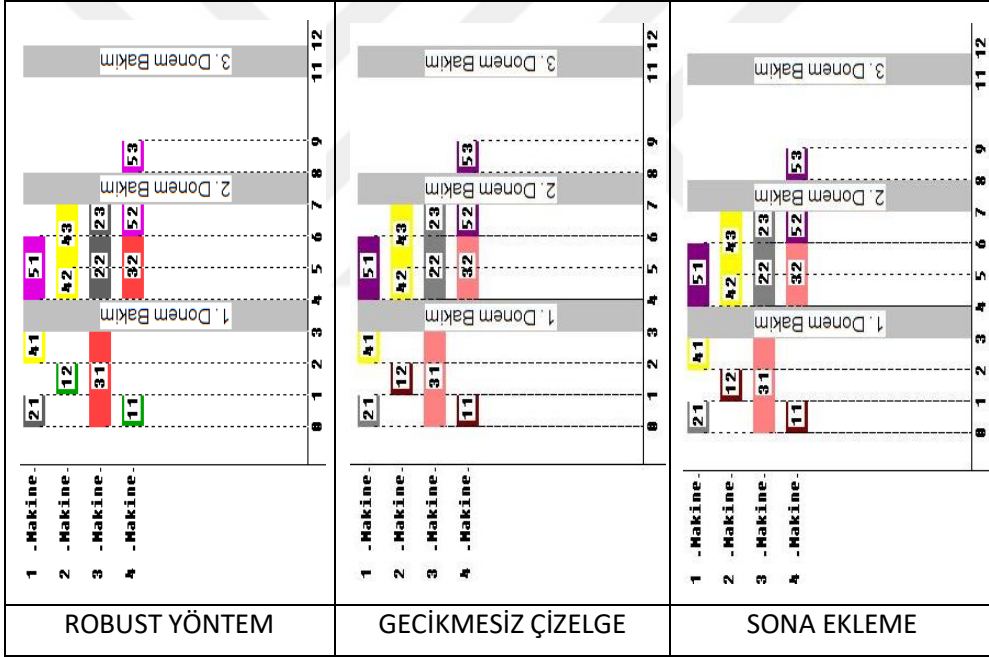


Şekil 4.2. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 9 birimdir. Çizelgeler incelendiğinde makinelerin doluluk oranları 1. ve 3. Makine için her üç yöntemde aynı olup sırasıyla 0.67 ve 0.89 birimdir. Bunun yanı sıra 4. Makine hem Robust yöntem hem de Gecikmesiz Çizelge yöntemi için %100 doluluk oranına sahiptir. Yeni gelen 4. ve 5. işler er üç yöntemde de aynı zaman birimlerinde teslim edilmektedir. 4. iş 6. zaman biriminde, 5. iş ise 9. zaman biriminde teslim

edilmektedir. 1. iş hem Robust yöntemde hem de Gecikmesiz Çizelge yönteminde bir zaman birimi daha geç teslim edilmektedir. Robust çizelgeleme yöntemi için 4 makede ortalama doluluk oranı % 78 elde edilmiş diğer yöntemlerden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni Bakım periyodunun kısa olması ve mevcut işlerin sapmalarının minimum tutulmasıdır. Bu da aynı zamanda işlerin teslim sürelerinin ve C_{max} değerinin düşük çıkmasını açıklamaktadır.

Yeni iş geliş zamanının 2 birim olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.

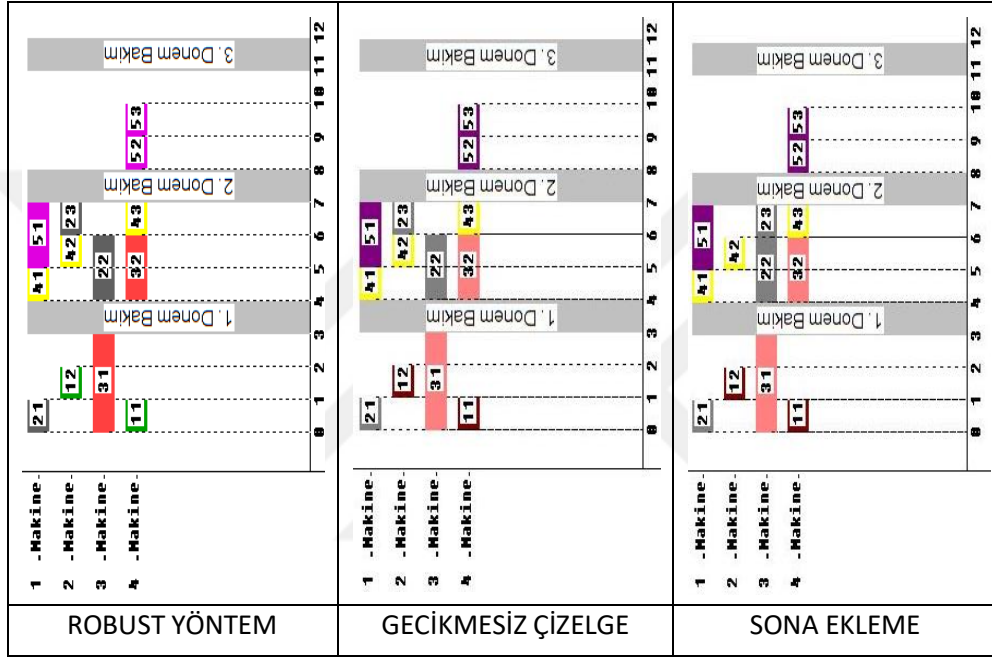


Şekil 4.3. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Şekil 4.3.'ten de görüldüğü üzere her üç yöntem için elde edilen çizelgeler aynıdır. Bu yüzden makine doluluk oranları ve işlerin teslim tarihleri de aynı olarak

belirlenmiştir. Operasyonların çizelgelerde aynı şekilde atanmasından dolayı makine doluluk oranları ve işlerin teslim süreleri aynı çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 4 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



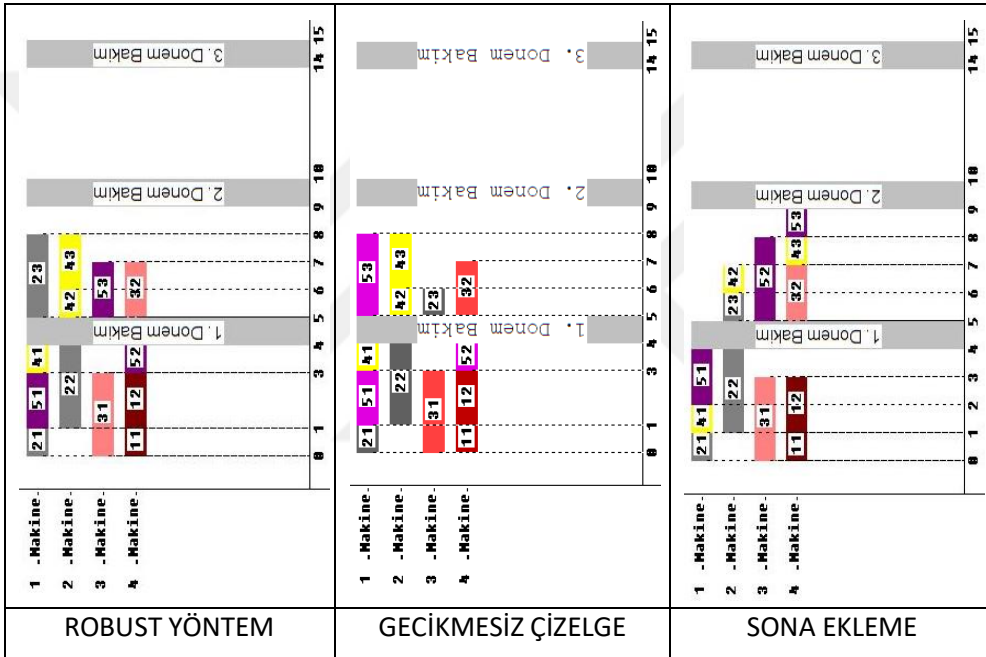
Şekil 4.4. İlk veri seti için Bakım periyodu =3 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 10 birimdir. Makina doluluk oranları her üç yöntem için 2. Zaman biriminde elde edilen çizelgeye göre azalmış ve genel olarak doluluk oranları aynıdır. Her üç yöntemde de yeni gelen işler aynı zamanlarda teslim edilmektedir (4. İş 7. Zaman biriminde 5. İş 10. Zaman biriminde). Yeni gelen işlerin mevcut işlerdeki çizelgelemeyi değiştirmemesinden dolayı mevcut işlerin teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

Bakım periyodunun 4 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

4 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.

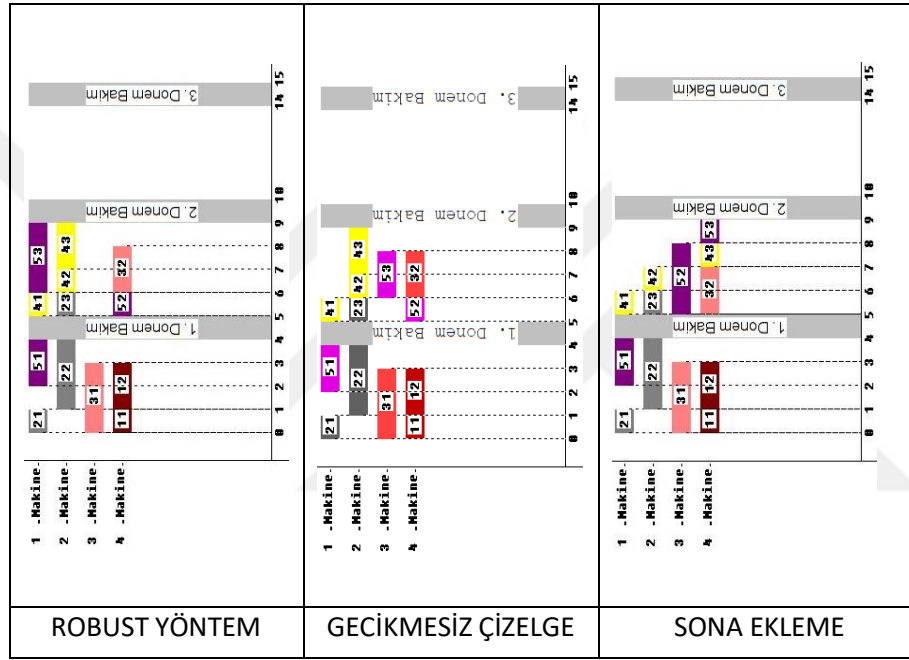


Şekil 4.5. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Şekil 4.5.'e göre C_{max} değerleri Robust yöntem ve Gecikmesiz Çizelge yöntemi için 8 birim iken Sona ekleme yönteminde 9 birimdir. Robust yöntemde makine doluluk oranlarının diğer iki yönteme göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 1. Makinanın doluluk oranı % 100 olarak hesaplanmıştır. Yeni gelen işlerin teslim zamanları ele alınacak olursa, 4. iş her üç yöntemde de aynı zamanlarda teslim edilirken, 5. iş Robust yöntemde 7. Zaman

biriminde diğer yöntemlerden daha erken olarak teslim edilmiştir. Yeni iş geliş zamanının erken olması ve operasyonların daha düzenli dağılmasından dolayı Robust yöntemde makine doluluk oranının yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Yeni iş geliş zamanın 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

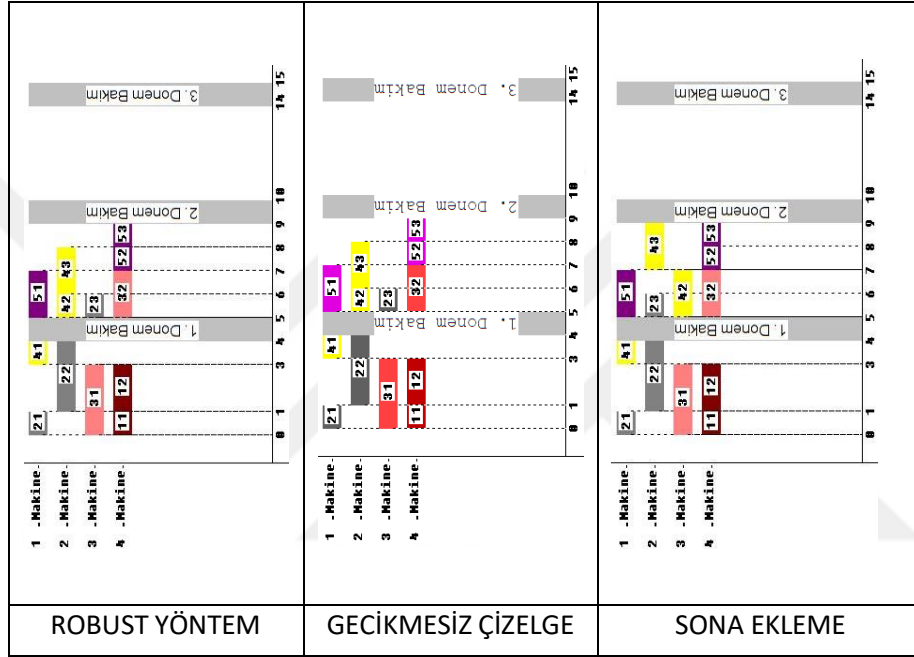


Şekil 4.6. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 9 birimdir. Makine doluluk Robust yönteminde 1. ve 2. Makinalar doluluk oranları sırasıyla 0,89 ve 0,89, Sona ekleme yöntemi doluluk oranları 0,56 ve 0,67 olarak hesaplanmış olup Robust yöntemde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Her üç yöntemde de yeni gelen işler aynı zamanlarda teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Çizelgelerde yeni gelen işlerin genel olarak

1. ve 2. Makineye atanmasından dolayı bu makinelerin doluluk oranları diğerlerine göre yüksek çıkmıştır.

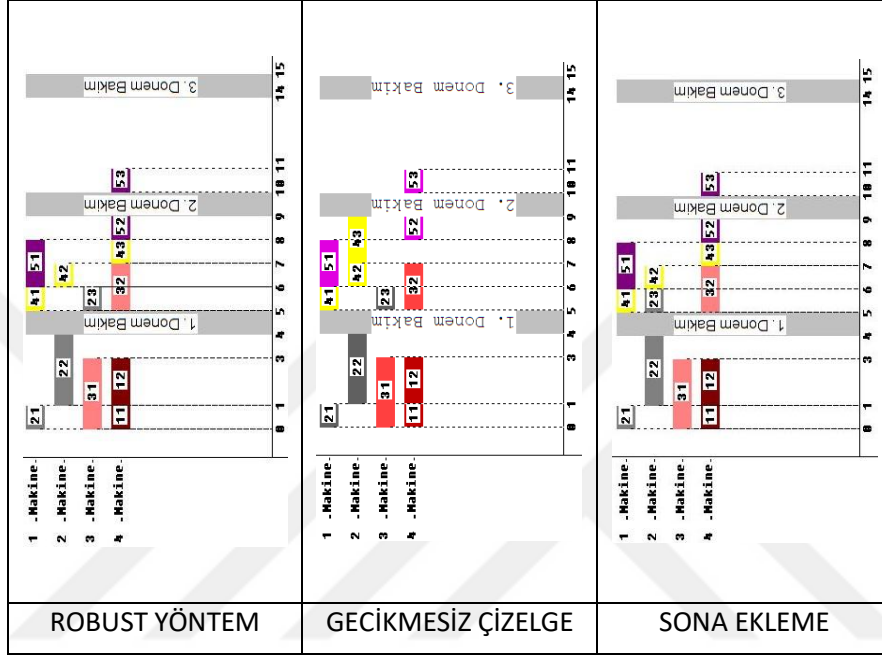
Yeni iş geliş zamanının 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 9 birimdir. Makina doluluk oranları her üç yöntemde de aynı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra yeni gelen 4. İş Sona ekleme yönteminde 9 birim zamanda teslim edilirken, Robust yönteminde 8. birim zamanda daha erken olarak teslim edilmiştir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 4. işin 2. operasyonunun 3. makineye atanmasından dolayı Sona ekleme yönteminde 4. iş daha geç teslim edilerek C_{max} değerinin artmasına neden olmuştur.

Yeni iş geliş zamanının 5 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.



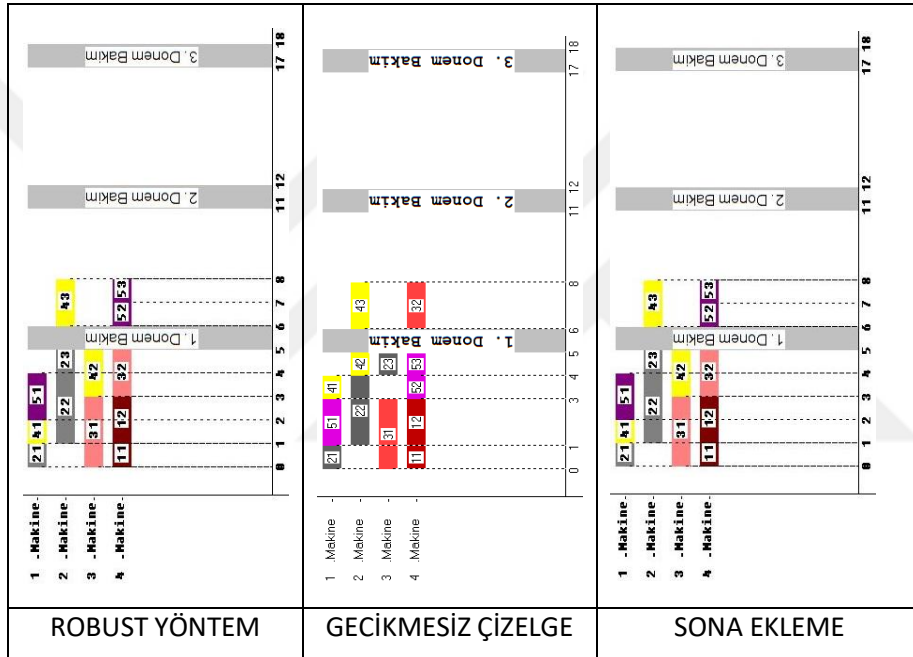
Şekil 4.8. İlk veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 11 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 3. Makinada doluluk oranı 0,55, Sona ekleme yönteminde 0,45 hesaplanmıştır. Robust yöntemde 4. Makinada doluluk oranı 0,91, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,82 hesaplanmış olup Robust yöntemi daha yüksek olduğu görülmüştür. Her üç yöntemde de yeni gelen işler aynı zamanlarda teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 4. işin son operasyonunun 4. makinaya atanmasından dolayı doluluk oranı Robust yöntemde daha yüksek çıkmıştır.

Bakım periyodunun 5 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

4 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.

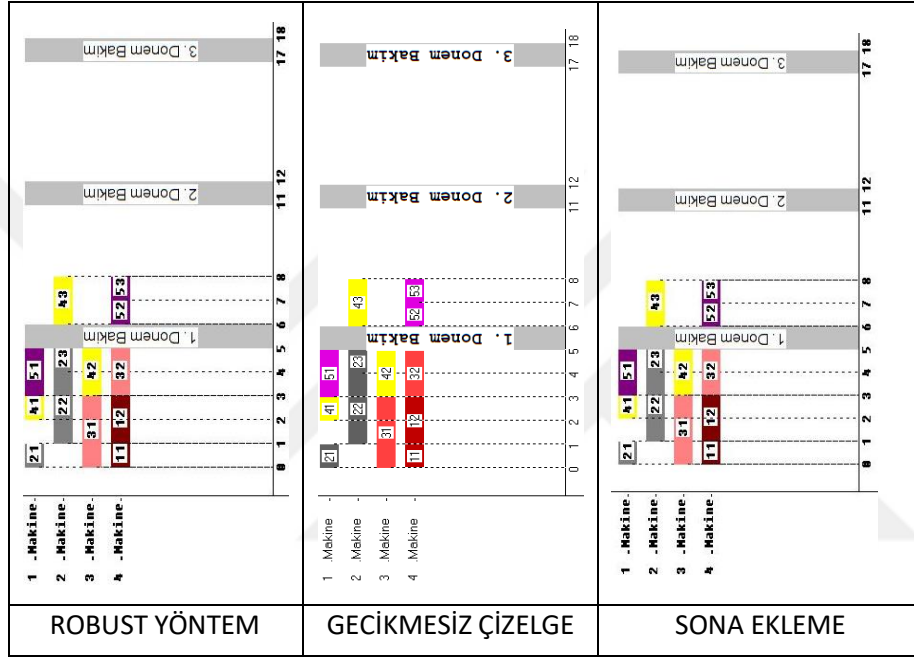


Şekil 4.9. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 8 birimdir. Makinalar doluluk oranları Robust yöntemde 3. Makinada 0,75, Gecikmesiz Çizelge yönteminde doluluk oranı 0,63 olarak hesaplanmış olup Robust yöntemde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yeni gelen işlerin teslim zamanları arasında fark yoktur. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 4. işin 3.

operasyonunun 3. makinadaki süresi daha yüksek olduğundan dolayı 3. makinadaki doluluk oranı Robust yöntemde daha yüksek çıkmıştır.

