

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLİŞİM PAYLAŞIMI İLE GERÇEK ZAMANLI
ÜRETİM PLANLAMA VE KONTROL SİSTEMİ
TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Muhammet Raşit CESUR

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan TORKUL

Ocak 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

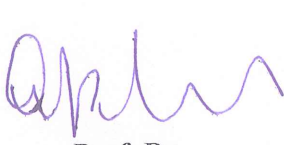
**BİLİŞİM PAYLAŞIMI İLE GERÇEK ZAMANLI
ÜRETİM PLANLAMA VE KONTROL SİSTEMİ
TASARIMI**

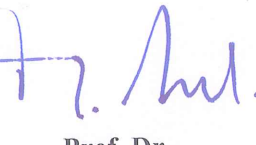
DOKTORA TEZİ

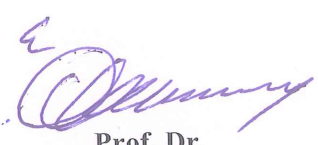
Muhammet Raşit CESUR

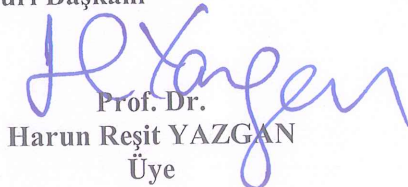
Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

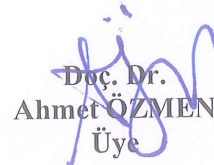
Bu tez 11/ 01 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Alpaslan FİĞLALİ
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Orhan TORKUL
Üye


Prof. Dr.
Özden ÜSTÜN
Üye


Prof. Dr.
Harun Reşit YAZGAN
Üye


Doç. Dr.
Ahmet ÖZMEN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammet Raşit CESUR

11.01.2019

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Orhan TORKUL’a, sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Çalışma süresince gerçekleştirilen AR-GE faaliyetlerine destek sağlayan Toyota Boshoku Türkiye AR-GE genel müdürü Yener TUTLUER’e ve uygulama sürecinde birlikte teşriki mesai yaptığımız Winsa genel müdürü Dr. Nuri ASLAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her evresinde bana destek olan ve üzerimdeki haklarını ödeyemeyeceğim annem Zehra CESUR’a, babam Ali CESUR’a ve kardeşim Fatma CESUR’a sonsuz teşekkür ederim. Son olarak manevi desteğini her an yanımda hissettiğim meslektaşım ve çalışma arkadaşım olan değerli eşim Dr. Elif CESUR’a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmasında yer alan uygulamalar 8B7F numaralı “Gerçek Zamanlı Üretim Planlama ve Kontrol Sistemi Tasarımı” başlıklı KOSGEB projesinde ve Toyota Boshoku ile Sakarya Üniversite’sinin imzaladığı 15.12.2015 tarihli AR-GE protokolü kapsamında yapılan “Ürünlerin Tanınmasına Yönelik Yapay Zekâ Uygulaması” başlıklı projede gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Stok Yönetimi.....	2
1.2. Üretim Yönetimi.....	3
1.3. Amaç ve Kapsam	3

BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Stok Yönetimi.....	5
2.1.1. Stok yönetiminde değişkenliğin etkisi	6
2.1.2. Gerçek zamanlı stok takip sistemleri	7
2.2. Üretim Yönetimi.....	8
2.2.1. Üretim sistemlerinde belirsizliğin ve değişkenliğin etkisi	8
2.2.2. Gerçek zamanlı üretim sistemleri.....	9
2.2.3. Üretim sistemlerinde gerçek zamanlı çizelgeleme	10
2.3. Gerçek Zamanlı Sistemler	12
2.4. Çalışmanın Bilimsel Literatüre Katkısı.....	13
2.5. Sonuç.....	14

BÖLÜM 3.

ÜRETİM SİSTEMLERİ	16
3.1. Üretimin Matematik Modeli.....	19
3.2. Etki, Etkinlik ve Verimlilik	22
3.2.1. Masa örneği.....	25
3.3. İtme Sistemi.....	29
3.3.1. Talep yönetimi.....	29
3.3.1.1. Sabit zaman serili talepler.....	30
3.3.1.2. Eğilimli talepler	33
3.3.1.3. Mevsimsel talepler.....	35
3.3.2. Stok yönetimi	37
3.3.3. Malzeme ihtiyaç planlama ve miktar belirleme kuralları.....	39
3.3.3.1. İhtiyaç kadar sipariş kuralı.....	40
3.3.3.2. Ekonomik sipariş miktarı.....	41
3.3.3.3. Periyodik sipariş miktarı (POQ)	43
3.3.3.4. Parça periyot dengeleme kuralı.....	43
3.3.3.5. Wagner – Whitin algoritması	44
3.4. Çekme Sistemleri	46
3.4.1. Kanban sayısının hesaplanması.....	47
3.5. Hücreli İmalat ve Serü Üretim Modeli	48
3.6. Kapasite Planlama ve Çizelgeleme	50
3.6.1. Seçim (dispatching) stratejileri ve sezgisel algoritmalar.....	50
3.6.1.1. Temel seçim stratejileri	51
3.6.1.2. Birleşik seçim stratejileri	54
3.6.1.3. Sezgisel arama algoritmaları.....	55
3.6.1.3.1. Yerel arama algoritmaları	56
3.6.1.3.2. Sezgiüstü arama algoritmaları	62
3.6.1.3.2.1. Genetik algoritmalar.....	62
3.6.1.3.2.2. Tabu arama algoritması.....	65
3.6.2. Matematiksel modeller.....	67
3.6.3. Dinamik programlama.....	71
3.6.4. Dal sınır algoritması	73