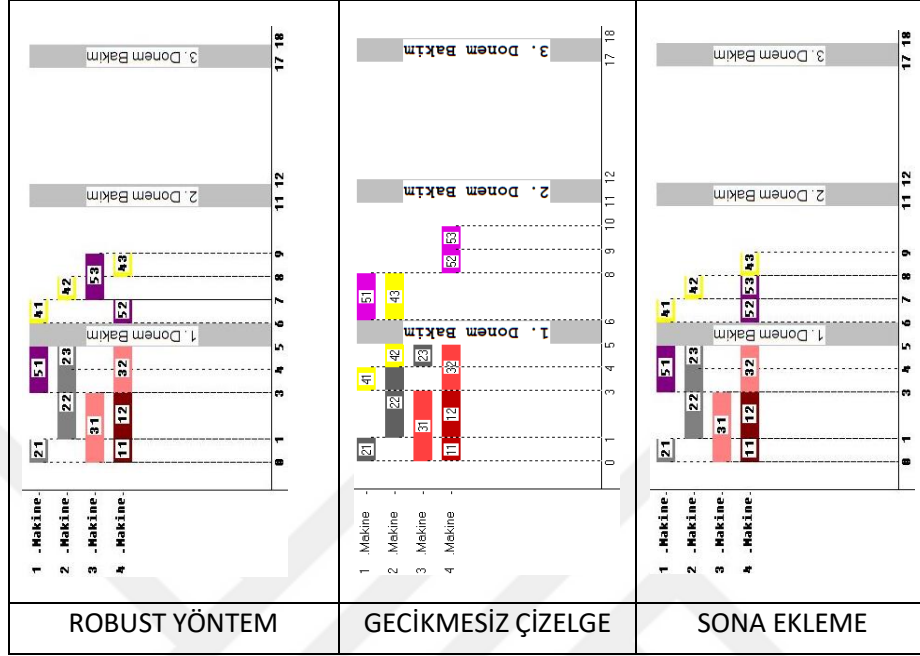
Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre her üç yöntemde operasyonların makinelere aynı şekilde atanmasından dolayı C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 8 birimdir. Makinelerin doluluk oranları her üç yöntem için aynı hesaplandığı tespit edilmiştir. Her üç yöntemde de yeni gelen işler aynı zamanlarda teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

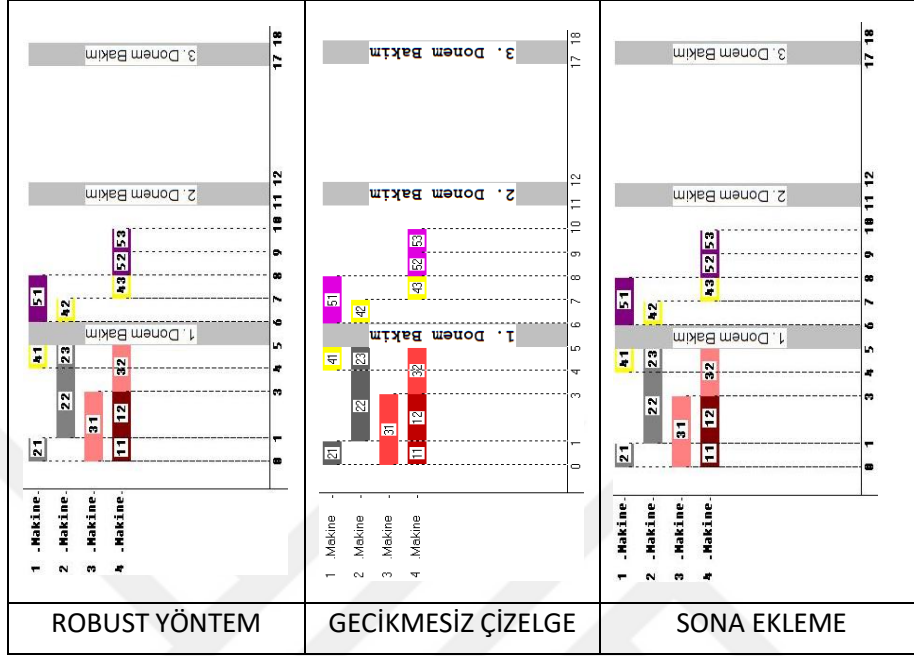
Yeni iş geliş zamanının 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Şekil 4.11.'e göre C_{max} değerleri Robust yöntem ve Sona ekleme yöntemi için 9 birim iken Gecikmesiz Çizelge yönteminde 10 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 1. Makinada doluluk oranı 0,56, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,50 hesaplanmış, 3. Makinada doluluk oranı Robust yöntemde 0,67, Sona ekleme yönteminde 0,44 hesaplanmış olup Robust yöntemi daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 1. ve 2. makineye atanan işlerin sıralı ve daha düzenli dağılmasından dolayı Robust yöntemde makine doluluk oranları bu makinelerde diğer yöntemlerde yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 4 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



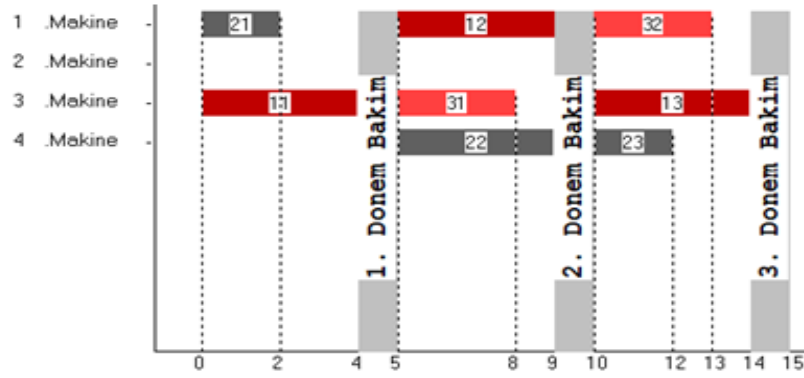
Şekil 4.12. İlk veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 10 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde her bir yöntem için aynı olduğu hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Her üç yöntemde de yeni gelen işler aynı zamanlarda teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Beklenen makine doluluk oranının bütün yöntemlerde diğer yeni iş geliş zamanlarından ortalama % 58 oranla düşük çıkmıştır. Bunun temel nedeni Bakım periyodunun yüksek olması ve yeni iş geliş zamanının ileride olmasıdır.

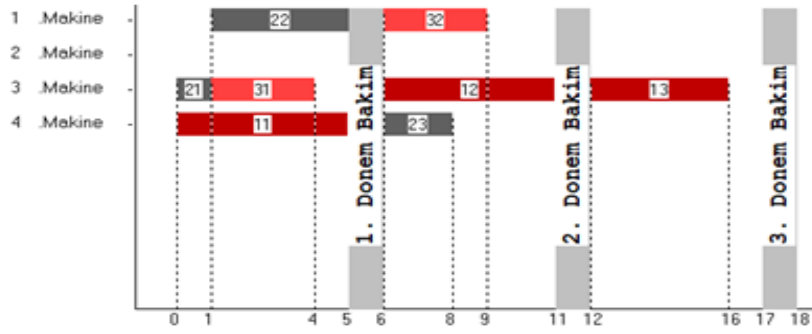
4.2.3 İş - 4 Makine ve 8 Operasyon Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar

İkinci veri setinin bakım periyotlarına ait elde edilen başlangıç çizelgeleri Şekil 4.13.' te gösterilmiştir. Buna göre Bakım periyodu=4 olduğunda tüm operasyonların tamamlanma zamanı C_{max} değeri 14 birim, Bakım periyodu 5 ve 6 olduğunda operasyonların makinelerdeki değişimi ve her bir makinedeki süre farklılığından dolayı sırasıyla 16 birim zamana ve 18 birim zamana çıkmıştır. Bakım periyodunun artmasıyla, yüksek süreye sahip operasyonların makinelere atanmasından dolayı C_{max} değeri artmıştır.

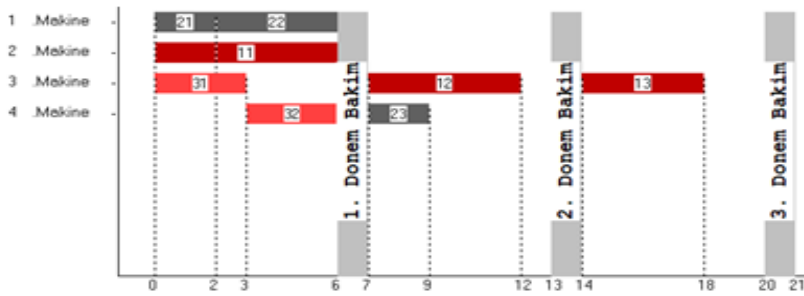




Bakım Periyodu = 4



Bakım Periyodu = 5



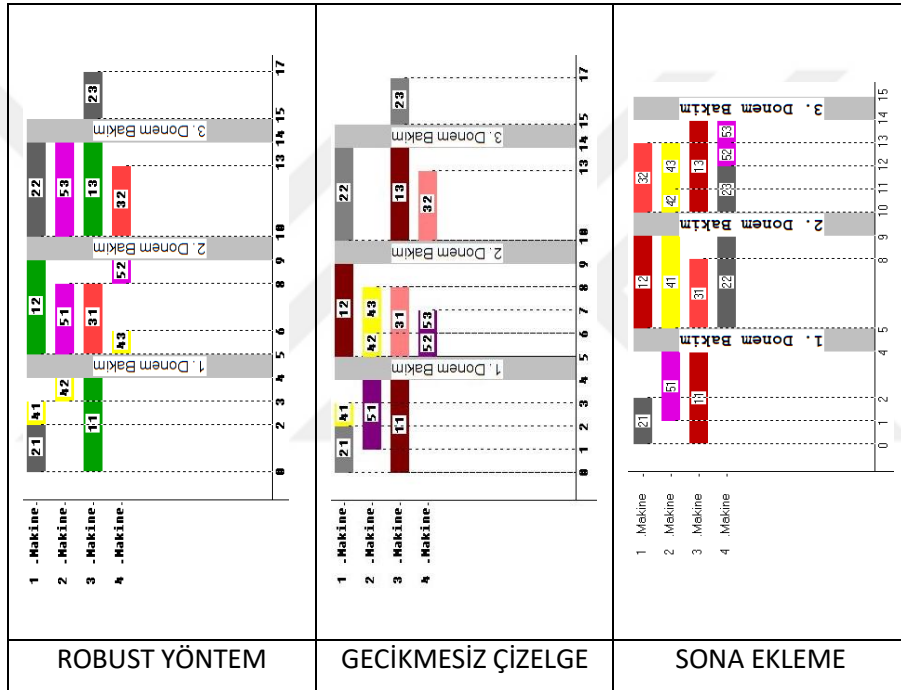
Bakım Periyodu = 6

Şekil 4.13. İkinci veri seti için farklı bakım periyotlarına ait başlangıç çizelgeleri

Bakım periyodunun 4 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

6 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.14'te da gösterilmiştir.

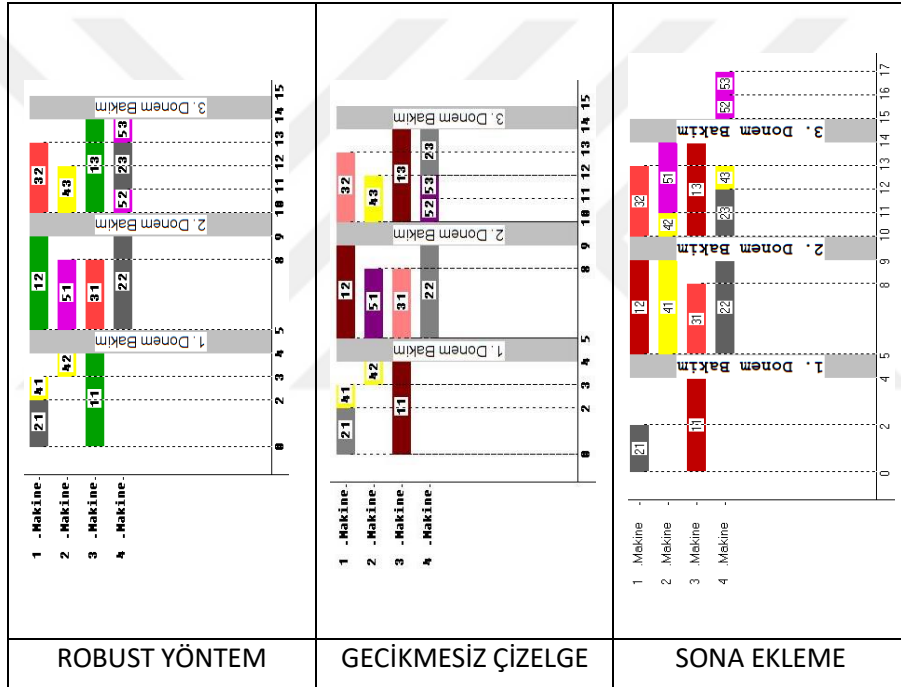


Şekil 4.14. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri Robust ve Gecikmesiz Çizelge yöntemlere göre 17 birim Sona ekleme yöntemine göre 14 birimdir. Burada elde edilen sonuçlar büyük GAP değerleri için elde edilmiştir. Sona ekleme yöntemi ile aynı sonuçların alınması için yüksek bilgisayar zamanı gerekmektedir. Makine doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,82 ve 0,94, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,79 ve 0,93 hesaplanmış olup Robust

yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. İşte Sona ekleme yöntemine göre 13. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 6. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

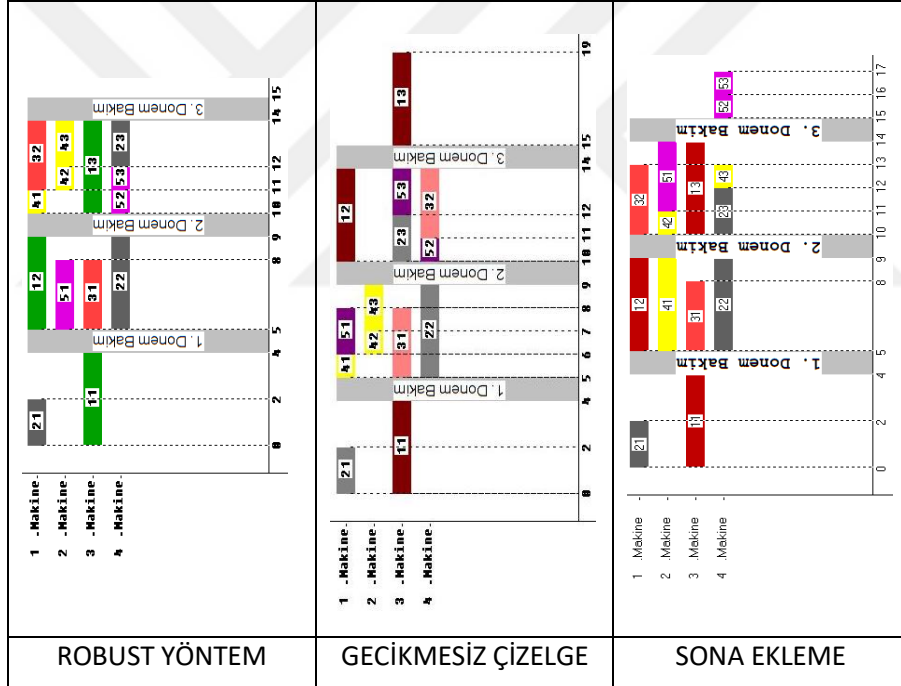


Şekil 4.15. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri Robust ve Gecikmesiz Çizelge yöntemlerine göre 14 birim Sona ekleme yöntemine göre 17 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,86 ve 0,93, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,71 ve 0,82 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. İşte Sona

ekleme yöntemine göre 13. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 12. Birim zamanında, yeni gelen 5. işte de Sona ekleme yöntemine göre 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 14. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemde 1 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Operasyonların bakımlar arasında Robust yöntemde düzgün dağılmasından dolayı makine doluluk oranları bu makinelerde yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanın 5 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.16.'da gösterilmiştir.

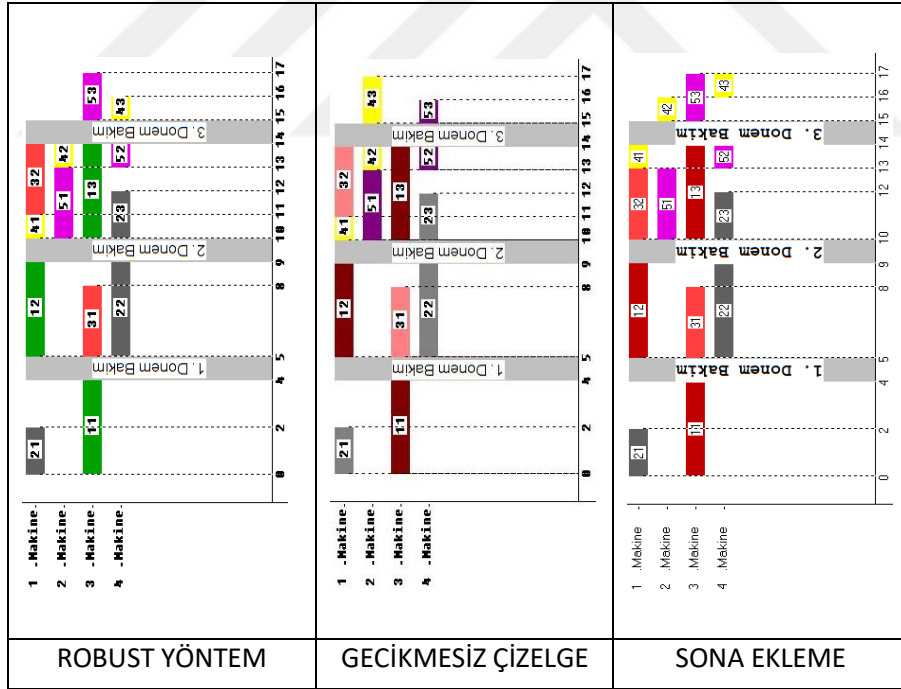


Şekil 4.16. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri Robust yönteminde 14 birim, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 19 birimdir. Burada amaç fonksiyonundaki farklılık Robust yöntemde amaç fonksiyonunda C_{max} değerinin daha fazla öneme sahip olmasından

kaynaklanmaktadır. Sona ekleme yönteminde 17 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,86 ve 0,93, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,71 ve 0,82 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. İşte Sona ekleme yöntemine göre 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 12. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Operasyonların bakımlar arasında dengeli dağılmasından dolayı Robust yöntemde doluluk oranı tüm makineler için ortalama % 77 daha iyi olarak tespit edilmiştir.

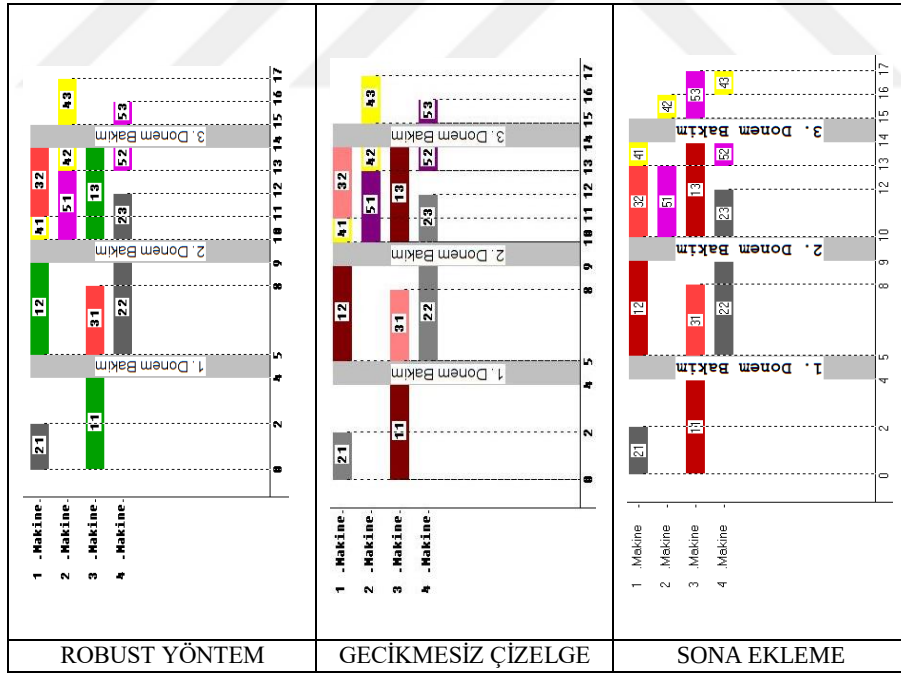
Yeni iş geliş zamanının 8 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 17 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 3. Makinada doluluk oranı 0,94, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,82 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. işte Sona ekleme yönteminde 17. birim zamanda teslim edilirken Robust yöntemde 16. birim zamanda daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Yeni gelen 5. işin son operasyonunun 3. makineye atanmasından dolayı Robust yöntemde bu makinedeki doluluk oranı yüksek çıkmıştır. 4. işin 2. operasyonunun daha erken başlamasında dolayı Robust yöntemde işin daha erken teslim edilmesini sağlamıştır.