3.6.5. Kısıt karşılama (constraint satisfaction) problemi	77
3.7. Sonuç.....	81
 BÖLÜM 4.	
GERÇEK ZAMANLI ÜRETİM MODELİ	83
4.1. Gerçek Zamanlı Stok Modeli	84
4.1.1. Yeniden sipariş zamanının hesaplanması	89
4.1.2. Bilişim paylaşımının etkisi.....	92
4.1.3 Gerçek zamanlı ekonomik sipariş miktarı (REOQ)	94
4.1.4. Uygulama ve sistem testi.....	98
4.1.4.1. Toplam Maliyet	100
4.1.4.2. Yok Satma	102
4.1.4.3. Sipariş verme sayısı	103
4.2. Gerçek Zamanlı Üretim Modeli	104
4.2.1. Gerçek zamanlı iş sıralama	106
4.2.2 Gerçek zamanlı iş sıralama prosedürü	109
4.2.3. Masa ve sehpa örneğinin gerçek zamanlı çözümü	113
4.2.4. Gerçek zamanlı modelde makine/istasyon seçimi	114
4.2.5. Kıyaslama çalışması.....	116
4.3. Sonuç.....	118
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE TARTIŞMA	121
5.1. Gerçek Zamanlı Üretim Planlama ve Kontrol.....	122
5.1.1. Mevcut planlama sistemlerinin avantajları ve dezavantajları .	123
5.1.2. Gerçek zamanlı sistemin avantaj ve dezavantajları.....	124
5.2. Gerçek Zamanlı Sistemin Performansı	124
5.3. Önerilen Modelin Katkısı Ve Gelecek Çalışma	125
KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ	136

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

σ	: Talebin (ana kitlenin) sapması
σ_c	: Dönem içinde oluşan talebin sapması
σ_i	: Ek hazırlık sayısı
A	: Etkin süre (Availability)
argmax	: En büyük elemanın indisi
AGV	: İnsansız güdümlü araçlar
ATC	: Bariz gecikme maliyetine göre iş sıralama
ATC	: Hazırlık zamanlı bariz gecikme maliyetine göre iş sıralama
C_f	: Sabit maliyet
$C_{\max}$	: Üretimin tamamlanma süresi (makespan)
C_t	: Toplam maliyet
C_v	: Birim süre için değişken maliyet
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli imalat
CIM	: Bilgisayar bütünleşik imalat
D	: Talep
EOQ	: Ekonomik sipariş miktarı
EDD	: Teslim sırasına göre iş sıralama
ERD	: Geliş sırasına göre iş sıralama
ERP	: Kurumsal kaynak planlama
$f_{\max}(T_s)$	: Gevşek zamanın en iyilenmesi (maksimize edilmesi)
F_t	: “t” dönemi için talep tahmini
$H_{w,o,i}$	: Parçanın tezgâha yüklenme süresi
JIT	: Tam zamanında üretim
L_c	: Mevcut dönem içinde geçen süre

L_o	: Stoğun tükenmesine kalan süre
LFL	: İhtiyaç kadar sipariş
LPT	: En uzun işlem süresine göre iş sıralama
MAD	: Ortalama mutlak hata
MAPE	: Ortalama yüzde hata
MSE	: Ortalama standart hata
MRP	: Malzeme ihtiyaç planlama
MPS	: Ana üretim çizelgeleme
MTA	: Montaja üretim
MTO	: Siparişe üretim
MTS	: Stoğa üretim
MTTF	: Arızasız dönem uzunluğu
MTTR	: Tamir süresi
n_w	: İstasyon sayısı
n_i	: “i” ürününün üretim miktarı
m_i	: Mevcut ana kadar üretilen miktar
PC	: Üretim kapasitesi
$PT_{w,o,i}^u$	: Bir birim ürün için tezgâhın çalışma süresi
POQ	: Periyodik sipariş miktarı
PPB	: Parça periyot dengeleme kuralı
Q_c	: Tüketilen stok miktarı
Q_o	: Kalan stok miktarı
R_p	: Üretim hızı
ROC	: Derece sıralama algoritması
ROP	: Yeniden sipariş noktası
ROT	: Yeniden sipariş zamanı
SPT	: En kısa işlem süresine göre iş sıralama
S_c	: Tedarik süresinin sapması
S_w	: “w” istasyonunun çalışma hızı
ss	: Emniyet stoğu
$STV_{w,o,i}$	: Ek hazırlık süresi