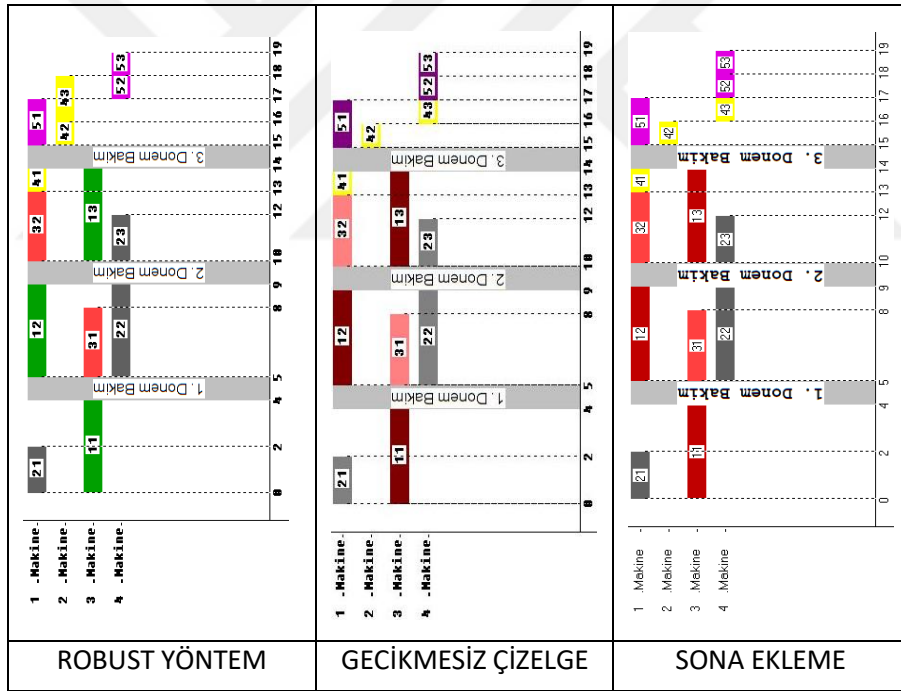
Yeni iş geliş zamanının 10 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =10 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 17 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 2. Makinada doluluk oranı 0,53, Sona ekleme yöntemde 0,41 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 4. işin ilk iki operasyonu hem Robust yöntemde hem de Gecikmesiz çizelge yönteminde 2. makineye atandığından dolayı bu makinedeki doluluk oranı her iki yöntemde de sona ekleme yöntemine göre yüksek çıkmıştır

Yeni iş geliş zamanının 12 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. İkinci veri seti için Bakım periyodu =4 ve Yeni iş geliş zamanı =12 iken elde edilen çizelgeler

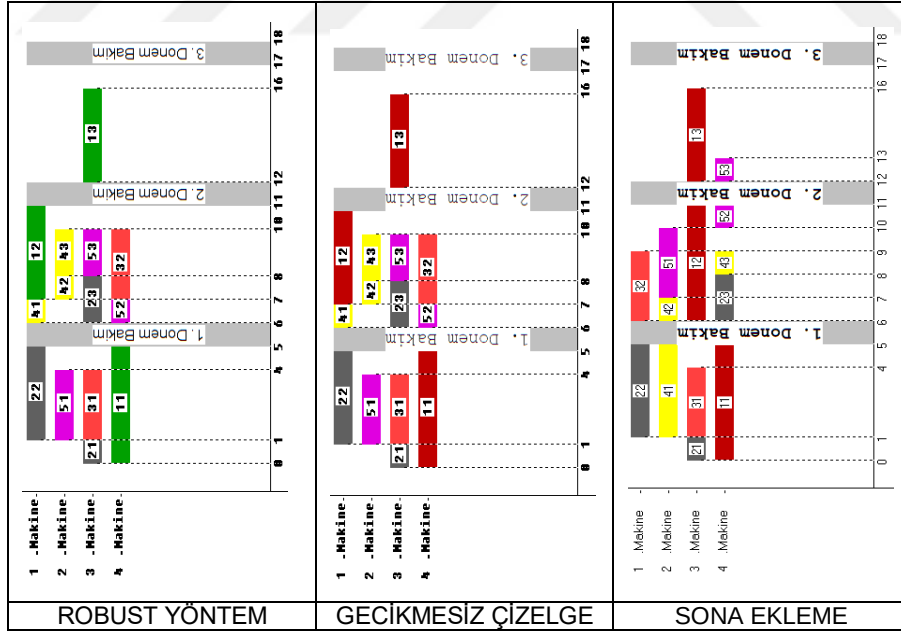
Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 19 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 2. Makinada doluluk oranı 0,32,

Sona ekleme yöntemde 0,21 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. ve 5. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir. Ayrıca başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. 2. makineye atanan operasyon sayısının az olmasından dolayı Robust yöntemde makine doluluk oranı düşmüştür, ancak diğer 4. işin son iki operasyonunda bu makineye atanmasından dolayı diğer yöntemlerden daha yüksek doluluk oranına sahiptir.

Bakım periyodunun 5 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

5 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

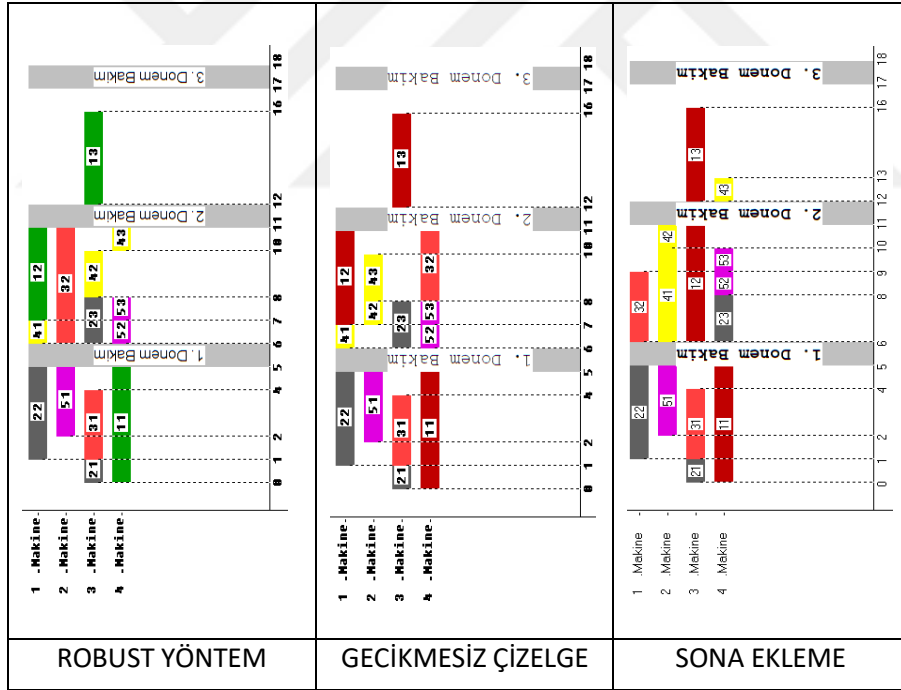
Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.20.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. makinede doluluk oranı 0,69, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,56 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. ve 5. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 1. Makede yapılan operasyonların Robust yöntemde bakımlar arasında daha düzenli dağılmasından dolayı bu makedeki doluluk oranı diğer yöntemlere göre yüksek çıkmıştır.

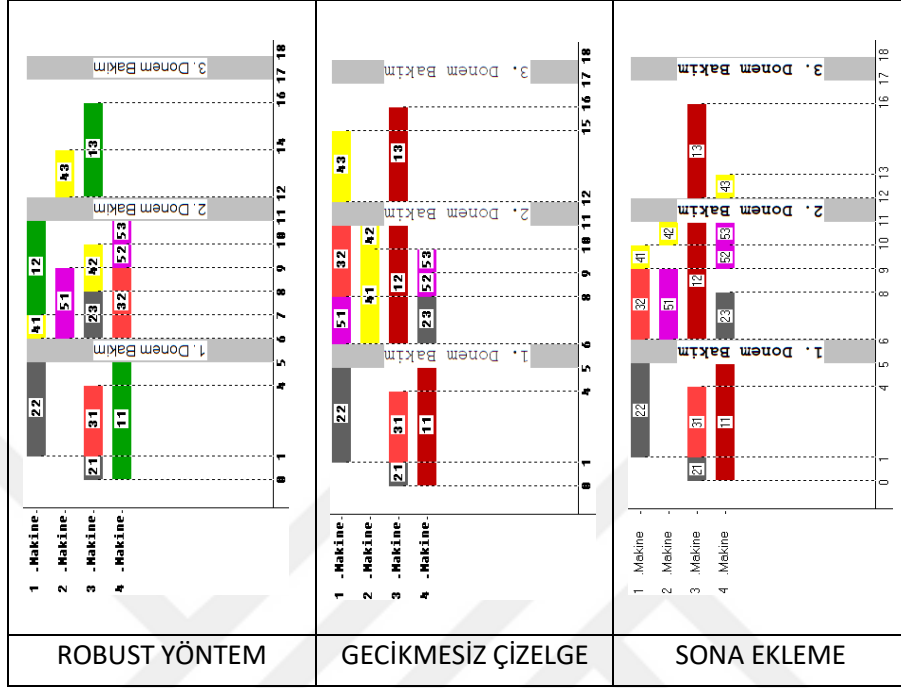
Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.21.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre Cmax değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. makinada doluluk oranı 0,69, Sona ekleme yönteminde 0,56 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Robust yönteminde 2. ve 3. makinede doluluk oranı sırasıyla 0,63, 0,88, Gecikmesiz Çizelge yönteminde ise sırasıyla 0,50 ve 0,75 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer yandan yeni gelen 4. işte Sona ekleme yöntemine göre 13. birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Yeni gelen 5. işte Sona ekleme yöntemine göre 10. birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 8. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 2. ve 3. makineye atanan operasyonların toplam süresinin daha fazla olmasından dolayı bu makinedeki doluluk oranı Robust yöntemde daha yüksektir.

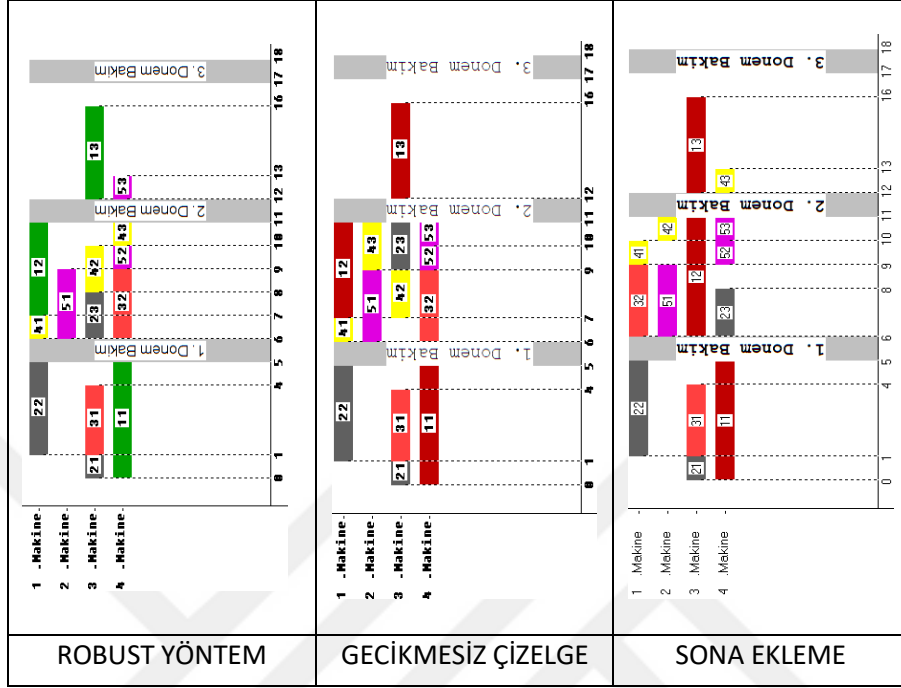
Yeni iş geliş zamanın 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 2. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,69 ve 0,44, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,63 ve 0,38 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 4. ve 5. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark yoktur. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 1. ve 2. makinedeki bakım periyodları arasında uygun atandığı için yüksek çıkmıştır.

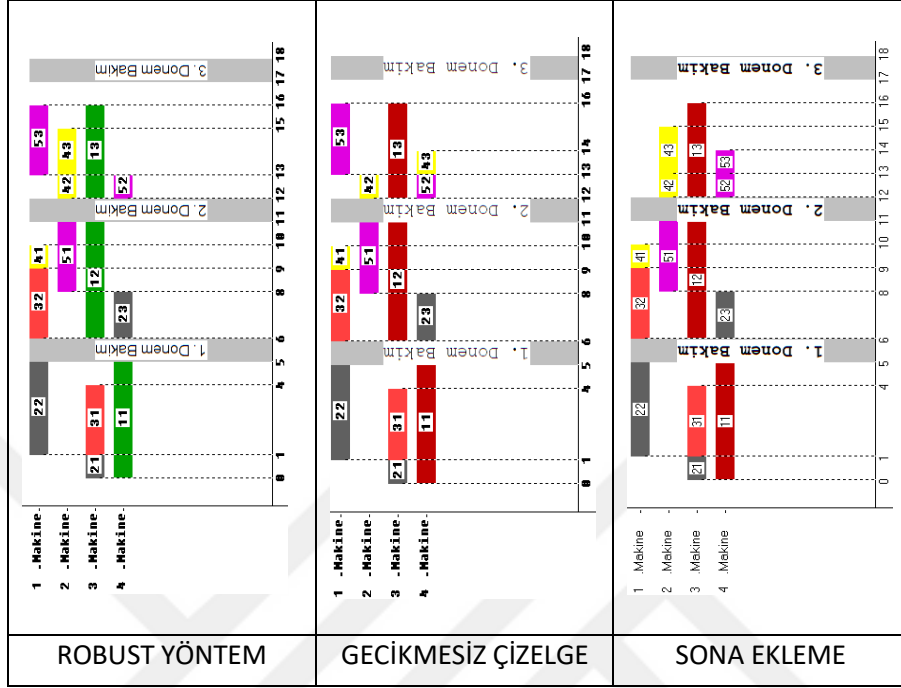
Yeni iş geliş zamanın 6 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.23.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =6 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 4. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,69 ve 0,81, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,63 ve 0,75 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer yandan yeni gelen 4. işte Sona ekleme yöntemine göre 13. birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Robust yöntemde doluluk oranı iş süreli parçalı olarak dağıtıldığından dolayı Sona ekleme yönteminden daha yüksek çıkmıştır. Ancak burada işler aynı sürede tamamlanmış ve gecikme yaşanmamıştır.

Yeni iş geliş zamanının 8 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



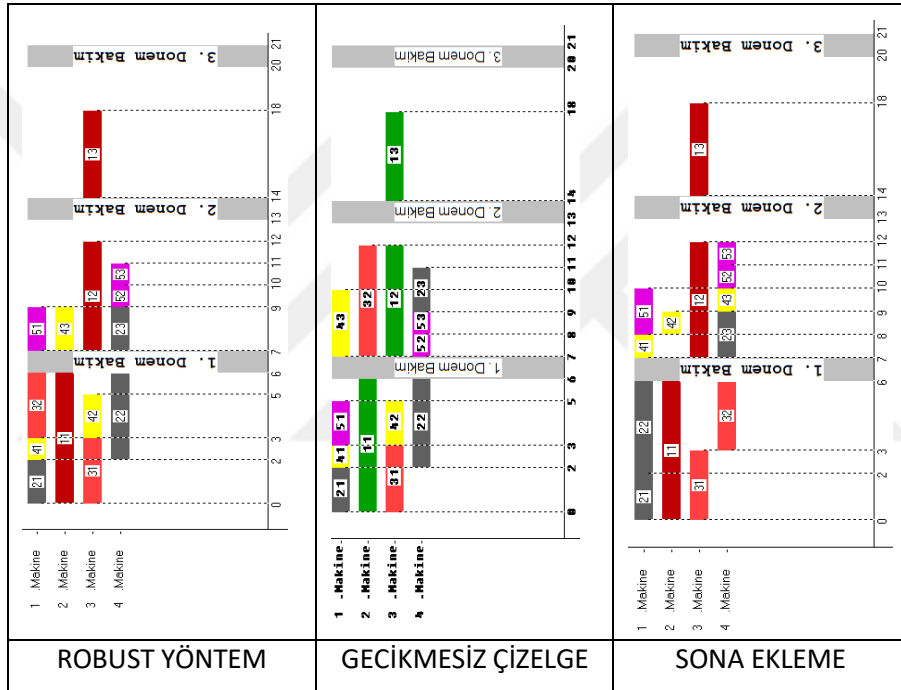
Şekil 4.24. İkinci veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. makinada doluluk oranı 0,81, Sona ekleme yönteminde 0,63 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Robust yönteminde 2. makinada doluluk oranı 0,50, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,38 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. ve 5. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark yoktur. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Robust yöntemde operasyonlar sıralı ve düzenli dağıldığından dolayı doluluk oranı yüksek çıkmıştır.

Bakım periyodunun 6 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

5 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.25.'te gösterilmiştir.

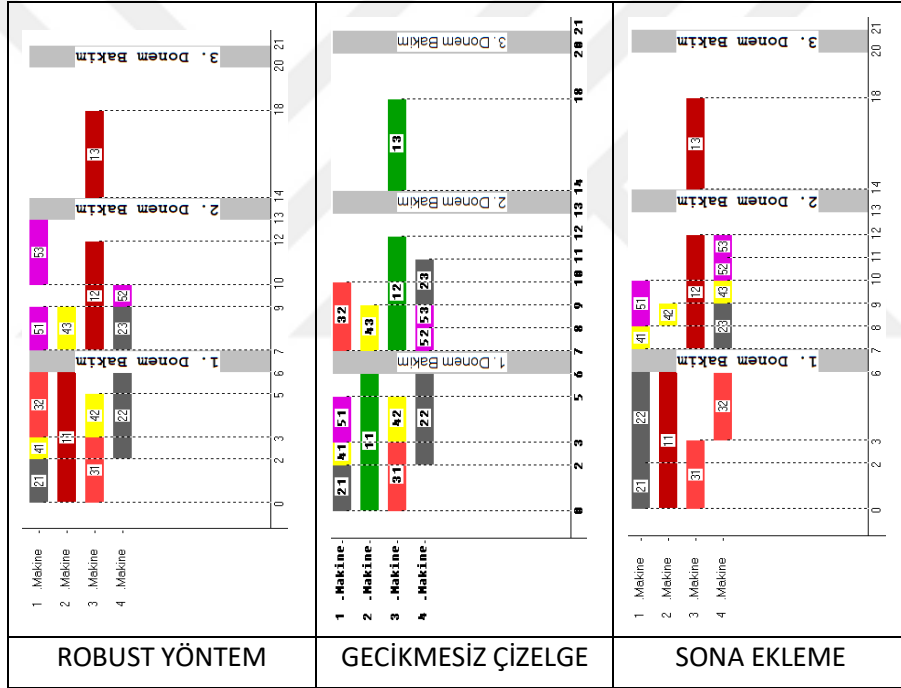


Şekil 4.25. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 2. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,56 ve 0,89, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,50 ve 0,78 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 4. İşte Sona ekleme yöntemine göre 10. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 9. Birim zamanında, 5. işte de Sona ekleme yöntemine

göre 12. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. Birim zamanında, daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Küçük parçalı operasyonlar Robust yöntemde ilk bakım periyodu içerisinde düzgün dağıtılmış, dolayısıyla bu işlerin zamanında bitirilmesini sağlamasından dolayı doluluk oranı diğer yöntemlere göre daha iyidir.

Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.26.'da gösterilmiştir.

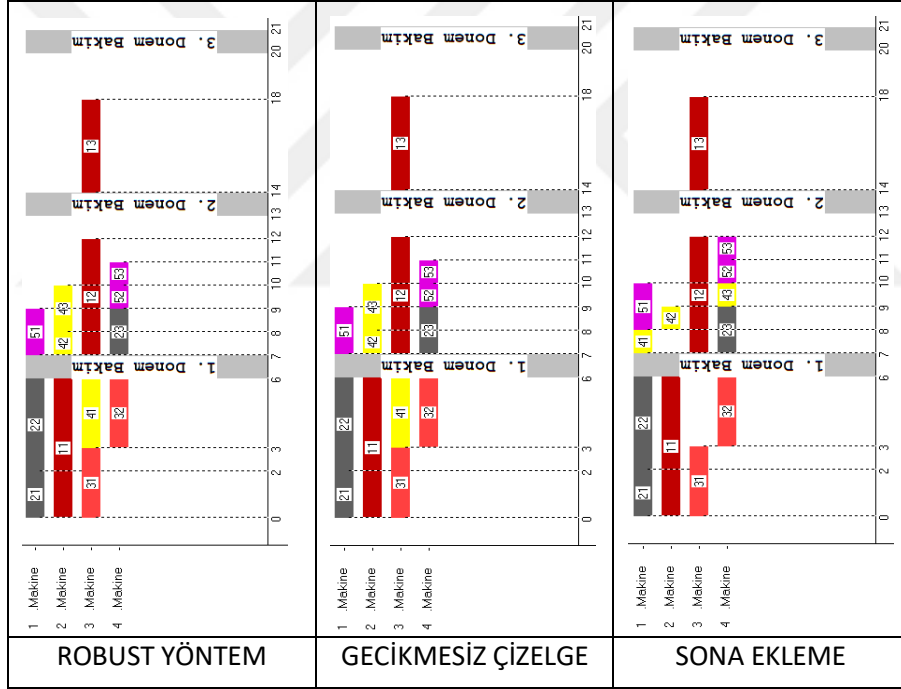


Şekil 4.26. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1., 2. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,83, 0,56 ve 0,89, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,61, 0,50 ve 0,78 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun

yanısıra yeni gelen 4. İşte Sona ekleme yöntemine göre 10. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 9. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Yeni gelen işler 1. ve 2. bakım periyodu boyunca Sona ekleme yöntemine göre daha sık atanmıştır. Ayrıca atandıkları makinelerdeki sürelerin yüksek olması Robust yöntemde doluluk oranının yüksek çıkmasını sağlamıştır.

Yeni iş geliş zamanının 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.27.'de gösterilmiştir.

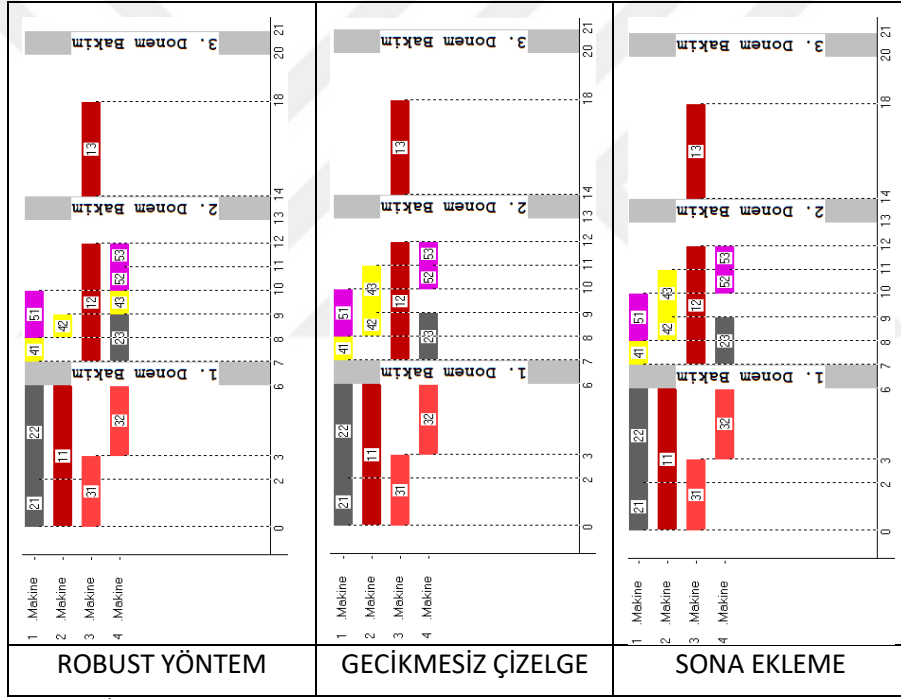


Şekil 4.27. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 2. ve 3. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,61 ve 0,94, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,50 ve 0,78

hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4. ve 5. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark yoktur. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Yeni gelen 4. işin 1. ve 3. operasyonu Robust yöntemde daha düzenli dağıldığı için 2. ve 3. makinelerin doluluk oranı Sona kelem yönteminden daha yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanın 7 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.28.'de gösterilmiştir.

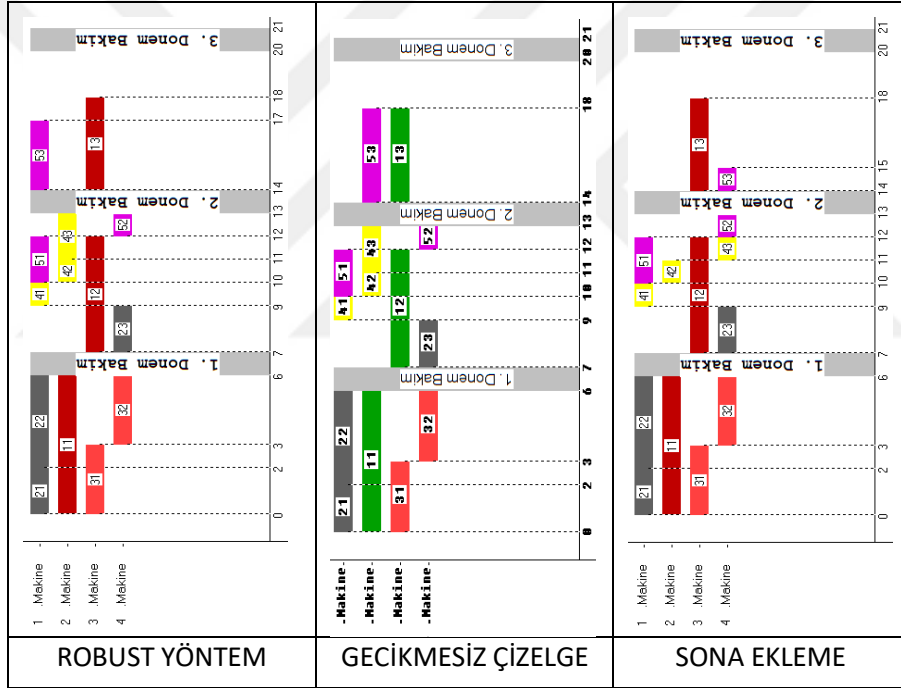


Şekil 4.28. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı 7 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 4. makinada doluluk oranı 0,56, Gecikmesiz Çizelge ve Sona ekleme yönteminlerinde 0,50 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 4.

İşte Sona ekleme ve Gecikmesiz Çizelge yöntemlerine göre 11. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 10. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Makine kapasitelerinin operasyon süreleri ile yüksek oranda dolmasından dolayı Robust yöntem diğer iki yönteme göre performansı yüksektir.

Yeni iş geliş zamanın 9 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.29.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. İkinci veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler

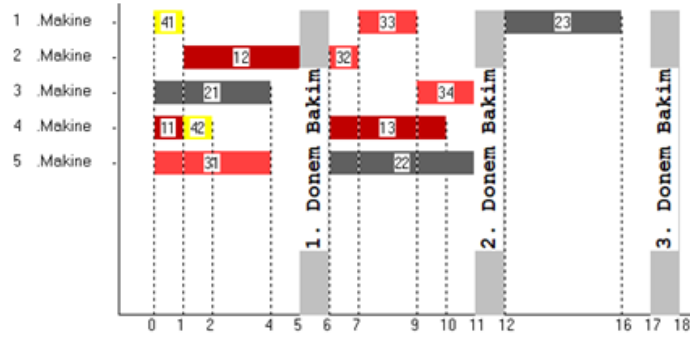
Buna göre Cmax değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 2. makinada doluluk oranı sırasıyla 0,83 ve 0,61, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,62 ve 0,50 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı

sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Yeni gelen işlerin süresi yüksek olan operasyonların makinelere düzgün dağılmasından dolayı Robust yöntemin doluluk oranı Sona ekleme yöntemine göre yüksek çıkmıştır.

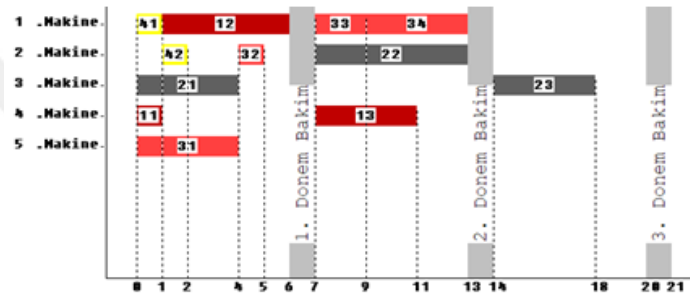
4.3. 4 İş - 5 Makine ve 12 Operasyon Veri Seti için Elde Edilen Sonuçlar

Üçüncü veri setinin bakım periyotlarına ait elde edilen başlangıç çizelgeleri Şekil 4.30.'da gösterilmiştir.

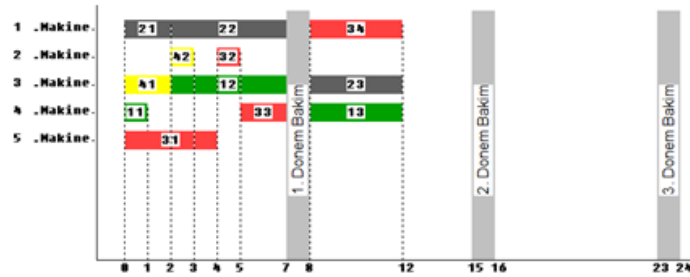




Bakım Periyodu = 5



Bakım Periyodu = 6



Bakım Periyodu = 7

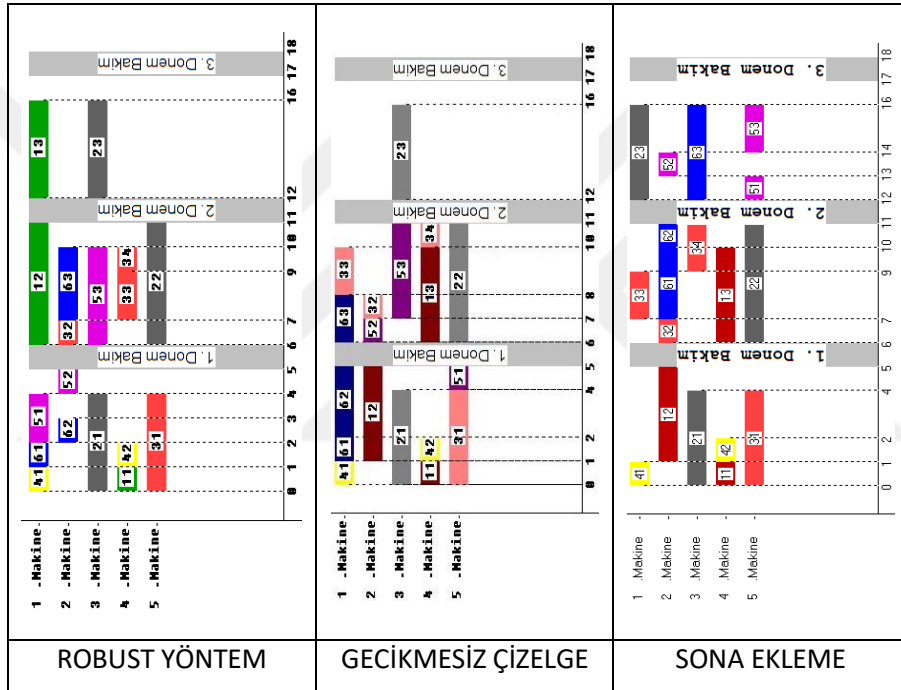
Şekil 4.30. Üçüncü veri seti için başlangıç çizelgeleri

Şekil 4.30'a göre operasyonların her bir bakım periyodunda farklı makinalara atanmasından dolayı bakım periyodu 6 iken C_{max} değeri 18'e çıkmış bakım periyodu 7 iken 12'ye düşmüştür.

Bakım periyodunun 5 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

6 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.31.'de gösterilmiştir.

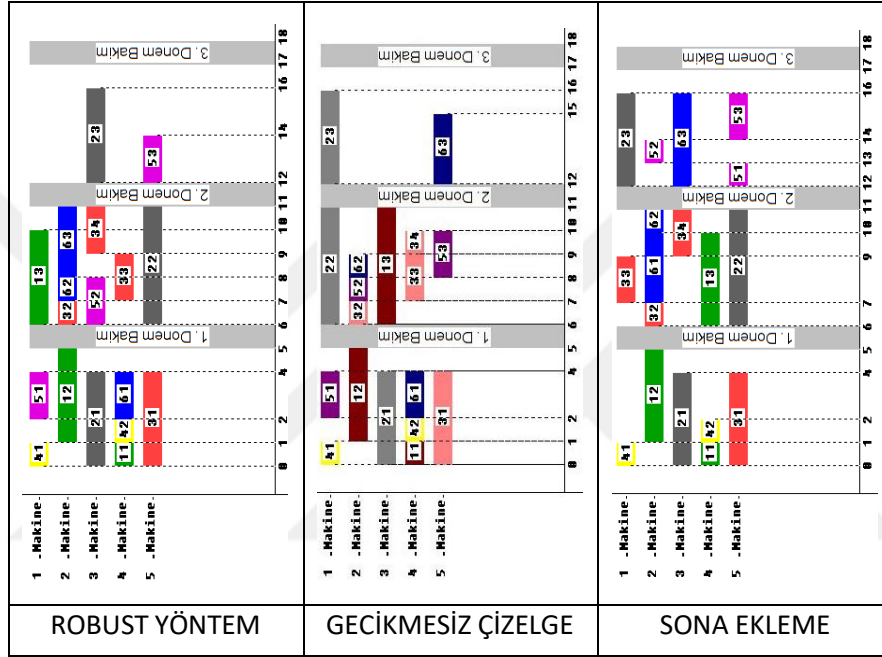


Şekil 4.31. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Operasyonlar daha düzenli dağılarak makina doluluk oranlarının Robust yöntemde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 1. ve 3. Makinada doluluk oranları sırasıyla 0,94, 0,88 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işler Sona ekleme yönteminde 16. birim zamanda teslim edilirken Robust yöntemde 10. birim zamanda daha erken olarak teslim edilmektedir. Ancak başlangıç

çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 1. işin Robust yöntemde 6 birim daha geç, 3. işin ise 1 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir.

Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.32.'de gösterilmiştir.

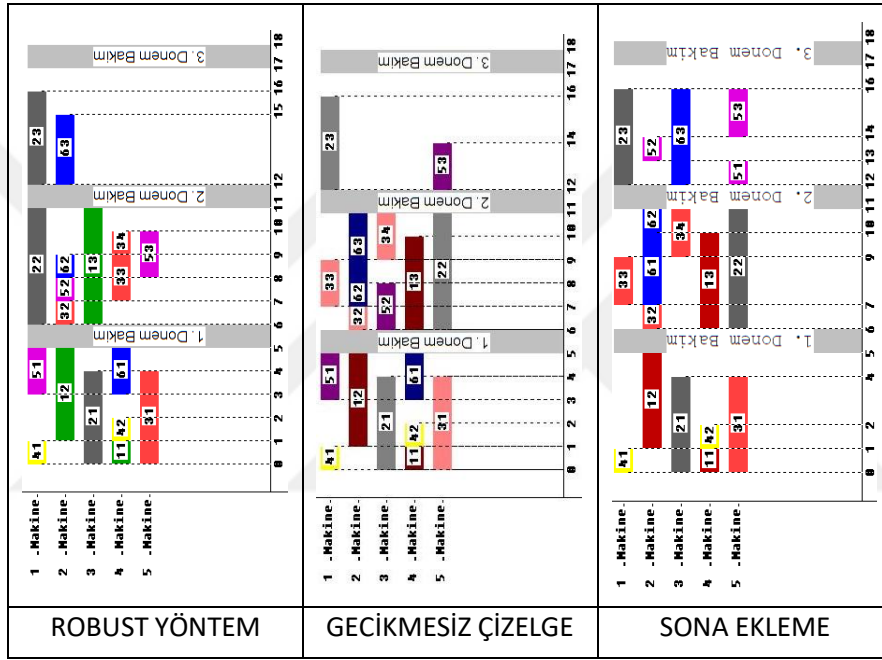


Şekil 4.32. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Operasyonlar daha düzenli dağılarak makina doluluk oranlarının genel olarak Gecikmesiz Çizelge yöntemine göre Robust yöntemde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 2., 3. ve 5. Makinada doluluk oranları sırasıyla 0,69, 0,88 ve 0,81 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işler sona ekleme yönteminde 16. birim zamanda teslim edilirken Robust yöntemde 5 iş 14. birim zamanda, 6. iş 11. birim zamanda daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre

teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. 2., 3. Ve 5. makinelerde operasyon süreleri düşük olanlar daha önce atandığı ve dengeli dağıldığı için Robust yöntemde doluluk oranı daha yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.33.'te gösterilmiştir.

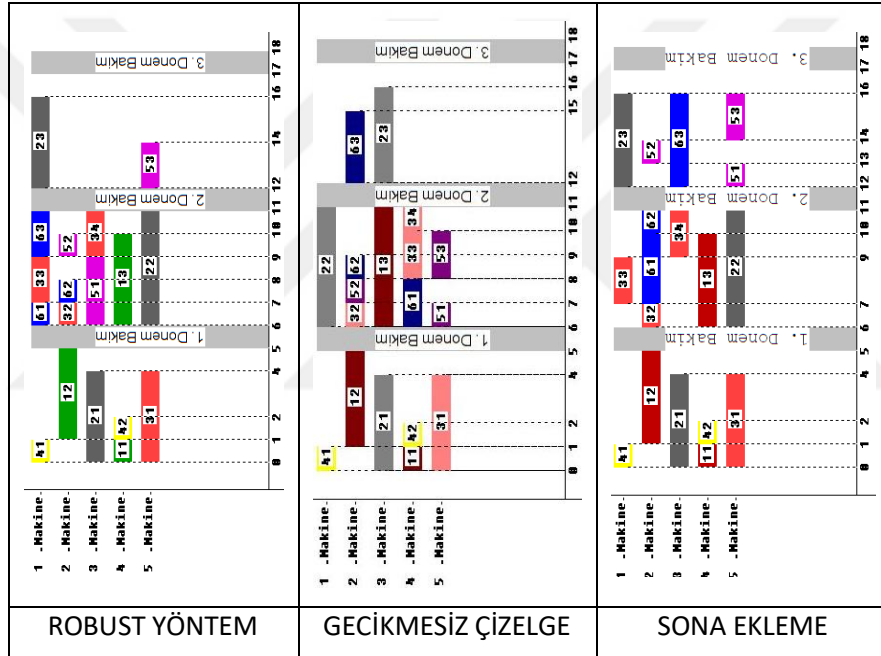


Şekil 4.33. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranlarının, Gecikmesiz Çizelge yöntemine göre Robust yöntemde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 1.,2. ve 3. Makinada doluluk oranları sırasıyla 0.88, 0.75 ve 0,69 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanısıra yeni gelen 5. İş Robust yöntemde 10. birim zamanda, hem Gecikmesiz Çizelge yöntemine hemde Sona ekleme yöntemine göre daha erken olarak teslim edilmiştir. 6. İşte ise sona ekleme yönteminde 16. birim zamanda teslim edilirken Robust yöntemde 15. birim

zamanda daha erken olarak teslim edilmektedir. Ancak başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 1. işin Robust yöntemde 1 birim daha geç, 3. işin ise 1 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işler Gecikmesiz Çizelge yöntemine göre daha erken atandığı için ilk üç makinenin doluluk oranı Robust yöntemde daha yüksektir.

Yeni iş geliş zamanının 6 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.34.'te gösterilmiştir.