T_c	: Çevrim süresi
T_e	: İşlemin tamamlanmasına kalan süre
T_{idle_j}	: Ürünün “j” bileşeni için işlemsiz geçen süre
$T_o(w, i)$	: “w” işmerkezinde, “i” ürününün “o” işleminde geçireceği süre
T_{MLT}	: Siparişin tamamlanma süresi
T_{ph}	: Planlama ufku
T_r	: Yeniden işlem (re-work) süresi
$T_{wlt}(w)$	: İstasyonun toplam iş yükü
T_{RLT}	: Bir ürünün üretim süresi
$TH_{w,o}$	: Tezgâha “o” işlemi için takım bağlama süresi
U	: Verimlilik
σ_i	: Ek hazırlık sayısı
A	: Etkin süre (Availability)
AGV	: İnsansız güdümlü araçlar
ATC	: Bariz gecikme maliyetine göre iş sıralama
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli imalat
CIM	: Bilgisayar bütünleşik imalat
EOQ	: Ekonomik sipariş miktarı
EDD	: Teslim sırasına göre iş sıralama
ERD	: Geliş sırasına göre iş sıralama
ERP	: Kurumsal kaynak planlama
$H_{w,o,i}$	: Parçanın tezgaha yüklenme süresi
JIT	: Tam zamanında üretim
LFL	: İhtiyaç kadar sipariş
LPT	: En uzun işlem süresine göre iş sıralama
MAD	: Ortalama mutlak hata
MAPE	: Ortalama yüzde hata
MSE	: Ortalama standart hata
MRP	: Malzeme ihtiyaç planlama
MPS	: Ana üretim çizelgeleme

MTA	: Montaja üretim
MTO	: Siparişe üretim
MTS	: Stoğa üretim
MTTF	: Arızasız dönem uzunluğu
MTTR	: Tamir süresi
PC	: Üretim kapasitesi
POQ	: Periyodik sipariş miktarı
PPB	: Parça periyot dengeleme kuralı
$R_p(w, o, i)$	: Üretim hızı
ROC	: Derece sıralama algoritması
ROP	: Yeniden sipariş noktası
ROT	: Yeniden sipariş zamanı
SPT	: En kısa işlem süresine göre iş sıralama
$STV_{w,o,i}$	: Ek hazırlık süresi
T_c	: Çevrim süresi
T_{idle_j}	: İşlemsiz geçen süre
T_o	: İşlem süresi
T_{MLT}	: Siparişin tamamlanma süresi
T_{RLT}	: Bir ürünün üretim süresi
$TH_{w,o}$	: Tezgaha takım bağlama süresi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Üretim sistemlerinin yapısı	18
Şekil 3.2.	Masa üretim rotası	26
Şekil 3.3.	Açgözlü arama algoritması ile öncelik atama işleminin ilk adımı	57
Şekil 3.4.	Açgözlü arama algoritması ile öncelik atama işleminin ikinci adımı	59
Şekil 3.5.	Açgözlü arama algoritması ile öncelik atama işleminin üçüncü adımı	61
Şekil 3.6.	Genetik algortmada kullanılan kromozomun yapısı	63
Şekil 3.7.	Dal sınır algoritması ile iş seçiminin ilk adımı	74
Şekil 3.8.	Dal sınır algoritması ile iş seçiminin ikinci adımı	75
Şekil 3.9.	Dal sınır algoritması ile iş seçiminin üçüncü adımı	76
Şekil 3.10.	Kısıt karşılama modelinin amaç fonksiyonu	78
Şekil 3.11.	Kısıt karşılama modelinin kısıtları	79
Şekil 3.12.	Kısıt karşılama modelinin prosedürü	80
Şekil 3.13.	Kısıt programlama ile elde edilen en iyi çizelge	81
Şekil 4.1.	Stok modellerinde stok tüketimi	85
Şekil 4.2.	Tüketim hızının düşük olması	86
Şekil 4.3.	Gerçek tüketim hızının hesaplanandan yüksek olması	87
Şekil 4.4.	Yeniden sipariş noktası	90
Şekil 4.5.	Gerçek zamanlı benzetim modeli	100
Şekil 4.6.	Toplam maliyetin karşılaştırılması	101
Şekil 4.7.	Yok satma miktarının karşılaştırılması	102
Şekil 4.8.	Hizmet düzeyinin sıklığı	103
Şekil 4.9.	Sipariş verme sayısı	104
Şekil 4.10.	Üretim Süreleri	117
Şekil 4.11.	İş sıralama kurallarının optimal çözüme göre gecikme oranları	118