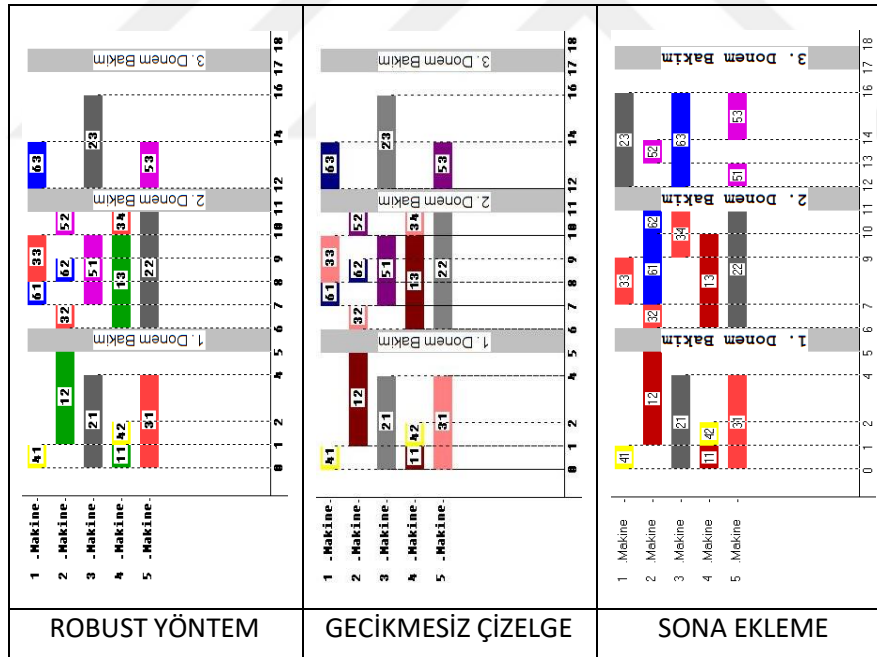


Şekil 4.34. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =6 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 1. Makinada doluluk oranı 0,75, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,50 ve Sona ekleme yönteminde 0,56 hesaplanmış olup her iki yöntemden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca 5. Makinada da Robust yöntemde doluluk oranı 0,81, Gecikmesiz Çizelge yönteminde

0,56 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. iş Sona ekleme yöntemine göre 16. birim zamanında teslim edilirken Robust yöntemde 14. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Buna ek olarak 6. iş Sona ekleme yöntemine göre 16. Birim zamanında, Gecikmesiz Çizelge yöntemine göre 15. birim zamanında teslim edilirken Robust yöntemde 11. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Yeni gelen 6. işin ilk iki operasyonu 1. Makineye atandığı için bu makinedeki doluluk oranı Robust yöntemde Gecikmesiz Çizelge yöntemine göre daha yüksek çıkmıştır.

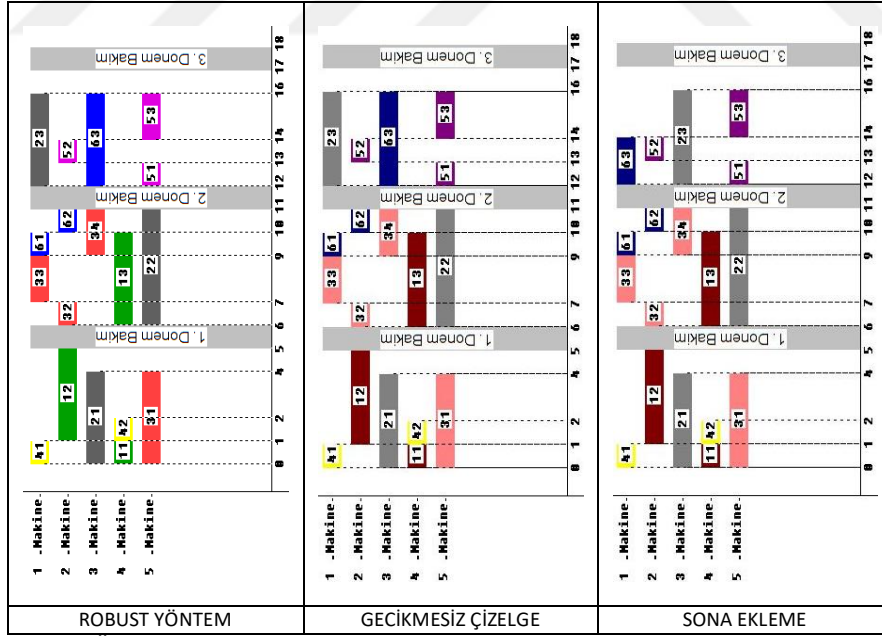
Yeni iş geliş zamanın 7 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.35.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =7 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 3. Makinada doluluk oranı 0,81, Sona ekleme yönteminde 0,75 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca 4. Makinada da Robust yöntemde doluluk oranı 0,56, Sona ekleme yönteminde 0,50 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde Sona ekleme yöntemine göre 16. Birim zamanında teslim edilirken Robust yöntemde 14. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. 2. Bakım periyodu boyunca yeni gelen işlerin operasyonu ile birlikte mevcut işlerin operasyonları daha dengeli dağıldığı için 3. ve 4. makinelerin Robust yöntemine göre doluluk oranları Sona ekleme yöntemine göre daha yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 9 olduğu durum için Robust, C_{max} , Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.36.'da gösterilmiştir.



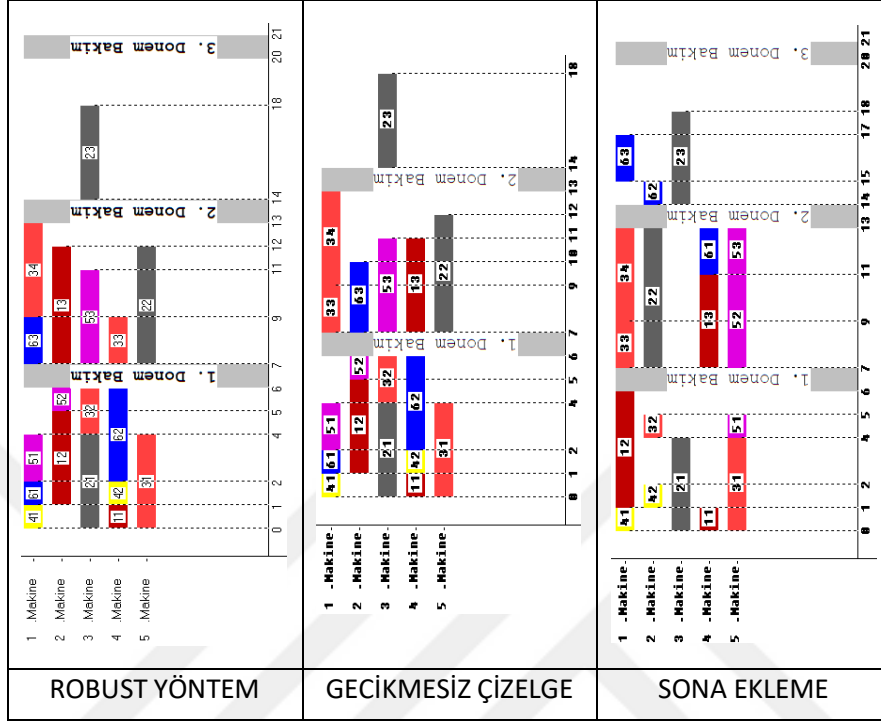
Şekil 4.36. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =5 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 16 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yöntemde 1. Makinada doluluk oranı 0,63, Sona ekleme yönteminde 0,50 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Yeni gelen 5. işin sonuncu operasyonunun süresi, yüksek olan ilk makineye atanmasından dolayı Robust yöntede doluluk oranı Sona ekleme yöntemine göre daha yüksektir.

Bakım periyodunun 6 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

6 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

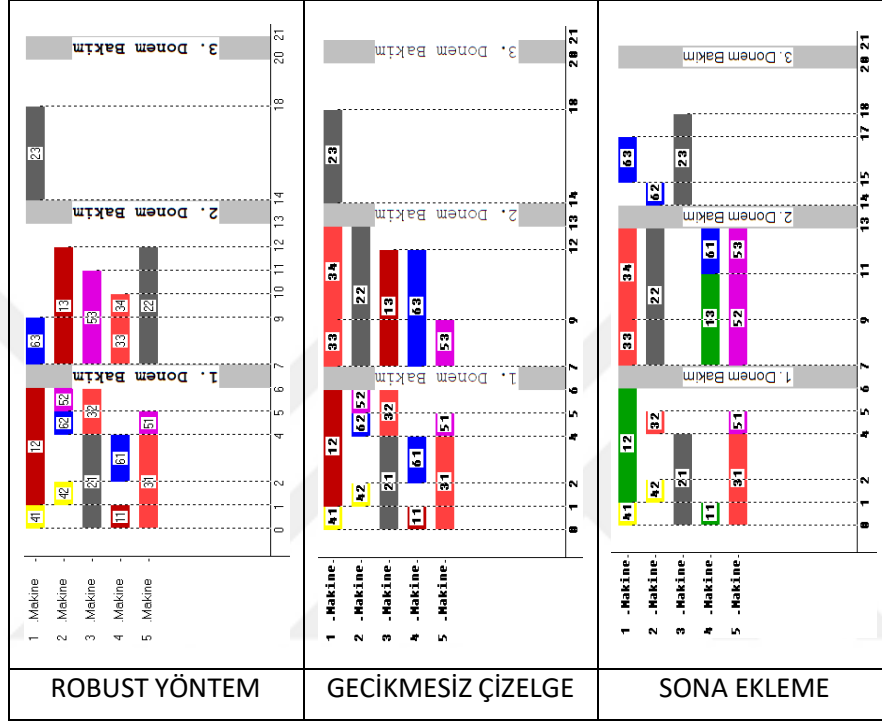
Yeni iş geliş zamanın 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.37.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde sırasıyla 2., 3. Ve 4. Makinada doluluk oranı 0,67, 0,89 ve 0,56, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,61, 0,56 ve 0,50 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde Sona ekleme yöntemine göre 13. ve 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. birim zamanda ve 9. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında genel olarak herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Düşük süreli operasyonlar ilk bakım periyodunda dengeli dağıldığı için Robust yönteminin doluluk oranı Sona ekleme yöntemine göre yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.38.'de gösterilmiştir.

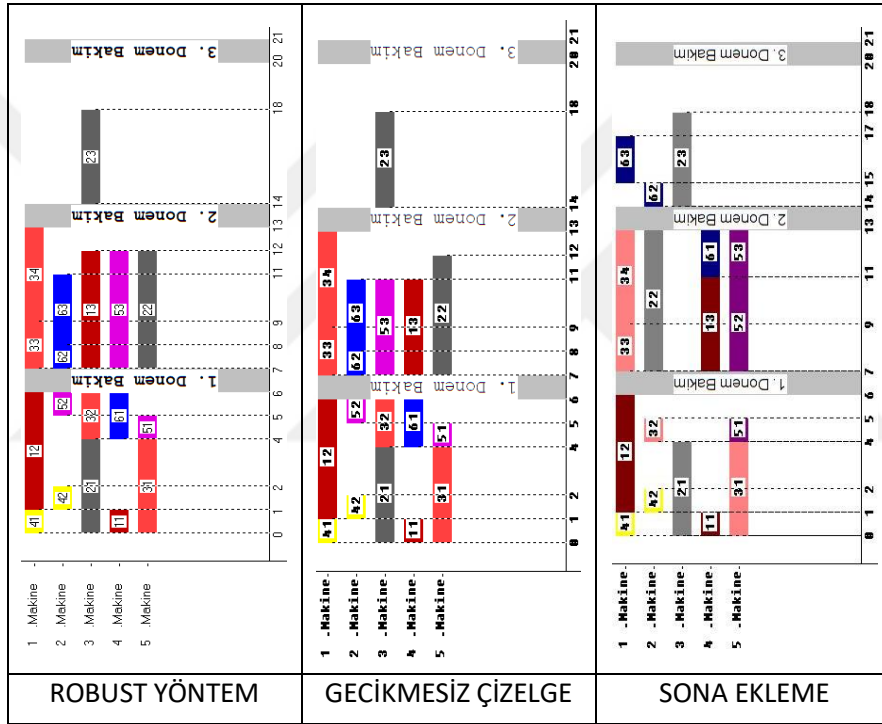


Şekil 4.38. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. makinada doluluk oranı 0,67, Sona ekleme yönteminde 0,56 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Robust yönteminde 5. makinada doluluk oranı 0,67, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,50 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. İşte Sona ekleme yöntemine göre 13. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Yeni gelen 6. işte de Sona ekleme yöntemine göre 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 9. Birim zamanında daha

erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde 3 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işlerin operasyonları 3. ve 5. makinede daha erken atandığı için Robust yöntemde bu makinelerde doluluk oranları yüksek çıkmıştır

Yeni iş geliş zamanının 4 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.39.'da gösterilmiştir.

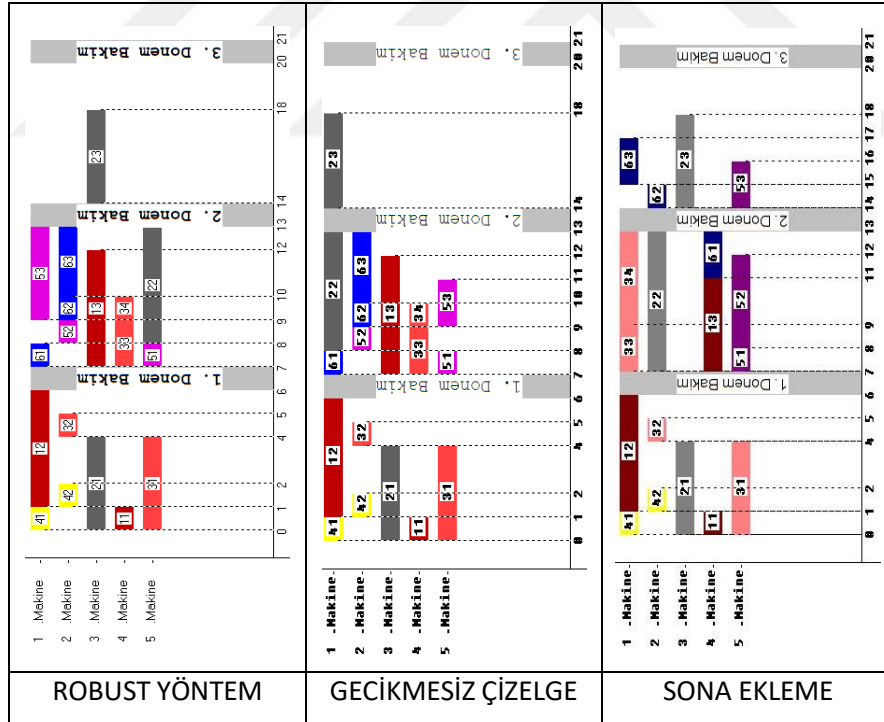


Şekil 4.39. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. Makinada doluluk oranları 0,94 iken, Gecikmesiz Çizelge ve Sona ekleme yöntemlerinde bu oranlar 0,89 ve 0,56 olup Robust yöntemi daha yüksek hesaplanmıştır. Ayrıca Robust yönteminde 4. Makinada doluluk oranları 0,56 iken, Gecikmesiz Çizelge ve Sona ekleme

yöntemlerinde bu oranlar 0,50 ve 0,50 olup Robust yöntemi daha yüksek hesaplanmıştır. Bunun yanısıra yeni gelen 5. işte Sona ekleme yöntemine göre 13. birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 12. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Yeni gelen 6. işte de Sona ekleme yöntemine göre 17. birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 11. birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında genel olarak herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Mevcut işlerin operasyonları 2. bakım periyodunda daha düzenli dağıldığı için 3. makedeki doluluk oranı Robust yöntemde daha yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 7 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.40.'ta gösterilmiştir.

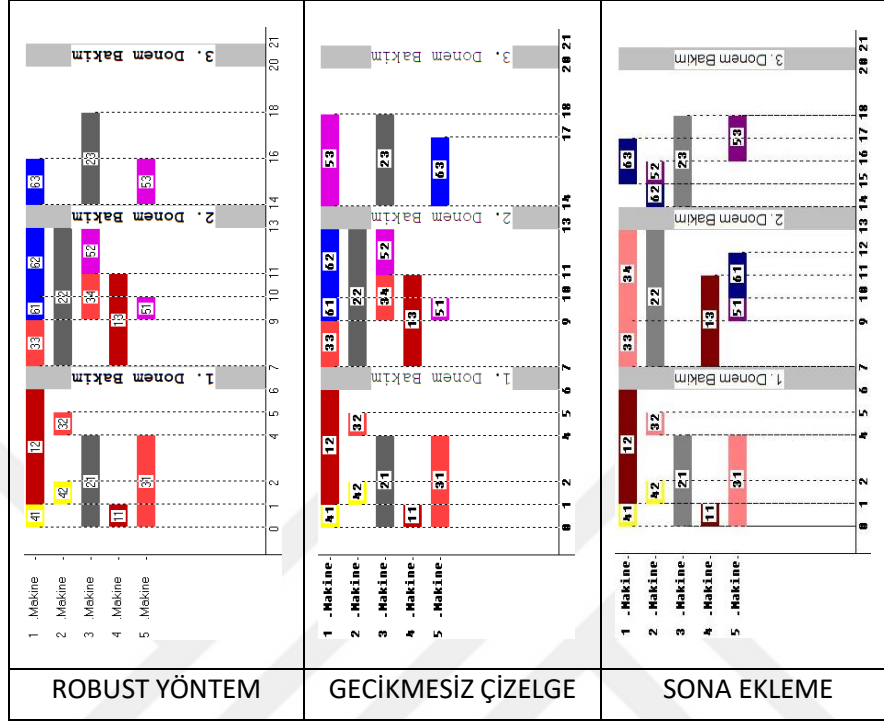


Şekil 4.40. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =7 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. makinada doluluk oranı 0,83, Gecikmesiz Çizelge yönteminde ve Sona ekleme yönteminde 0,61 ve 0,56 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Robust yönteminde 5. makinada doluluk oranı 0,67, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,50 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. işte Sona ekleme yöntemine göre 16. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 13. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Yeni gelen 6. işte de Sona ekleme yöntemine göre 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 13. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde 3 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işlerle birlikte mevcut işlerin ikinci bakım periyodunda daha sık ve dengeli dağılmasından dolayı Robust yöntemin doluluk oranı diğer yöntemlere göre yüksek çıkmıştır.

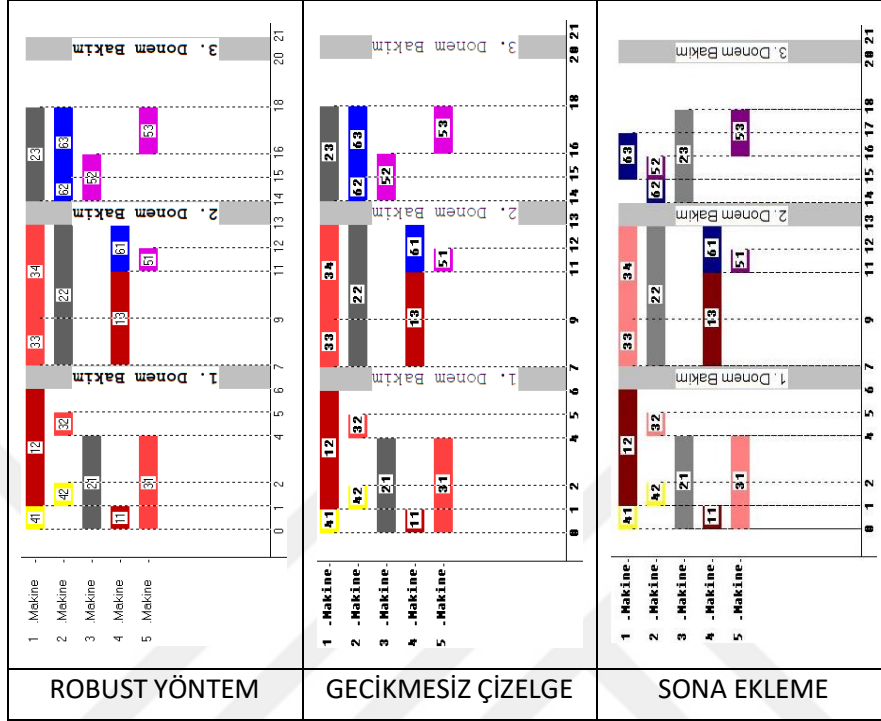
Yeni iş geliş zamanının 9 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.41.'de gösterilmiştir.

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. makinada doluluk oranı 0,78, Sona ekleme yönteminde 0,56 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. işte Sona ekleme yöntemine göre 18. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 16. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bener şekilde Yeni gelen 6. işte de Sona ekleme yöntemine göre 17. Birim zamanında teslim edilirken, Robust yöntemde 16. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde 2 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. 3. işin son operasyonu ve yeni gelen işlerin operasyonlarının 2. Bakım aralığında daha dzenli dağılmasından sebebiyle Robust yöntemde doluluk oranı yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.41. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =9 iken elde edilen çizelgeler

Yeni iş geliş zamanının 11 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.42.'de gösterilmiştir.



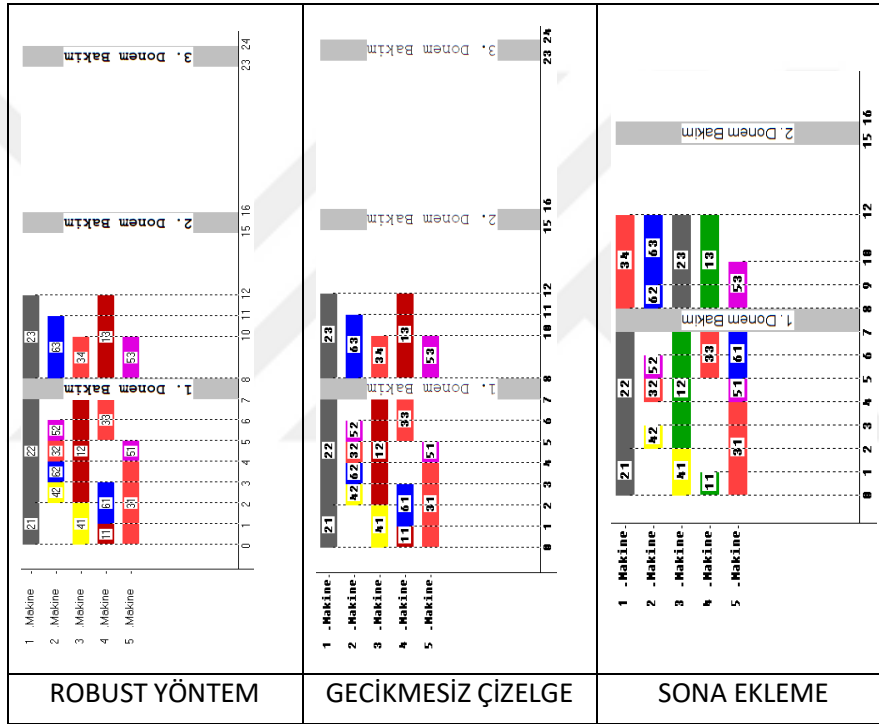
Şekil 4.42. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =6 ve Yeni iş geliş zamanı =11 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 18 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. makinada doluluk oranı 1,0, Sona ekleme yönteminde 0,89 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Robust yönteminde 2. makinada doluluk oranı 0,78, Sona ekleme yönteminde 0,67 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir. Bunun yanı sıra başlangıç çizelgesindeki mevcut işlerin Robust yöntemine göre teslim zamanlarında genel olarak herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. 2. İşin son operasyonu ile yeni gelen 6. işin son iki operasyonu 3. Bakım periyodunda Robust yöntemde dengeli dağıldığı için bu makinelerin doluluk oranı daha yüksektir.

Bakım periyodunun 7 birim olduğu durum için elde edilen çizelgeler incelenecek olursa;

6 farklı yeni iş geliş zamanı 3 farklı yöntem için incelenmiştir. Yapılan incelemede;

Yeni iş geliş zamanının 1 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.43.'te gösterilmiştir.

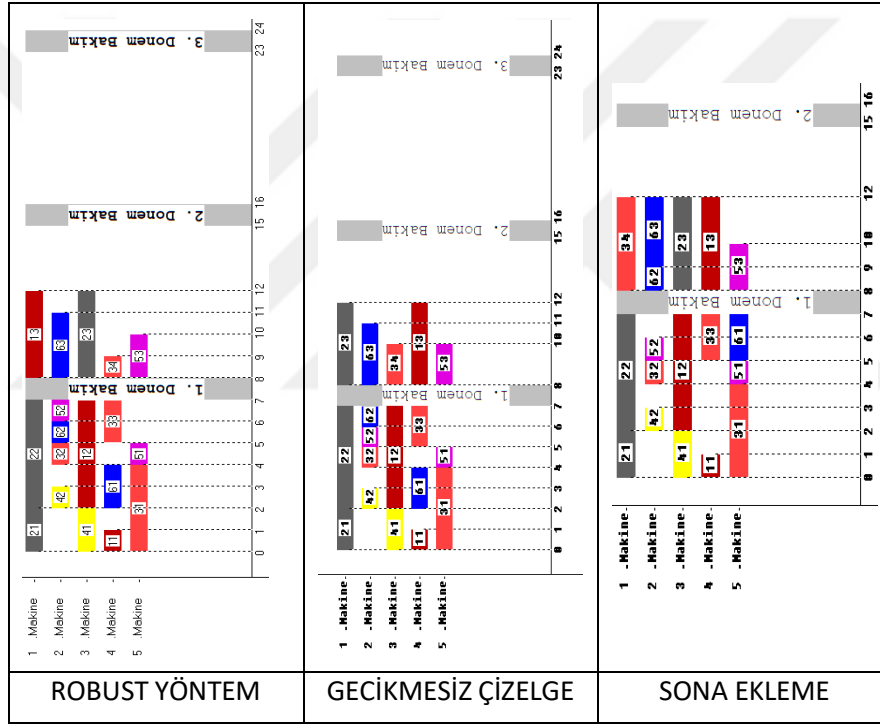


Şekil 4.43. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =1 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 12 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 4 Makinada doluluk oranı 0,83, Sona ekleme yönteminde 0,67 hesaplanmış olup daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. işte teslim zamanında yöntemler arasında fark olmadığı, ancak 6. İşin Sona ekleme yöntemine göre 12. Birim zamanında teslim

edilirken, Robust yöntemde 11. Birim zamanında daha erken olarak teslim edilmektedir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde 2 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen 6. ve 3. işler 2. bakım periyodunda dengeli dağılmasından dolayı Robust yöntemde daha erken teslim edilmiştir.

Yeni iş geliş zamanının 2 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.44.'te gösterilmiştir.

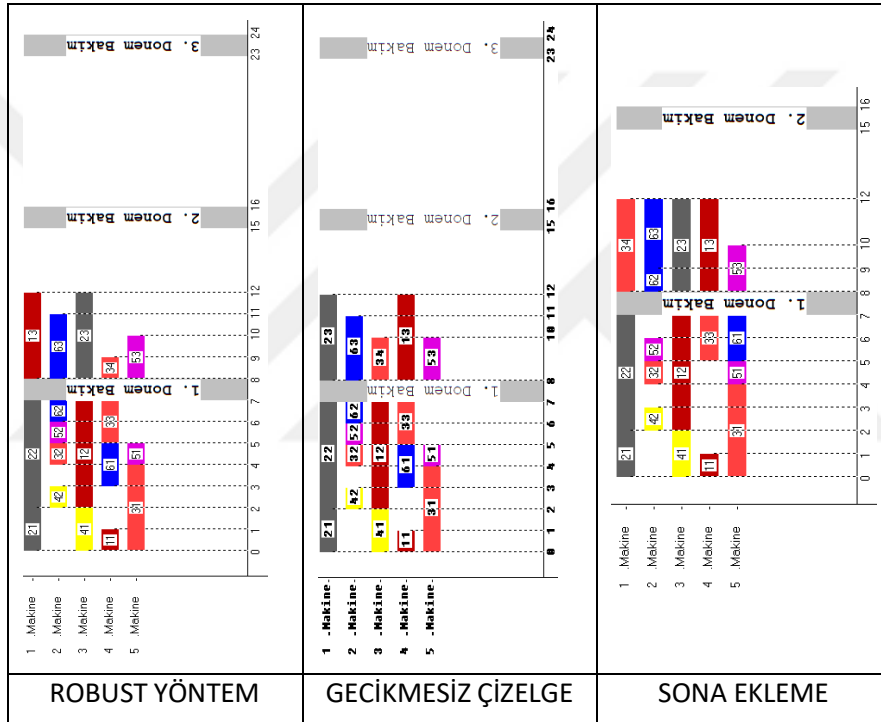


Şekil 4.44. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =2 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 12 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. Makinada doluluk oranı 1,0, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,83 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde işin bitiş

zamanları arasında fark elde edilememiştir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde, Sona ekleme yöntemine göre 1 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işler ilk bakım periyodu içerisinde 2. birimde dengeli dağıldığı için Robust yöntemde doluluk oranı yüksek çıkmıştır.

Yeni iş geliş zamanının 3 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.45.'te gösterilmiştir.

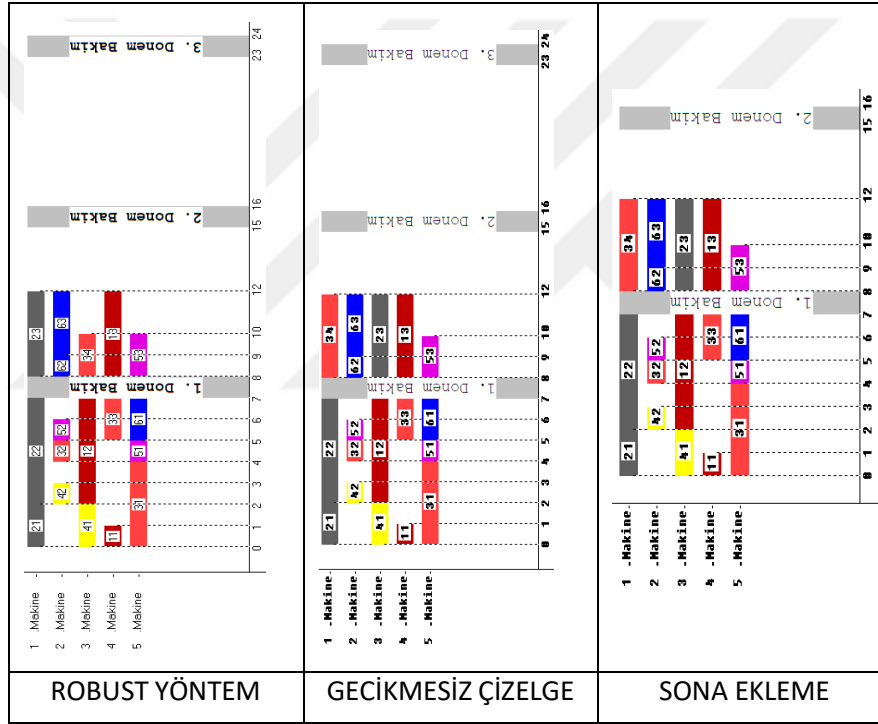


Şekil 4.45. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =3 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 12 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 3. Makinada doluluk oranı 1,0, Gecikmesiz Çizelge yönteminde 0,83 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde

edilememiştir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde, Sona ekleme yöntemine göre 1 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işler 1. bakım periyodunda daha erken atandığı için bu bakım periyodunda işlerin daha dengeli dağılmasına neden olmuş ve 3. İşin daha erken teslim edilmesini sağlamıştır.

Yeni iş geliş zamanının 4 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.46.'da gösterilmiştir.

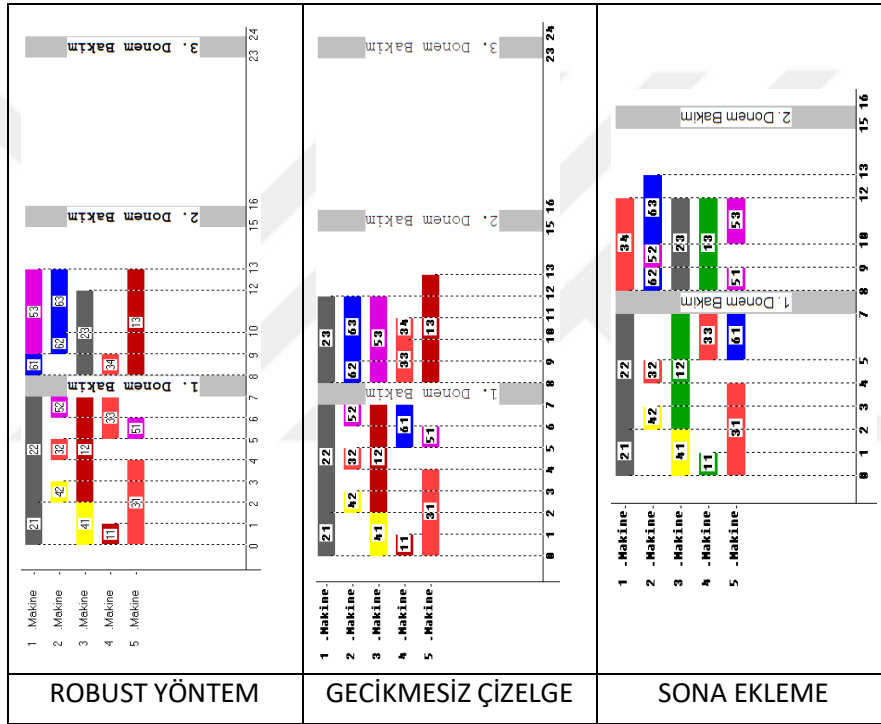


Şekil 4.46. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =4 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 12 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde Robust yönteminde diğer yöntemler arasında fark olmadığı görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. ve 6. işlerde işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir. Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim

zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde, Sona ekleme yöntemine göre 2 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Yeni gelen işler 1. bakım periyodunda daha erken atandığı için bu bakım periyodunda işlerin daha dengeli dağılmasına neden olmuş ve 3. İşin daha erken teslim edilmesini sağlamıştır.

Yeni iş geliş zamanının 5 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.47’de gösterilmiştir.

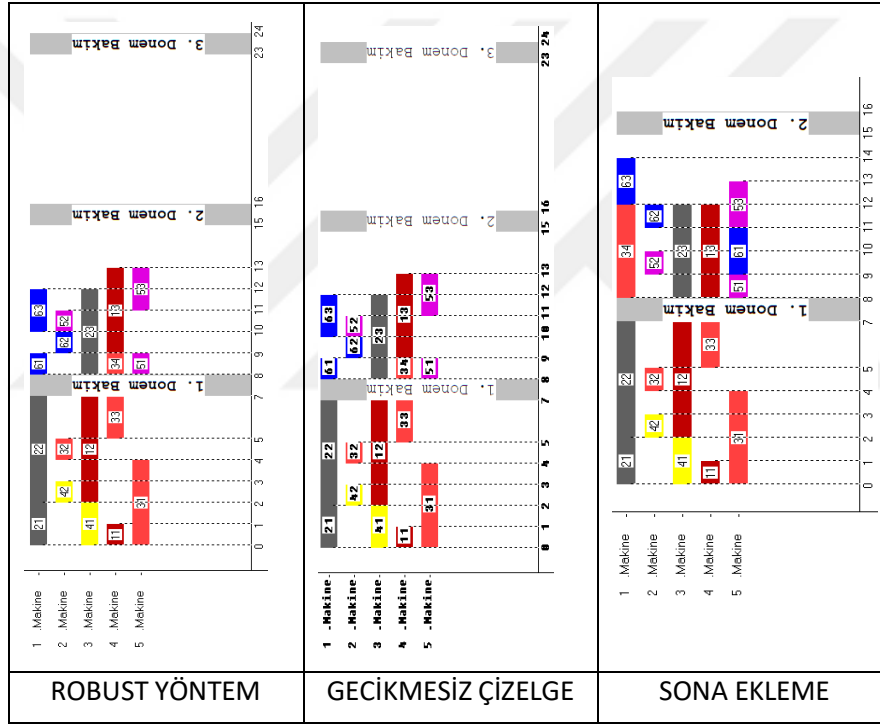


Şekil 4.47. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =5 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri her üç yöntem için aynıdır ve 13 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde 1. ve 5. Makinada doluluk oranı sırasıyla 1,0 ve 0,85, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,92 ve 0,77 hesaplanmış olup Robust yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yeni gelen 6. işte işin bitiş zamanları arasında fark elde edilememiştir.

Bunun yanında başlangıç çizelgesindeki teslim zamanlarına göre 3. işin Robust yöntemde, Sona ekleme yöntemine göre 2 birim daha erken teslim edildiği görülmektedir. Parçalı işler sona ekleme yönteminde 2. periyottan sonra çizelgelendiği için Robust yöntem burada diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç vermiştir.

Yeni iş geliş zamanının 8 olduğu durum için Robust, Gecikmesiz Çizelge ve Sona Ekleme yöntemlerine göre elde edilen çizelgeler Şekil 4.48.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.48. Üçüncü veri seti için Bakım periyodu =7 ve Yeni iş geliş zamanı =8 iken elde edilen çizelgeler

Buna göre C_{max} değerleri Robust ve Gecikmesiz Çizelge Yöntemi için 13 birim, Son eklemede 14 birimdir. Makina doluluk oranları incelendiğinde, Robust yönteminde sırasıyla 2., 3. ve 4. Makinada doluluk oranı 0,38, 0,92 ve 0,69, Sona ekleme yönteminde sırasıyla 0,36, 0,86 ve 0,57 hesaplanmış olup Robust

yönteminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra yeni gelen 5. işte işin bitiş zamanları arasında fark olmadığı, 6 işte Robust yöntemi Sone ekleme yöntemine göre 2 birim erken bitmiştir. Yeni gelen işler Robust yöntemde 2. Bakım periyodunda daha dengeli atanmıştır. 6. İşin son operasyonunun Sona ekleme yönteminde 1. Makineye atanması nedeniyle C_{max} değeri daha yüksek çıkmıştır.

4.4. Elde Edilen Bulguların Genel Değerlendirmesi

- ✓ Elde edilen sonuçlarda üç yöntemin son işlerin tamamlanma zamanı olan C_{max} değeri ve bilgisayar zamanı açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bilgisayar zamanı açısından bakıldığında; 45 problem senaryosunun Robust yöntemde 16 senaryo için, Gecikmesiz çizelge yönteminde 12 senaryo için optimum çizelge elde edilmiştir. 3 iş 4 makine ve 7 operasyondan oluşan veri setinde bakım periyodu 4 birim zaman olduğunda yeni işlerin 2. Zaman biriminde çizelgeye dahil olması durumunda robust yönteminde optimum çizelge Gecikmesiz çizelge yöntemine göre daha kısa sürede elde edilmiştir. 3 iş 4 makine ve 8 operasyondan oluşan veri setinde bakım periyodunun 5 birim olması durumunda yeni iş geliş zamanı 8 zaman birimi olarak ele alındığında robust yöntemde 4515.37 bilgisayar zamanında optimum sonuç elde edilmiştir. 4 iş 5 makine 12 operasyon veri setinde bakım periyodunun 5 birim olması durumunda yeni iş geliş zamanı 9 birim iken 3010.89 sn de optimum çizelge elde edilmiştir. Yine 4 iş 5 makine 12 operasyon veri setinde bakım periyodunun 7 birim olması durumunda yeni iş geliş zamanı 3 birim iken 1764.06 sn de optimum çizelge elde edilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre robust çizelgeler oluşturmak diğer yöntemlere göre daha fazla bilgisayar zamanı gerektirmektedir.

Tüm işlerin tamamlanma zamanı açısından bakıldığında; 3 iş 4 makine ve 7 operasyondan oluşan veri setinde bakım periyodu 5 birim zaman olduğunda 3. Zaman biriminde yeni işlerin gelmesi durumunda tüm operasyonların tamamlanma zamanı Robust yönteminde Gecikmesiz çizelgeye göre bir birim daha kısadır ($C_{max}=9$). 3 iş 4 makine ve 8 operasyondan oluşan veri setinde bakım periyodunun 4 birim olması durumunda yeni iş geliş zamanının 5 olduğu durumda robust çizelgeleme yöntemi diğer iki yöntemden daha iyi sonuç vermiş ve tüm işler 14 birim zamanda tamamlanmıştır. 3 iş 4 makine ve 8 operasyondan oluşan veri setinde bakım periyodunun 4 birim olması durumunda yeni iş geliş zamanı 2 iken tüm işler Gecikmesiz çizelge ve robust yönteminde sona ekleme yöntemine göre 3 birim daha erken bitmektedir. (EK1)

- ✓ Bunun yanı sıra her bir veri seti için başlangıç çizelgesinde yer alan mevcut işlerin başlangıç çizelgelerindeki bitiş zamanları teslim süresi olarak ele alınmıştır. İlk veri seti için başlangıç çizelgesinde yer alan mevcut işler birinci bakım döneminde Robust ve Gecikmesiz çizelge yönteminde genel olarak aynı zamanlarda teslim edilmektedir. İkinci bakım döneminde 2. iş yeni iş geliş zamanı nın 1 birim olması durumunda Gecikmesiz çizelge yöntemine göre 2 zaman birimi daha erken teslim edilmektedir ancak yine Gecikmesiz çizelge yönteminde 3. Bakım periyodunda 3. iş yeni iş geliş zamanı nın 1 birim olması durumunda 3 zaman birimi daha geç olarak teslim edilmektedir. İkinci veri seti için başlangıç çizelgesinde yer alan mevcut işler birinci bakım döneminde Robust ve Gecikmesiz çizelge yönteminde genel olarak aynı zamanlarda teslim edilmektedir. İkinci bakım döneminde 2. iş yeni iş geliş zamanı nın 1 birim olması durumunda Gecikmesiz çizelge yöntemine göre 2 zaman birimi daha erken teslim edilmektedir. Gecikmesiz çizelge yönteminde 3. Bakım periyodunda 3. iş yeni iş geliş

zamanı nın 1 birim olması durumunda 3 zaman birimi daha geç olarak teslim edilmektedir. (EK2)

- ✓ Yeni gelen işlerin bitiş zamanları her bir veri seti ve yeniden çizelgeleme noktası için incelenmiştir. Bu çizelgelere göre, yeni gelen işler, genel olarak robust yönteminde ve Gecikmesiz çizelge yönteminde sona ekleme yöntemine göre daha erken sürede bitmektedir. (EK3)
- ✓ Toplam 45 problem senaryosu üzerinde elde edilen sonuçlara göre, Robust Çizelgede ortalama makine doluluk oranı % 72 olup diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir. (EK4)



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Çalışmanın Özeti

Yapılan bu çalışmada iki adet yeni iş gelişinin yer aldığı bakım kısıtları altında dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi 45 farklı problem senaryosu ele alınarak 3 farklı veri setinde değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmelerde ele alınan durumlar değişikçe işlerin çizelgelerinin istenen performans değerlerini sağlaması için değiştiği bazı durumlarda ise aynı kaldığı görülmüştür.