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatür özeti.....	14
Tablo 3.1. Masa ürün ağacı.....	25
Tablo 3.2. İlk masanın üretim çizelgesi.....	27
Tablo 3.3. İkinci masanın üretim çizelgesi.....	27
Tablo 3.4. Talep verisi.....	31
Tablo 3.5. Hareketli ortalama tahmin performansı.....	31
Tablo 3.6. Ağırlıklı ortalama tahmin performansı.....	32
Tablo 3.7. Basit üstel düzeltme tahmin performansı.....	32
Tablo 3.8. Talep verisi.....	34
Tablo 3.9. Doğrusal Regresyon Tahmin Performansı.....	35
Tablo 3.10. Çift üstel düzeltme tahmin performansı.....	35
Tablo 3.11. Talep verisi.....	36
Tablo 3.12. Winter Metodu Performansı.....	36
Tablo 3.13. Sentalam MRP tablosu (LFL için)	41
Tablo 3.14. Sentalam MRP tablosu (EOQ için)	42
Tablo 3.15. Sentalam MRP tablosu (POQ için)	43
Tablo 3.16. Sentalam MRP tablosu (PPB için)	44
Tablo 3.17. Wagner – Whitin algoritması çözüm adımları.....	46
Tablo 3.18. Parça işlem ilişki matrisi.....	49
Tablo 3.19. Parça işlem ilişki matrisi (düzenlenmiş)	49
Tablo 3.20. Sehpa ürün ağacı.....	51
Tablo 3.21. Rota verileri.....	52
Tablo 3.22. SPT stratejisi ile oluşturulan çizelge.....	52
Tablo 3.23. LPT stratejisi ile oluşturulan çizelge.....	53
Tablo 3.24. ATC stratejisi ile oluşturulan çizelge.....	55
Tablo 3.25. Açgözlü arama algoritmasında ilk adım.....	57

Tablo 3.26. Açgözlü arama algoritmasında ikinci adım.....	58
Tablo 3.27. Açgözlü arama algoritmasında üçüncü adım.....	59
Tablo 3.28. Açgözlü Arama Algoritmasında Dördüncü Adım.....	60
Tablo 3.29. Farklı algoritmalarla oluşturulan kromozomlar.....	64
Tablo 3.30. Masa Üst Tablasının İşlem Önceliği Değiştirildiğinde Oluşan Çizelge	67
Tablo 3.31. Dinamik programlamanın adımları.....	73
Tablo 3.32. Masa ayağının işlem önceliği değiştirildiğinde oluşan çizelge.....	77
Tablo 3.33. Masa ve sehpanın rota verileri.....	79
Tablo 4.1. Benzetim çalışması parametrelerinin aralıkları.....	99
Tablo 4.2. Rota verileri.....	111
Tablo 4.3. İlk adımda işlerin durumu.....	111
Tablo 4.4. İkinci adımda işlerin durumu.....	112
Tablo 4.5. Üçüncü adımda işlerin durumu.....	112
Tablo 4.6. Gerçek zamanlı iş sıralama kuralı ile elde edilen çizelge.....	113
Tablo 4.7. En iyi çizelge.....	113
Tablo 4.8. Gerçek zamanlı iş sıralama kuralı ile elde edilen çizelge.....	114

ÖZET

Anahtar kelimeler: gerçek zamanlı, üretim planlama ve kontrol, stok yönetimi, çizelgeleme

Dijital teknolojilerin yaygınlaşması ve hayatın her alanına girmesi ihtiyaçların bireysel kapsamda ele alınmasını sağlamış, rekabeti kişiye özgü çözüm ve ürün üretme boyutuna taşımıştır. Buna bağlı olarak, üretim sistemlerinin gelişimi de çeşitliliği artırmaya ve yönetmeye yönelik olarak devam etmektedir. Bu gelişim ve dönüşüm süreci temel taşlarından birisi kitlesel özelleştirme (mass - customization) olan dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0) olarak adlandırılmıştır. Dünyanın Endüstri 4.0'a ayak uydurabilmesi için üretim ortamında çeşitliliği ve çeşitliliğe bağlı olarak meydana gelecek değişkenliği yönetebilmesi gerekmektedir. Üretim ortamında, değişkenliğin yönetilebilmesi için geliştirilen yöntemler değişkenlikleri stok tutarak veya zaman toleransları ile çalışarak yönetmektedirler. Bu durum verimliliğin azalmasına ve birim başına düşen sabit maliyetin artmasına neden olmaktadır.

Çalışmada, klasik yaklaşımların olumsuz yönlerinden arındırılmış bir üretim planlama yaklaşımı ve modeli önerilmiştir. Önerilen modelin değişkenliklerden etkilenmemesi için model değişken olan miktar parametresi yerine, değişkenliklerden daha az etkilenecek olan zaman parametresi üzerine kurulmuştur. Modelde stok seviyesi yerine stoğun tükenmesine kalan süreye dikkat edilmekte, çizelgeleme sürecinde de üretimin tamamlanmasına kalan süreye ve termin tarihine göre önceliklendirme yapılmaktadır. Model zaman hedeflerine bağlı çalıştığından gerçek zamanlı bir modeldir. Üretim modeli nin gerçek zamanlı olması değişkenliklerden, miktar tabanlı yaklaşıma göre, çok az etkilenmesini sağlamıştır.