Genel olarak Robust yöntemi operasyonların daha düzgün dağılarak makine doluluk oranlarını arttığı gözlemlenmiştir. Robust yöntem için 3 iş 4 makine 7 operasyon veri seti ve 3 iş 4 makine 8 operasyon veri seti için makinelerin ortalama doluluk oranları sırasıyla % 73, % 72.2 değerleri ile diğer yöntemlerden daha yüksek çıkmıştır. 4 iş 5 makine 12 operasyon veri seti için Robust yöntem diğer yöntemlerle yaklaşık % 70 oranı ile aynı makine doluluk oranına sahiptir.

Bununla beraber çizelgelerde işler için olası gecikmelere karşı daha esnek olunmuştur. Makineler için daha dengeli ve düzenli çizelgeler oluşturulmuştur. Ayrıca bazı bakım periyotları ve yeni iş geliş zamanlarında Robust yöntemle ait çizelgelerde yeni gelen işler Gecikmesiz yöntem ve Sona ekleme yöntemi ile aynı şekilde atanmıştır. Durumların tamamında Robust yöntem en kötü olasılıkla Sona ekleme yöntemi ile aynı sonuçları vermiştir.

5.2. Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada ele alınan dinamik esnek atölye tipi çizelgeleme problemi iki ayrı model kullanılarak 3 ayrı veri seti üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yeni iş gelişleri olduğu ve belirli periyotlarda makinelerin bakıma gittiği durumlarda esnek atölye tipi üretim sistemlerinde kararlı çizelgeler oluşturmak oldukça fazla süre almaktadır.

Yapılan çalışmanın devamı olarak aşağıdaki durumların dikkate alındığı çalışmalar gelecekte ele alınabilir;

- Ele alınan problem tipi için farklı bakım stratejilerinin ele alındığı çalışmalar,
- Ele alınan problem tipi için farklı yeniden çizelgeleme stratejilerinin ele alındığı çalışmalar,
- Ele alınan problem için farklı kararlılık ölçütlerinin dikkate alındığı çalışmalar,
- Kısmi esnek atölye tipi dinamik, robust ve farklı bakımın dikkate alındığı çalışmalar,
- Farklı sıralama kurallarının dikkate alındığı dinamik, robust ve bakımın yer aldığı çalışmalar,
- Operasyonların yarıda kesilebildiği dinamik, robust ve bakımın yer aldığı çalışmalar,
- Farklı sezgisel yöntemlerin veya hibrit yöntemlerin uygulandığı dinamik robust ve bakımın yer aldığı çalışmalar,
- Operasyon sürelerinin veya bakım sürelerinin stokastik olduğu robust ve dinamik çalışmalar,
- Rastgele makine bozulmalarının ve bakımın bir arada ele alındığı dinamik dayanıklı çizelgelerin üretilmesini dikkate alan çalışmalar,
- Tekrarlı esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde dinamik ve dayanıklı çizelgelerin üretilmesini dikkate alan çalışmalar,
- Hazırlık zamanlarının, makineler arası taşıma sürelerinin, taşıma uzaklıklarının, dikkate alındığı dinamik robust ve bakımın yer aldığı çalışmalar,
- Amaç fonksiyonunda aşağıdaki durumların dikkate alındığı çalışmalar.
 - Bakım maliyetleri veya plansız duruş maliyetleri

- Farklı robust kriterleri
- Maksimum makine iş yükü, toplam makine iş yükü
- Teslim tarihlerindeki gecikme
- Ortalama akış zamanı, ortalama gecikme





KAYNAKLAR

- Abbasian, M., Nosratabadi H.E., Fazlollahtabar, H., 2015. Applying an Intelligent Dynamic Genetic Algorithm for Solving a Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problem with Maintenance Considerations. *J Appl Computat Math*, 4: 227.
- Alharkan, I. M., 2005. Algorithms for Sequencing and Scheduling. Industrial Engineering Department, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia.
- Al-Hinai, N., ElMekkawy, T. Y., 2011. Robust and Stable Flexible Job Shop Scheduling with Random Machine Breakdowns Using A Hybrid Genetic Algorithm. *International Journal of Production Economics*, 132 (2), 279-291.
- Alotaibi, A., Lohse, N., Vu, T. M., 2016. Dynamic Agent-Based Bi-Objective Robustness for Tardiness and Energy In A Dynamic Flexible Job Shop. *Procedia Cirp*, 57, 728-733.
- Behnke, D., & Geiger, M. J., 2012. Test Instances for The Flexible Job Shop Scheduling Problem With Work Centers.
- BSI Standard Publication, 2010. BS EN 13306:2010 Maintenance-Maintenance Terminology.
- Dalfard, V. M. and Mohammadi, G., 2012. Two Meta-Heuristic Algorithms for Solving Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling with Parallel Machine and Maintenance Constraints. *Computers & Mathematics with Applications*, 64 (6): 2111-2117.
- Demir, Y. and İşleyen, S., 2014. Note to “Scheduling Jobs and Maintenances in Flexible Job Shop with A Hybrid Genetic Algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25 (1): 209-211.
- Dosdoğru, A. T., 2012. Dynamic Flexible Job Shop Scheduling with Simulation Optimization By Using Genetic Algorithm. M. Sc. Thesis, Industrial Engineering, University of Gaziantep.

- Duffuaa, S. O., Raouf, A., & Campbell, J. D., 2015. Planning and Control of Maintenance Systems. Springer International Publishing Switzerland, 348.
- Eberhart, R. C. and Shi, Y., 2001. Partical Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. Evolutionary Computation, Proceedings of the 2001 Congress, on. Vol. 1., IEEE.
- El Khoukhi, F., Boukachour, J., & Alaoui, A. E. H., 2017. The “Dual-Ants Colony”: A Novel Hybrid Approach for The Flexible Job Shop Scheduling Problem With Preventive Maintenance. Computers & Industrial Engineering, 106, 236-255.
- Fahmy, S.A., Balakrishnan, S. and Elmekawwy, T. Y., 2009. A Generic Deadlock-Free Reactive Scheduling Approach. International Journal of Production Research, 47 (20): 5657-5676.
- Fattahi, P. and Fallahi, A., 2010. Dynamic Scheduling in Flexible Job Shop Systems By Considering Simultaneously Efficiency and Stability. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2 (2): 114-123.
- Gao, J., Gen, M. and Sun, L., 2006. Scheduling Jobs and Maintenances in Flexible Job Shop with A Hybrid Genetic Algorithm. Journal of Intelligent Manufacturing, 17 (4): 493-507.
- Geyik, F., Dosdoğru, A. T., 2013. Process Plan and Part Routing Optimization in a Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Environment: An Optimization via Simulation Approach. Neural Comput & Applic, 23:1631–1641.
- Gholami, M. and Zandieh, M., 2009. Integrating Simulation and Genetic Algorithm to Schedule A Dynamic Flexible Job Shop. Journal of Intelligent Manufacturing, 20 (4): 481-498.
- Gören, S., 2002. Robustness and Stability Measures for Scheduling Policies in a Single Machine Environment. M. Sc. Thesis, Industrial Engineering, Bilkent University.
- Jing, T. and Tomohiro, M., 2010. Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling with Uncertain Processing Time and Machine Available Constraint Based

- on Hybrid Optimization Approach. Constraints 4: 5, Proceedings of the 2010 IEEE.
- Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P., 2002a. Approach By Localiaztion and Multiobjective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C Vol. 32, No. 1, 1-13.
- _____, 2002b. Pareto-Optimality Approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems: Hybridization of Evolutionary Algorithms and Fuzzy Logic. Mathematics and Computers in Simulation, 60 (3-5):245–276.
- Kobu, B., 2013. Üretim Yönetimi. İstanbul:Beta Basım A. Ş.
- Karthikeyan S., Asokan P., Chandrasekaran M., 2014. A Hybrid Discrete Firefly Algorithm for Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems with Maintenance Activity, Applied Mechanics and Materials, Vol. 575, pp. 922-925, Jun.
- Li, J., and Pan, Q., 2012. Chemical-Reaction Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems with Maintenance Activity. Applied Soft Computing, 12.9: 2896-2912.
- Li, J., Q. Pan, And M. F. Tasgetiren, 2014. A Discrete Artificial Bee Colony Algorithm for The Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem with Maintenance Activities. Applied Mathematical Modelling 38.3: 1111-1132
- Li, X., Peng, Z., Du, B., Guo, J., Xu, W., & Zhuang, K., 2017. Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm with A Rescheduling Strategy for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problems. Computers & Industrial Engineering, 113, 10-26.
- Lin, L., Jia-Zhen, H., 2009. Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem in Steel Tubes Production, Systems Engineering Theory & Practice, Volume 29, Issue 8

- Liu, B., Fan, Y. and Liu, Y., 2015. A Fast Estimation of Distribution Algorithm for Dynamic Fuzzy Flexible Job-shop Scheduling Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 193-201 .
- Liu, L., Liu, W. and Cartes, D. A., 2008. Partical Swarm Optimization-Based Parameter Identification Applied to Permanent Magnet Synchronous Motors, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 1092–1100.
- Tessaro Lunardi, W., Cherri, L. H., & Voos, H., 2018. A Mathematical Model and a Firefly Algorithm for an Extended Flexible Job Shop Problem with Availability Constraints. In *17th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, Zakopane, Poland, June 3-7, 2018.
- Mokhtari, H., Dadgar, M, 2015. Scheduling Optimization of A Stochastic Flexible Job-Shop System With Time-Varying Machine Failure Rate. *Computers and Operations Research* Volume 61 Issue C, September, Pages 31-45.
- Moradi, E., Ghomi, S.M.T.F. and Zandieh, M., 2011. Bi-Objective Optimization Research On Integrated Fixed Time Interval Preventive Maintenance and Production for Scheduling Flexible Job-Shop Problem. *Expert Systems With Applications* 38.6: 7169-7178.
- Nasim N., Mohammad, A., 2011. Multi-Objective Flexible Dynamic Job-Shop Scheduling Problem Considering Maintenance Constraint. *International Journal Of Industrial Engineering and Production Management (IJIE)*, Volume 22, Number 1; Page (S) 13 To 26.
- Ning, T., Huang, M., Liang, X., & Jin, H., 2016. A Novel Dynamic Scheduling Strategy for Solving Flexible Job-Shop Problems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 7 (5), 721-729.
- Nouiri, M., Bekrar, A., Jemai, A., Niar, S. and Ammari, A. C., 2015. "An Effective and Distributed Particle Swarm Optimization Algorithm for Flexible Job-shop Scheduling Problem", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-13.
- Pan, Y., Xue, D. J., Gao, T. Y., Zhou, L. B., & Xie, X. Y., 2013a. Modeling and Scheme Generation of Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling. In *Applied*

- Mechanics and Materials (Vol. 423, pp. 2232-2236). Trans Tech Publications.
- _____, 2013b. Research on Strategy of Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 423, pp. 2237-2243). Trans Tech Publications.
- Pezzella F., Morganti, G., Ciaschetti, G., 2008. A Genetic Algorithm for The Flexible Job-Shop Scheduling Problem. Computers & OR 35 (10), 3202-3212.
- Pfeiffer, A., Kádár, B., & Monostori, L., 2007. Stability-Oriented Evaluation of Rescheduling Strategies, by Using Simulation. Computers in Industry, 58 (7), 630-643.
- Pinedo M., L., 2016. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. Springer Science & Business Media, New York, 674.
- Ouelhadj, D., & Petrovic, S., 2009. A Survey of Dynamic Scheduling In Manufacturing Systems. Journal of scheduling, 12 (4), 417.
- Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., Govindan, K., 2018. A Novel Integrated Condition-Based Maintenance and Stochastic Flexible Job Shop Scheduling Problem: Simulation-Based Optimization Approach. Annals of Operations Research, 269 (1-2), 583-621.
- Rajabinasab, A. and Mansour, S., 2011. Dynamic Flexible Job Shop Scheduling with Alternative Process Plans: An Agent-Based Approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 54 (9-12): 1091-1107.
- Rajkumar, M., Asokan, P., Vamsikrishna, V., 2010. A GRASP Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling with Maintenance Constraints, International Journal of Production Research, 48: 22, 6821-6836.
- Rey Z., G., Bekrar, A., Prabhu, V., & Trentesaux, D., 2014. Coupling A Genetic Algorithm with The Distributed Arrival-Time Control for The JIT Dynamic Scheduling of Flexible Job-Shops. International Journal of Production Research, 52 (12), 3688-3709.

- Sarıdoğan, M. E., 2004. C++ ve Nesneye Yönelik Programlama. Papatya Yayıncılık.
- Sharma, P. and Jain, A., 2015. Effect of Routing Flexibility and Sequencing Rules on Performance of Stochastic Flexible Job Shop Manufacturing System with Setup Times: Simulation Approach. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture: 0954405415576060.
- Shao, X., Liu, W., Liu, Q., & Zhang, C., 2013. Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization for Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67 (9-12), 2885-2901.
- Shen, X.N., and Yao, X., 2015. Mathematical Modeling and Multi-Objective Evolutionary Algorithms Applied to Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Problems. Information Sciences 298: 198-224.
- Shen, X. N., Han, Y., & Fu, J. Z., 2017. Robustness Measures and Robust Scheduling for Multi-Objective Stochastic Flexible Job Shop Scheduling Problems. Soft Computing, 21 (21), 6531-6554.
- Shi, Y. and Eberhart, R. C., 1998. A Modified Particle Swarm Optimizer. Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, s: 69-73. IEEE Press, Piscataway, NJ.
- Song, W., Zhang, C., Lin, W., Shao, X., 2014. Flexible Job-Shop Scheduling Problem With Maintenance Activities Considering Energy Consumption. Applied Mechanics & Materials; 2014, Issue 521, p707.
- Souilah, A., 1995. Simulated Annealing for Manufacturing Systems Layout Design, European Journal of Operational Research, 82 (3), 592-614.
- Tamer, S., 2007. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ile Bulanık Nöral Ağ Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi.
- Tanyaş, M. ve Baskak, M., 2003. Üretim planlama ve kontrol. İrfan Yayıncılık.

- Thörnblad, K., Almgren, T., Patriksson, M. and Strömberg, A.B., 2012. Mathematical Optimization of A Flexible Job Shop Problem Including Preventive Maintenance and Availability of Fixtures. Proceedings of The 4th World P&Om Conference/19th International Annual Euroma Conference, Amsterdam, Netherlands, July 2012.
- Vieira, G. E., Herrmann, J. W., & Lin, E., 2003. Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. *Journal of Scheduling*, 6 (1), 39-62.
- Vinod, V., & Sridharan, R., 2009. Development and Analysis of Scheduling Decision Rules for A Dynamic Flexible Job Shop Production System: A Simulation Study. *International Journal of Business Performance Management*, 11 (1-2), 43-71.
- Wang, S. and Yu, J., 2010. An Effective Heuristic for Flexible Job-Shop Scheduling Problem with Maintenance Activities. *Computers & Industrial Engineering* 59 (3): 436-447.
- Wang, Y. M., Yin, H. L. and Da Qin, K., 2013. A Novel Genetic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problems with Machine Disruptions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (5-8): 1317-1326.
- Wu, S. D., Byeon, E., and Storer, R. H., 1999. A Graph-Theoretic Decomposition of the Job Shop Scheduling Problem to Achieve Scheduling Robustness”, *Operations Research*, 47.1, 113-124.
- Xia, W., & Wu, Z., 2005. An Effective Hybrid Optimization Approach for Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problems. *Computers & Industrial Engineering*, 48 (2), 409-425.
- Xiong, J., Xing, L. N. and Chen, Y.W., 2013. Robust Scheduling for Multi-Objective Flexible Job-Shop Problems with Random Machine Breakdowns. *International Journal of Production Economics* 141 (1): 112-126.

- Yang, Q., Liu, J., Huang, Y., Wang, Y., & Wang, T., 2016. The Dynamic 4S Auto Maintenance Shop Scheduling In A Multi-Constraint Machine Environment Based On The Theory of Constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9-12), 1773-1785.
- Yang, X. P. and Gao, X. L., 2018. Optimization Of Dynamic and Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Based on Parallel Hybrid Algorithm. *International Journal of Simulation Modelling*, 17 (4), 724-733.
- Ye, J., & Ma, H., 2015. Multiobjective Joint Optimization of Production Scheduling and Maintenance Planning In The Flexible Job-Shop Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Zhang, G., Gao, L., & Shi, Y., 2011. An Effective Genetic Algorithm for The Flexible Job-Shop Scheduling Problem. *Expert Systems with Applications*, 38 (4), 3563-3573.
- Zhang, L., Li, X. , Wen, L. and Zhang, G., 2012. Scheduling Flexible Job Shop in Dynamic Environment Based On A Memetic Algorithm. *Cognitive Informatics & Cognitive Computing (Icci* Cc)*, 2012 IEEE 11th International Conference On, IEEE.
- Zhang, L., Gao, L. and Li, X., 2013. A Hybrid Genetic Algorithm and Tabu Search for A Multi-Objective Dynamic Job Shop Scheduling Problem. *International Journal of Production Research*, 51 (12): 3516-3531.
- Zhang, J., Yang, J., & Zhou, Y., 2016. Robust Scheduling for Multi-Objective Flexible Job-Shop Problems with Flexible Workdays. *Engineering Optimization*, 48 (11), 1973-1989.
- Zheng, Y., Lian, L., Fu, Z., Mesghouni, K., 2015. Evolutional Algorithm in Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem with Uncertainties. *LISS (2013) Proceedings of 3rd International Conference on Logistics*, Springer Berlin Heidelberg, pp:1009-1015.
- Zheng, Y., Lian, L., Mesghouni, K., 2014. Comparative Study of Heuristics Algorithms in Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem with Condition

- Based Maintenance. Journal of Industrial Engineering and Management, JIEM, 2014 – 7 (2): 518-531.
- Ziaee, M., 2014. An Efficient Heuristic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling with Maintenance Constrains. Applied Mathematics and Sciences, Vol. 1, No. 1, May.
- Zribi, N., Borne, P., 2005. Hybrid Genetic Algorithm for The Flexible Job-Shop Problem Under Maintenance Constraints. In International Conference on Natural Computation, Springer, Berlin, Heidelberg, 259-268.





ÖZGEÇMİŞ

Olca KALAN 1984 yılında Adana’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adana’da, lise öğrenimini Mersin Fen Lisesi ve Adana Özel Gündoğdu Lisesi’nde tamamladı. 2001 yılında kazandığı Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında ikincilikle mezun oldu. 2007 yılında Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde başladığı yüksek lisans öğrenimini 2009 yılında başarıyla tamamladıktan sonra 2013 yılında Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde doktora programına başladı. Yüksek lisans ve doktora öğrenimi süresince TÜBİTAK tarafından burs desteği aldı ve 2011 yılından itibaren Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.





EKLER

EK1-Problem Senaryoları için Elde Edilen Sonuçlar

Senaryo	İş Sayısı	Makine Sayısı	Operasyon Sayısı	Bakım Periyodu	Yeni İş Geliş Zamanı	Başlangıç Çizelgesi Cmax (Birim Zaman)	Başlangıç Çizelgesi GAP (%)	Cmax (Birim Zaman)				GAP (%)				CPU (sn)			
								Robust Çizelge	Gecikmesiz Çizelge	Sona Ekleme Çizelgesi	Başlangıç Çizelgesi CPU (sn)	Robust Çizelge	Gecikmesiz Çizelge	Sona Ekleme Çizelgesi	Başlangıç Çizelgesi Çizelge	Robust Çizelge	Gecikmesiz Çizelge	Sona Ekleme Çizelgesi	Robust Çizelge
1	1			3	1		0	0.85	9	9	9	25	8.89	0	10000	10000	15.58		
2	2				2	7	0	0.80	9	9	9	0	0	0	2.44	20.88	0.90		
3	3				4		0	0.72	10	10	10	0	7.02	0	4.76	10000	943.04		
4	4				1		0	1.48	8	8	9	10.29	13.16	0	10000	10000	1.60		
5	5			4	2	7	0	1.62	9	9	9	0	13.33	0	592.29	10000	2.75		
6	3	4	7		3		0	1.63	9	9	9	0	0	0	1.71	4.67	2.09		
7	7				5		0	1.52	11	11	11	0	0	0	128.94	6.28	3.62		
8	8				1		0	0.89	8	8	8	5.71	13.89	0	10000	10000	1.12		
9	9			5	2	5	0	0.78	8	8	8	0	0	0	429.85	27.06	1.34		
10	10				3		0	0.87	9	10	9	3.49	0	7.84	10000	30.75	10000		
11					4		0	0.79	10	10	10	0	0	0	1.12	0.79	1.11		
12	12				1		0	2.76	17	17	14	33.58	19.75	0	10000	10000	1.28		
13	13				2		0	2.76	14	14	17	12.68	20	0	10000	10000	254.67		
14	14			4	5	14	0	2.64	14	19	17	11.80	16.35	0	10000	10000	193.40		
15	15				8		0	2.65	17	17	17	6.63	5.98	0	10000	10000	3.87		
16	16				10		0	2.83	17	17	17	4.32	5.91	0	10000	10000	5.86		
17	17				12		0	2.90	19	19	19	0	0	0	0.64	0.63	1.41		
18	18				1		0	3.42	16	16	16	12.59	21.13	0	10000	10000	101.68		
19	19			5	2		0	3.40	16	16	16	3.42	3.66	0	10000	10000	1.42		
20	20	4	8		3	16	0	3.42	16	16	16	3.82	8.79	0	10000	10000	16.05		
21	21				6		0	3.45	16	16	16	5.84	7.78	0	10000	10000	4.64		
22	22				8		0	3.37	16	16	16	0	1.06	0	4515.37	10000	50.50		
23	23				1		0	7.89	18	18	18	10.27	16	0	10000	10000	309.66		
24	24			6	2		0	7.55	18	18	18	8.78	12.99	0	10000	10000	306.66		
25	25				3	18	0	8.01	18	18	18	0	0	0	99.17	5.84	308.40		
26	26				7		0	7.77	18	18	18	1.79	3.12	0	10000	10000	9.64		
27	27				9		0	7.94	18	18	18	0	4.26	0	19.16	10000	6.34		
28	28				1		4.55	10000	16	16	16	19.44	13.41	0	10000	10000	1.45		
29	29				2		4.55	10000	16	16	16	4.49	9.78	0	10000	10000	1.36		
30	30			5	3	16	4.55	10000	16	16	16	5.70	7.45	0	10000	10000	1.22		
31	31				6		4.55	10000	16	16	16	4.17	6.73	0	10000	10000	1.33		
32	32				7		4.55	10000	16	16	16	3.07	4.08	0	10000	10000	1.39		
33	33				9		4.55	10000	16	16	16	0	4.90	0	3010.89	10000	153.11		
34	34				1		0	12.75	18	18	18	4.46	12.20	0	10000	10000	49.52		
35	35			6	2		0	12.92	18	18	18	0	0	0	79.75	48.45	43.03		
36	36				4	18	0	12.79	18	18	18	0	0	0	41.32	56.52	42.95		
37	37	5	12		7		0	12.78	18	18	18	2.20	2.73	0	10000	10000	35.64		
38	38				9		0	13.02	18	18	18	0.56	0	2.20	10000	84.94	10000		
39	39				11		0	13.03	18	18	18	0	0	0	654.44	11.05	4.96		
40	40				1		1.30	10000	12	12	12	5.79	11.11	0	10000	10000	1382.55		
41	41				2		1.30	10000	12	12	12	1.60	2.60	0	10000	10000	1629.30		
42	42			7	3	12	1.30	10000	12	12	12	0	1.28	0	1764.06	10000	1690.44		
43	43				4		1.30	10000	12	12	12	3.13	5	0	10000	10000	1636.13		
44	44				5		1.30	10000	13	13	13	8.46	7.32	0	10000	10000	1555.35		
45	45				8		1.30	10000	13	13	14	6.52	4.44	0	10000	10000	88.81		

EK2-İşlerin Teslim Sürelerinin Veri Setlerine Göre Değişimi

3 iş 4 makine 7 Operasyon VeriSeti için Mevcut İşlerdeki Teslim Sürelerindeki Gecikmeler

3 iş 4 Makine 7 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	İşler	Mevcut Teslim Süreleri	Yeni Teslim Süreleri (Robust Yöntem)	İş Gecikme (Robust Yöntem)	Yeni Teslim Süreleri (Gecikmesiz Yöntem)	İş Gecikme (Gecikmesiz Yöntem)
Bakım Periyodu 3	1	1	2	3	1	3	1
		2	7	7	0	7	0
		3	6	6	0	6	0
	2	1	2	2	0	2	0
		2	7	7	0	7	0
		3	6	6	0	6	0
	4	1	2	2	0	2	0
		2	7	7	0	7	0
		3	6	6	0	6	0
Bakım Periyodu 4	1	1	3	3	0	3	0
		2	6	8	2	6	0
		3	7	7	0	7	0
	2	1	3	3	0	3	0
		2	6	6	0	6	0
		3	7	8	1	8	1
	3	1	3	3	0	3	0
		2	6	6	0	6	0
		3	7	7	0	7	0
	5	1	3	3	0	3	0
		2	6	6	0	6	0
		3	7	7	0	7	0
Bakım Periyodu 5	1	1	3	3	0	3	0
		2	5	5	0	5	0
		3	5	5	0	8	3
	2	1	3	3	0	3	0
		2	5	5	0	5	0
		3	5	5	0	5	0
	3	1	3	3	0	3	0
		2	5	5	0	5	0
		3	5	5	0	5	0
	4	1	3	3	0	3	0
		2	5	5	0	5	0
		3	5	5	0	5	0

3 iş 4 makine 8 Operasyon VeriSeti için Mevcut İşlerdeki Teslim Sürelerindeki Gecikmeler

3 iş 4 Makine 8 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	İşler	Mevcut Teslim Süreleri	Yeni Teslim Süreleri (Robust Yöntem)	İş Gecikme (Robust Yöntem)	Yeni Teslim Süreleri (Gecikmesiz Yöntem)	İş Gecikme (Gecikmesiz Yöntem)
Bakım Periyodu 4	1	1	14	14	0	14	0
		2	12	17	5	17	5
		3	13	13	0	13	0
	2	1	14	14	0	14	0
		2	12	13	1	14	2
		3	13	13	0	13	0
	5	1	14	14	0	19	5
		2	12	14	2	12	0
		3	13	14	1	14	1
	8	1	14	14	0	14	0
		2	12	12	0	12	0
		3	13	14	1	14	1
	10	1	14	14	0	14	0
		2	12	12	0	12	0
		3	13	14	1	14	1
	12	1	14	14	0	14	0
		2	12	12	0	12	0
		3	13	13	0	13	0
Bakım Periyodu 5	1	1	16	16	0	16	0
		2	8	8	0	8	0
		3	9	10	1	10	1
	2	1	16	16	0	16	0
		2	8	8	0	8	0
		3	9	11	2	11	2
	3	1	16	16	0	16	0
		2	8	8	0	8	0
		3	9	9	0	11	2
	6	1	16	16	0	16	0
		2	8	8	0	11	3
		3	9	9	0	9	0
	8	1	16	16	0	16	0
		2	8	8	0	8	0
		3	9	9	0	9	0
	1	1	18	18	0	18	0
		2	9	9	0	11	2
		3	6	6	0	12	6
Bakım Periyodu 6	2	1	18	18	0	18	0
		2	9	9	0	11	2
		3	6	6	0	10	4
	3	1	18	18	0	18	0
		2	9	9	0	9	0
		3	6	6	0	6	0
	7	1	18	18	0	18	0
		2	9	9	0	9	0
		3	6	6	0	6	0
	9	1	18	18	0	18	0
		2	9	9	0	9	0
		3	6	6	0	6	0

4 iş 5 makine 12 Operasyon VeriSeti için Mevcut İşlerdeki Teslim Sürelerindeki Gecikmeler

4 İş 5 Makine 12 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Mevcut Teslim Süreleri İşler	Yeni Teslim Süreleri (Robust Yöntem)	İş Gecikme (Robust Yöntem)	Yeni Teslim Süreleri (Gecikmesiz Yöntem)	İş Gecikme (Gecikmesiz Yöntem)	
Bakım Periyodu 5	1	1	10	16	6	10	0
		2	16	16	0	16	0
		3	11	10	-1	11	0
		4	2	2	0	2	0
	2	1	10	10	0	11	1
		2	16	16	0	16	0
		3	11	11	0	10	-1
		4	2	2	0	2	0
	3	1	10	11	1	10	0
		2	16	16	0	16	0
		3	11	10	-1	11	0
		4	2	2	0	2	0
	6	1	10	10	0	11	1
		2	16	16	0	16	0
		3	11	11	0	11	0
		4	2	2	0	2	0
	7	1	10	10	0	10	0
		2	16	16	0	16	0
		3	11	11	0	11	0
		4	2	2	0	2	0
	9	1	10	10	0	10	0
		2	16	16	0	16	0
		3	11	11	0	11	0
		4	2	2	0	2	0
Bakım Periyodu 6	1	1	11	12	1	11	0
		2	18	18	0	18	0
		3	13	13	0	13	0
		4	2	2	0	2	0
	2	1	11	12	1	12	1
		2	18	18	0	18	0
		3	13	10	-3	13	0
		4	2	2	0	2	0
	4	1	11	12	1	11	0
		2	18	18	0	18	0
		3	13	13	0	13	0
		4	2	2	0	2	0
	7	1	11	12	1	12	1
		2	18	18	0	18	0
		3	13	10	-3	10	-3
		4	2	2	0	2	0
	9	1	11	11	0	11	0
		2	18	18	0	18	0
		3	13	11	-2	11	-2
		4	2	2	0	2	0
	11	1	11	11	0	11	0
		2	18	18	0	18	0
		3	13	13	0	13	0
		4	2	2	0	2	0
Bakım Periyodu 7	1	1	12	12	0	12	0
		2	12	12	0	12	0
		3	12	10	-2	10	-2
		4	3	3	0	3	0
	2	1	12	12	0	12	0
		2	12	12	0	12	0
		3	12	9	-3	10	-2
		4	3	3	0	3	0
	3	1	12	12	0	12	0
		2	12	12	0	12	0
		3	12	9	-3	10	-2
		4	3	3	0	3	0
	4	1	12	12	0	12	0
		2	12	12	0	12	0
		3	12	10	-2	12	0
		4	3	3	0	3	0
	5	1	12	13	1	13	1
		2	12	12	0	12	0
		3	12	9	-3	11	-1
		4	3	3	0	3	0
	8	1	12	13	1	13	1
		2	12	12	0	12	0
		3	12	9	-3	9	-3
		4	3	3	0	3	0

EK3- Yeni Gelen İşlerin Bitiş Zamanları Karşılaştırması

3 iş 4 makine 7 Operasyon Veri Seti için Yeni İşlerin Bitiş Zamanları

3 iş 4 Makine 7 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	4. İşin Bitiş Zamanı			5. İşin Bitiş Zamanı		
		Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme	Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme
Bakım Periyodu 3	1	6	6	6	9	9	9
	2	7	7	7	9	9	9
	4	7	7	7	10	10	10
Bakım Periyodu 4	1	8	8	8	7	8	9
	2	9	9	8	9	8	9
	3	8	8	9	9	9	9
	5	8	9	8	11	11	11
Bakım Periyodu 5	1	8	8	8	8	5	8
	2	8	8	8	8	8	8
	3	9	8	9	9	10	8
	4	8	8	8	10	10	10

3 iş 4 makine 8 Operasyon Veri Seti için Yeni İşlerin Bitiş Zamanları

3 iş 4 Makine 8 Operasyon		4. İşin Bitiş Zamanı			5. İşin Bitiş Zamanı		
	Yeni İş Geliş Zamanı	Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme	Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme
Bakım Periyodu 4	1	6	8	13	14	7	14
	2	12	12	13	14	8	17
	5	14	9	13	12	14	17
	8	16	17	17	17	13	17
	10	17	17	17	16	16	17
	12	18	17	17	19	19	19
Bakım Periyodu 5	1	10	10	9	18	10	13
	2	11	10	13	8	8	10
	3	14	15	13	11	10	11
	6	11	11	13	13	11	11
	8	15	14	15	16	16	14
Bakım Periyodu 6	1	9	10	10	11	9	12
	2	9	9	10	13	9	12
	3	10	10	10	11	11	12
	7	10	11	11	12	12	12
	9	13	13	12	17	18	15

4 iş 5 makine 12 Operasyon Veri Seti için Yeni İşlerin Bitiş Zamanları

4 iş 5 Makine 12 Operasyon		5. İşin Bitiş Zamanı			6. İşin Bitiş Zamanı		
	Yeni İş Geliş Zamanı	Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme	Robust	Gecikmesiz	Sona Ekleme
Bakım Periyodu 5	1	10	11	16	10	8	16
	2	14	10	16	11	15	16
	3	10	14	16	15	11	16
	6	14	10	16	11	15	16
	7	14	14	16	14	14	16
	9	16	16	16	16	16	14
Bakım Periyodu 6	1	11	11	13	9	10	17
	2	11	9	13	9	12	17
	4	12	11	13	11	11	17
	7	13	11	16	13	13	17
	9	16	18	18	16	17	17
	11	18	18	18	18	18	17
Bakım Periyodu 7	1	10	10	10	11	11	12
	2	10	10	10	11	11	12
	3	10	10	10	11	11	12
	4	10	10	10	12	12	12
	5	13	12	12	13	12	13
	8	13	13	13	12	12	14

EK4- Makine Doluluk Oranları Karşılaştırması

3 iş 4 makine 7 Operasyon Veri Seti için Makine Doluluk Oranları Karşılaştırması

3 iş 4 Makine 7 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Makineler	Doluluk (Robust)	Doluluk (Gecikmesiz)	Doluluk (Sona Ekleme)
Bakım Periyodu 3	1	1	0,67	0,67	0,67
		2	0,56	0,56	0,67
		3	0,89	0,89	0,89
		4	1,00	1,00	0,78
	2	1	0,67	0,67	0,67
		2	0,67	0,67	0,67
		3	0,89	0,89	0,89
		4	0,78	0,78	0,78
	4	1	0,60	0,60	0,60
		2	0,50	0,50	0,40
		3	0,70	0,70	0,80
		4	0,80	0,80	0,80
Bakım Periyodu 4	1	1	1,00	1,00	0,56
		2	0,88	0,88	0,67
		3	0,75	0,63	0,78
		4	0,88	0,88	0,89
	2	1	0,89	0,56	0,56
		2	0,89	0,89	0,67
		3	0,44	0,67	0,78
		4	0,78	0,78	0,89
	3	1	0,56	0,56	0,56
		2	0,78	0,78	0,78
		3	0,56	0,56	0,67
		4	0,89	0,89	0,89
	5	1	0,55	0,55	0,55
		2	0,55	0,73	0,64
		3	0,55	0,55	0,45
		4	0,91	0,82	0,91
Bakım Periyodu 5	1	1	0,63	0,63	0,63
		2	0,88	0,88	0,88
		3	0,75	0,63	0,75
		4	1,00	1,00	1,00
	2	1	0,63	0,63	0,63
		2	0,88	0,75	0,88
		3	0,75	0,75	0,75
		4	1,00	1,00	1,00
	3	1	0,56	0,50	0,56
		2	0,67	0,70	0,67
		3	0,67	0,50	0,44
		4	0,89	0,80	1,00
	4	1	0,50	0,50	0,50
		2	0,60	0,60	0,60
		3	0,30	0,30	0,40
		4	0,90	0,90	0,90

3 iş 4 makine 8 Operasyon Veri Seti için Makine Doluluk Oranları Karşılaştırması

3 iş 4 Makine 8 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Makineler	Doluluk (Robust)	Doluluk (Gecikmesiz)	Doluluk (Sona Ekleme)
Bakım Periyodu 4	1	1	0,82	0,82	0,79
		2	0,65	0,53	0,86
		3	0,94	0,94	0,93
		4	0,47	0,47	0,71
	2	1	0,86	0,86	0,71
		2	0,57	0,57	0,65
		3	0,93	0,93	0,82
		4	0,71	0,71	0,71
	5	1	0,86	0,63	0,71
		2	0,57	0,32	0,65
		3	0,93	0,95	0,82
		4	0,71	0,47	0,71
	8	1	0,76	0,76	0,76
		2	0,41	0,53	0,41
		3	0,94	0,82	0,94
		4	0,65	0,65	0,65
	10	1	0,76	0,76	0,76
		2	0,53	0,53	0,41
		3	0,82	0,82	0,94
		4	0,65	0,65	0,65
	12	1	0,79	0,79	0,79
		2	0,32	0,21	0,21
		3	0,74	0,74	0,74
		4	0,58	0,63	0,63
Bakım Periyodu 5	1	1	0,69	0,69	0,56
		2	0,50	0,50	0,63
		3	0,88	0,88	0,94
		4	0,69	0,69	0,75
	2	1	0,69	0,69	0,56
		2	0,63	0,50	0,63
		3	0,88	0,75	0,94
		4	0,63	0,75	0,75
	3	1	0,69	0,88	0,63
		2	0,44	0,44	0,38
		3	0,88	0,94	0,94
		4	0,69	0,69	0,75
	6	1	0,69	0,69	0,63
		2	0,31	0,44	0,38
		3	0,88	0,88	0,94
		4	0,81	0,75	0,75
	8	1	0,81	0,81	0,63
		2	0,50	0,38	0,50
		3	0,94	0,94	0,94
		4	0,63	0,69	0,69
Bakım Periyodu 6	1	1	0,56	0,56	0,61
		2	0,56	0,72	0,50
		3	0,89	0,89	0,78
		4	0,56	0,56	0,56
	2	1	0,83	0,56	0,61
		2	0,56	0,56	0,50
		3	0,89	0,89	0,78
		4	0,50	0,56	0,56
	3	1	0,56	0,56	0,61
		2	0,61	0,61	0,50
		3	0,94	0,94	0,78
		4	0,50	0,50	0,56
	7	1	0,61	0,61	0,61
		2	0,50	0,61	0,61
		3	0,78	0,78	0,78
		4	0,56	0,50	0,50

4 iş 5 makine 12 Operasyon Veri Seti için Makine Doluluk Oranları Karşılaştırması

4 iş 5 Makine 12 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Makineler	Doluluk (Robust)	Doluluk (Gecikmesiz)	Sıra	4 iş 5 Makine 12 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Makineler	Doluluk (Robust)	Doluluk (Gecikmesiz)	Sıra
Bakım Periyodu 5	1	1	0,94	0,69		Bakım Periyodu 6	1	1	0,67	0,67	
		2	0,50	0,50				2	0,67	0,56	
		3	0,88	0,88				3	0,89	0,89	
		4	0,44	0,56				4	0,56	0,67	
		5	0,69	0,75				5	0,61	0,61	
	2	1	0,56	0,88			2	1	0,78	1,00	
		2	0,69	0,56				2	0,56	0,61	
		3	0,88	0,69				3	0,67	0,72	
		4	0,50	0,63				4	0,44	0,56	
		5	0,81	0,69				5	0,67	0,50	
	3	1	0,88	0,69			4	1	0,78	0,78	
		2	0,75	0,69				2	0,44	0,50	
		3	0,69	0,63				3	0,94	0,89	
		4	0,56	0,63				4	0,56	0,50	
		5	0,50	0,81				5	0,67	0,67	
	6	1	0,75	0,50			7	1	0,72	1,00	
		2	0,56	0,75				2	0,50	0,50	
		3	0,69	0,94				3	0,83	0,61	
		4	0,50	0,56				4	0,33	0,33	
		5	0,81	0,56				5	0,67	0,50	
	7	1	0,50	0,50			9	1	0,89	1,00	
		2	0,56	0,56				2	0,56	0,56	
		3	0,81	0,81				3	0,78	0,78	
		4	0,56	0,56				4	0,39	0,39	
		5	0,81	0,81				5	0,50	0,56	
	9	1	0,63	0,63			11	1	1,00	1,00	
		2	0,56	0,56				2	0,78	0,78	
		3	0,75	0,75				3	0,44	0,44	
		4	0,50	0,50				4	0,50	0,50	
		5	0,88	0,88				5	0,50	0,50	

4 iş 5 Makine 12 Operasyon	Yeni İş Geliş Zamanı	Makineler	Doluluk (Robust)	Doluluk (Gecikmesiz)	Doluluk (Sona Ekleme)
Bakım Periyodu 7	1	1	1,00	1,00	1,00
		2	0,67	0,67	0,67
		3	0,83	0,83	1,00
		4	0,83	0,83	0,67
		5	0,67	0,67	0,83
	2	1	1,00	1,00	1,00
		2	0,67	0,67	0,67
		3	1,00	0,83	1,00
		4	0,58	0,83	0,67
		5	0,67	0,67	0,83
	3	1	1,00	1,00	1,00
		2	0,67	0,67	0,67
		3	1,00	0,83	1,00
		4	0,58	0,83	0,67
		5	0,67	0,67	0,83
	4	1	1,00	1,00	1,00
		2	0,67	0,67	0,67
		3	0,83	1,00	1,00
		4	0,67	0,67	0,67
		5	0,83	0,83	0,83
	5	1	1,00	0,92	0,92
		2	0,62	0,62	0,62
		3	0,92	0,92	0,92
		4	0,38	0,54	0,62
		5	0,85	0,85	0,77
	8	1	0,85	0,85	1,00
		2	0,38	0,38	0,36
		3	0,92	0,92	0,86
		4	0,69	0,69	0,57
		5	0,62	0,62	0,71