Yapılan kıyaslama çalışmalarıyla gerçek zamanlı planlama sisteminin üretim ortamındaki değişkenliklerden etkilenmediği ve emniyet stoksuz ortamda, gecikmeleri azaltarak üretimin tamamlanmasını sağladığı ortaya konmuştur. Üstelik bu çıktılar $O(n)$ zaman karmaşıklığına sahip, kısa sürede, sonlanan algoritmalarla elde edilmiştir. Modelin uygulanması algoritmik olarak kolay olsa da, gerçek zamanlı olduğundan, gerçek zamanlı olarak belirlenen işlem döngüsü içerisinde güncel stok ve üretim verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler Endüstri 4.0 teknolojileriyle elde edilebilen veriler olduğundan, gerçek zamanlı üretim modeli modern üretim sistemlerinde uygulanabilir bir modeldir. Modelin üretim sistemine katkısı, sistemi aynı anda hem itme hem de çekme sistemi gibi çalıştırabilmesidir. Bu sayede üretim sistemi iki biçimde de çalışabilmektedir. Verimli olan stratejiye dinamik olarak geçmek de stok maliyetinin %90'dan fazla azalmasını sağlamıştır.

DESIGN OF REAL-TIME MANUFACTURING PLANNING AND CONTROL SYSTEM VIA INFORMATION SHARING

SUMMARY

Keywords: real-time, manufacturing planning & control, inventory planning, scheduling

Spread of digital technology in every slice of life provides that the needs have been addressed within the individual scope and also it increases competition to the level of both individual solution and personal production. Accordingly, the development of production systems continues to enhance for managing the diversity. One of the milestones of this development and transformation process is mass customization called the fourth industrial revolution, Industry4.0. Enterprises should be able to overcome with the diversity and variability due to diversity in the production environment in order to keep pace with Industry 4.0. The methods improved in attempt to cope with variability in the production, are keeping inventory or working with time tolerances. In this case, efficiency decreases and overhead cost per unit increases in.

A novel production planning approach and a model which is eliminated from negative aspect of conventional methods has been proposed, in this study. The proposed model is based on a time parameter less affected by the variances rather than the quantity in order to avoid being influenced by the changes. The remaining time to stock-out instead of inventory level is taken into account in this model, and prioritization is proceed according to the time remaining to complete the production and due date in the scheduling process. Thus, the model based on a time parameter is a real-time model. Being real-time provides, the model, to be affected from variances less than quantity based methods.

It is presented that the real-time model is not affected by the variances in the manufacturing environment, and provides completing manufacturing process with less delays by using no safety stock. Besides, an algorithm having $O(n)$ time complexity provides this result. Though the application of model is easy as algorithmically, the model, being real-time, requires the live inventory and production data within the determined time cycle. Because the data can be gained by the cyber-physical technologies of Industry 4.0, real-time model can be applied to modern production systems. The contribution of this model to production systems is that the model assimilates manufacturing systems as pull or push system at the same time. Selecting the productive strategy dynamically enables the decrease of more than 90% inventory cost.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Üretim teknolojilerinin tarihsel gelişimi ele alındığında; buhar makinasının icadıyla kapasite artışı, akış hatlarıyla kitlesel üretim ve esnek imalat ile kitlesel üretimde ürün çeşitliliği sağlanmıştır. Günümüzde daha teknolojik tezgâhlar, üç boyutlu yazıcılar, hücresel imalat ve tam zamanında üretim (JIT) gibi felsefeler, çeşitli çizelgeleme yöntemleri ve planlama sistemleriyle üretim sistemlerinin verimliliği ve teknolojik etkinliği artırılmaya çalışılmaktadır. Bunlar gerçekleşirken yakalanan asıl nokta kitlesel çeşitlilik, yani müşteriye özel üründür. Küresel bulut sistemlerinden kıyafet üreticilerine kadar çeşitli sektörlerde kişiselleştirilmiş hizmetler sunulmakta ve bu hizmetler imalat sektörlerinde yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır. Bu bağlamda, eğitimden şehir organizasyonuna, imalattan hizmet sektörüne kadar her alanda kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetler günümüzün ana temasıdır.

Kişiselleştirmenin sağlanabilmesi için insanoğlunun bulunduğu her alanda ürün veya hizmetin içeriğine yönelik kişisel verilerin sağlanması; üretimi yapacak iş merkezinin de bu verileri, üretilecek ürün veya hizmetin içeriğine göre, değerlendirebilecek kapasitede olması gerekmektedir. Bilişim ve üretim teknolojilerinin gelişmesi alt yapılarda bütünleştirmenin sağlanmasına, dağıtık sistemlerin etkin yönetimine ve kişiselleştirmeye imkân sağlamaktadır. Literatürde yıllarca tartışılan algoritmaların ve donanımların ihtiyaç duyulan kişiselleştirmeyi sağlayacak düzeye çok önceden gelmiş olması, maliyetlerin de uygun boyutlara ulaşmasıyla dünyada yeni bir (dijital) çağın pazarlanmaya başlamasını sağlamıştır.

Üretim sistemlerinin kişisel imalat yapacak veya hizmet verecek şekilde geliştirilmesi için iş merkezlerinin teknolojik olarak oldukça esnek tezgâhlarla donatılmasına veya işlerin tezgâh kabiliyetlerine göre gruplanarak hücrelere paylaştırılmasına ihtiyaç vardır. Üç boyutlu yazıcıların imalatla kullanılması ve grup teknolojisinin

yaygınlaşarak gelişmesi bu durumun bir göstergesidir (Esmaeilian, Behdad ve Wang, 2016). Üretim sistemlerinin gelişimi, bu sistemlerin karakterine uygun planlama ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

1.1. Stok Yönetimi

Kişiselleştirilmiş ürün üretimi, ürün çeşitliliğini artıracığından, ürünü oluşturan stok kalemlerinin bir kısmı veya tamamı değişken olacaktır. Bu değişkenliğin yönetimi için dinamik olarak tepki verebilecek sistemlere ihtiyaç vardır. Çünkü klasik stok modelinde planlama ufku boyunca sistem tepki üretemeyeceğinden, bu süre boyunca taleplerde oluşacak değişkenlikler emniyet stoğu tutularak karşılanmaya çalışılmaktadır. Emniyet stoğunun miktarı tedarik ön süresi ve istenen hizmet düzeyine göre üstel artış göstermektedir.

Emniyet stoğunun teorik olarak ön görülmediği tam zamanında üretim sisteminde ise stok çevriminin çok düşük olması ve bu kısa süre içinde kesinleşmiş siparişler ile çalışılması taleplerdeki değişkenliği ortadan kaldırmaktadır. Fakat uygulamada bütün stokları tam zamanında üretim sisteminde çalıştırma imkânı her zaman bulunmamaktadır. Çünkü tam zamanında üretim sisteminin uygulanabilmesi için yakın dönemdeki (yarım gün ile birkaç günlük süreç için) malzeme talebinin mali açıdan ve zaman açısından uygunluk kriterlerini sağlaması gerekmektedir. Mali uygunluk için miktar belirleme kurallarından ihtiyaç kadar sipariş miktarının (lot for lot), ekonomik sipariş miktarına (economic order quantity) eşit olması gerekir. Bu sayede ihtiyaç olduğunda sipariş vermek ekonomik olacaktır. Tam zamanında üretim uygulayan işletmeler bunu başarabilmek için sipariş maliyetini (taşıma maliyeti vb.) düşürmek amacıyla tedarikçilerini yakınlarında tutmaktadırlar. Bir diğer uygunluk kriteri ise zamandır. Tedarikçinin imalat ön süresi işletmenin stok çevrim süresini aşarsa tedarikçi stok tutmak zorundadır. Tedarikçinin stok tutma maliyeti ister istemez üreticiye yansıtacağı için, tedarikçiden müşteriye kadar tüm tedarik zinciri stok tutma maliyetine katlanmak zorunda kalacaktır. Bu iki uygunluk kriteri başarılsa bile değişkenlik tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Çünkü değişkenlik sadece taleplerde değil üretimde de olmaktadır. Üretilen ürünün kalite kontrolünü

geçememesi, yeniden üretim veya ürünün yeniden işlenmesine neden olacağından fazladan stok ihtiyacı her zaman oluşabilir.

1.2. Üretim Yönetimi

Üretim sistemleri kesikli ve sürekli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kesikli sistemlerde üretim miktarı yığın ve akışa bağlı, sürekli sistemlerde ise zamana bağlı olarak hesaplanmaktadır. Her iki sistemin planlamasında hedeflenen, planlama ufku içerisinde kapasiteyi dengeli kurgulamak ve kullanmaktır. Üretim kapasitesi sadece makine kullanımı değil, enerji kullanımı, stok ve üretim maliyetine bağlı olarak finansman kullanımı ve insan kaynağı kullanımı gibi çeşitli üretim kaynakları açısından dengelenebilir. Bu sebeple, gerçekleştirilen kapasite planlama ve çizelgeleme çalışmalarında bu kaynaklardan bir tanesi veya bir kısmı ele alınmaktadır. Üretim kaynakları verimli yönetilirken ürünlerde kişiselleştirmenin sağlanması üretim sisteminin karakteristik özelliklerine göre ele alınması gereken bir problemidir.

Her iki üretim sisteminde de stoka, montaja ve siparişe üretim yapılabilir. Stoka ve siparişe üretimde, ürün kişiselleştirilmiş olarak hazır olacaktır. Montaja üretimde ise yarı mamul stokları hazırlanacak fakat kişiye özgü işlemler ve montaj sipariş gelmesiyle yapılabilecektir. Bütünleştirmenin emniyet stoğuna olan olumlu etkisi göz önüne alındığında, ürünlerdeki ortak kısımları üretilip son işlemleri kişiselleştirmeye yönelik yapmak hem hammadde tedarikine hem de süreç içi stoklara olumlu etki yapacaktır. Böyle bir üretimi ortak bir veya birkaç akış hattında yapmak zor olacağından veya mümkün olmayacağından kaynakların ortak kullanılabileceği akış tipi hücrelerde daha verimli üretim gerçekleştirilebilir. Bu durum, kapasitenin daha dengeli kullanılmasını sağlayacaktır.

1.3. Amaç ve Kapsam

Üretimin günümüzdeki değişimi, imalat sistemlerini hücrelere bölmeye zorlamakta, gelecekte (üç boyutlu yazıcı vb.) tek iş merkezine düşene kadar ilerleyeceği ön görülmektedir (Esmaeilian, Behdad ve Wang, 2016). Hem imalat hem de hizmet

sistemlerinde kişisel ürün ve hizmetler sağlayabilmek için de değişkenliği yönetecek bilginin iş merkezine iletilmesi ve iş merkezlerine bu bilgiyi kullanma kabiliyeti kazandırılması gerekmektedir. Üretim sisteminin bu değişkenliğe tepki verebilmesi için yapı olarak çevik hareketlere imkân sağlayacak düzeyde kurgulanması gerekmektedir.

Üretim sisteminin, değişkenliğin etkilerini en aza indirecek ve üretim ortamının durumuna göre hızlı tepki verecek biçimde kurgulanabilmesi için sistemin gerçek zamanlı toplanan verilerle beslenmesi ve gerçek zamanlı algoritmalarla planlanması gerekmektedir. Çalışmanın amacı stok yönetiminden üretim yönetimine kadar tüm sürecin zaman temelinde ve zaman kısıtlarıyla yönetilmesini sağlayacak bir planlama yönteminin geliştirilmesidir. Bu sayede miktara bağlı sapmaların ek çözümler (emniyet stoğu vb.) uygulanmadan dengelenmesi veya en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Miktar bağımlı değişken olduğu için, zaman içinde oluşan sapmalardan etkilenmemek amacıyla emniyet stoğu tutulmakta, ya da üretim sisteminin yalınlaştırılmasına uğraşılmaktadır. Fakat bu yaklaşımlar sorunu ortadan kaldırmamakta, ek maliyetlerle durumu geçiştirmeyi sağlamakta ya da büyük yatırımları gerektirmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada miktarı temel almayan, stoğun tükenmesine kalan süreyi tahmin ederek sipariş kararı veren; üretimde işlemlerin en erken ve en geç bitiş zamanını tahmin ederek kapasiteyi dengeli dağıtan gerçek zamanlı üretim planlama ve kontrol sistemi önerilmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın literatüre katkısı gerçek zamanlı veya çevrimiçi verilerle klasik planlama algoritmaları kullanan veya sadece gerçek zamanlı çizelgeleme yapan algoritmalara yer veren çalışmaların aksine, üretim sistemini bütünüyle gerçek zamanlı kurgulayan ve çalıştıran bir üretim felsefesinin önerilmesidir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Üretim sistemlerinin gelişimi ve değişimi beş ana başlığa bağlı olarak incelenebilir (Esmailian, Behdad ve Wang, 2016). Bunlar amaç, iş modeli, gelişen üretim teknolojisi, ileri planlama ve itici faktörlerdir. Amaç insan, gezegen ve kârın sürdürülebilirliğidir. İş modeli, ürünün ömür çevrimi boyunca uygulanacak lojistik, üretim ve pazarlama süreçlerini içermektedir. İtici faktörler ise gelişen bilişim altyapısı gibi üretimi dolaylı olarak destekleyen sistemleri içermektedir. Bu bağlamda, üretim sisteminin çalışma biçimi de gelişen üretim ortamına bağlı olarak değişecektir. Değişimin stok yönetimine ve üretim yönetimine olan etkileri üretim sisteminin temel karakteristiğini belirleyecektir.

2.1. Stok Yönetimi

Stok problemi hem nihai ürün lojistiği hem de malzeme lojistiği açısından ele alındığında “Ne zaman?” ve “Ne kadar?” sorularına cevap arar. Çekme sistemlerinde kanban geldiğinde konteynır için hesaplanan miktar kadar malzeme talep edilir. İtme sistemlerinde stok miktarı yeniden sipariş noktasına düştüğünde, miktar belirleme kurallarıyla hesaplanan miktar kadar sipariş verilir. Sipariş miktarı belirleme çok sayıda parametrenin kullanıldığı bir en iyileme problemidir. Ele alınan parametreler, bakiye siparişi, stok tutma maliyeti, sipariş maliyeti ve işlem maliyeti, toplam maliyetin beklenen değeri, yok satma maliyeti ve stoğun bozulma süresi gibi parametrelerdir (Choudhary ve Shankar, 2011; Pentico ve Drake, 2011; Akbalık ve Rapine, 2013; Cárdenas-Barrón, González-Velarde ve Treviño-Garza, 2015; Tempelmeier ve Hilger, 2015). Bu parametreler maliyeti en aza indirmek için kurulan matematik modellerde amaç fonksiyonundaki temel değişkenleri ve kısıtları oluşturmaktadır. Literatürdeki matematik modeller genelde karışık tam sayılı

programlama (mixed integer programming) olarak geliştirilmektedir (Tempelmeier ve Hilger, 2015; Tunc ve ark., 2016).

Dinamik ve karmaşık problemlerin çözümünde ise doğrusal programlamanın yerine sezgisel modeller tercih edilmektedir. Bu tür problemlerin en iyi çözümü $O(n^2)$ zaman karmaşıklığına sahip algoritmalarla bulunurken, karmaşıklığı daha az olan algoritmalarda en iyi çözümü bulma garantisi yoktur (Önal, van den Heuvel ve Liu, 2012). Fakat sezgisel yöntemler hız, esneklik ve kolaylık bakımından modellemeyi kolaylaştırmaktadır. Mazdeh, Emadikhiav ve Parsa (2015) miktar belirleme ve müşteri seçimi için kullandığı sezgisel algoritmada dal sınır şeklinde üst sınırlar koyarak en iyi çözümü daha çabuk yakalamaya çalışmıştır. Sifaleras ve Konstantaras (2017) tersine lojistik faaliyetlerini modelleyebilmek için çok ürünlü dinamik miktar belirleme çalışması yapmışlardır. Çalışmada hem müşterilerin gönderdiği ürünler için hem de sipariş verilen parçalar için oluşan stokta tutma maliyetleri ele alınmıştır. Parsopoulos, Konstantaras ve Skouri (2015) de en iyi çözüm elde etmek için ekonomik sipariş miktarına benzer bir tek parça dinamik miktar belirleme yöntemi geliştirmişlerdir.

Optimal çözümü bulmak için çalışılan başka bir konu da miktar belirlemenin çizelgeleme ve diğer süreçlere bağlı olarak yapılmasıdır. Kuhn ve Liske (2014) araç kapasiteleri, satın alma ve sevkiyat süreçlerindeki detayları değerlendirerek toplam maliyeti düşürmeyi başarmıştır. Bu sayede miktar belirlemenin üretim ve sevkiyat sürecine bağlı yapılmasının verimliliği artırabileceği anlaşılmıştır. Almeder ve arkadaşları (2015), benzer biçimde, çizelgeleme ile miktar belirleme süreçlerini bütünleştirip toplam maliyette önemli bir iyileşme sağlanabileceğini görmüşlerdir. Pentico ve Drake (2011) bu modellerde fiyatlandırma, bozulabilen stoklar, stoka bağlı talep, miktar indirimleri ve çeşitli depo problemlerini ele almıştır.

2.1.1. Stok yönetiminde değişkenliğin etkisi

Geliştirilen modellerde belirsizliğin (değişkenliğin) göz önünde bulundurulduğu stokastik olanlarla kesin (deterministik) modeller Beullens (2014) tarafından kıyaslanmış ve mevcut modellerin arasında önemli farkların olmadığını görmüştür.

Her iki yaklaşımın yaşadığı problemlerin temeli taleplerdeki değişkenliklerdir. Bu duruma çözüm bulabilmek için talepteki değişkenlik, tedarik süresindeki değişkenlik ve negatif sipariş kabülü gibi parametreler literatürde incelenmiştir (Chatfield ve Pritchard, 2013; Sodhi, Sodhi ve Tang, 2014). Özellikle değişkenliğin hiyerarşik olarak yaşandığı tedarik zincirlerindeki kamçı etkisinin, tedarik zinciri düğümleri arasındaki veri transferi ve yönelimin analizi ile azaltılabileceğini Lee, Padmanabhan ve Whang (1997) geliştirdikleri model ile göstermişlerdir. Lee, So ve Tang (2000) geliştirdikleri modeli olgunlaştırarak bilişim paylaşımı kavramı altında önermişlerdir. Değişkenliği yönetebilmek için verinin zamanında paylaşılması ve yönelimin yakalanması çok önemlidir. Bunun başarılabilmesi için stok yönetiminin gerçek zamanlı yapılması gerekmektedir.

2.1.2. Gerçek zamanlı stok takip sistemleri

Stokların gerçek zamanlı takibi veriyi sahadan toplayıp çevrimiçi paylaşan sistemlerle sağlanmaktadır. Bu sistemleri gerçek zamanlı yapan mekanizma ise verinin üretim işlemi başlamadan veya tamamlanmadan elde edilip paylaşılmasıdır. Gerçek zamanlı takibi sağlayan düşük maliyetli ve etkin sistemlerden bir tanesi Radyo Freqansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisidir (Liu ve ark., 2012). RFID ile malzeme akışının takibinde etmen tabanlı sistemler etkin biçimde kullanılmaktadır. Etmenler stok akışının izlenmesini sağladığı gibi, gerçek zamanlı verilere dayanarak iş merkezlerinde operasyonel kararları da vermektedir (Huang ve ark., 2009; Wang ve ark., 2012). RFID sistemlerinin depo, üretim ve sevkiyat süreçlerinde stok takibini sağlayabilmesi için kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemi gibi merkezi bir yapı ile bütünleştirilmesi gerekmektedir (Dai ve ark., 2012).

Nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin gelişmesi çeşitli gerçek zamanlı takip sistemlerinin ERP sistemi ile entegrasyonu kolaylaştırmıştır (Zhang ve ark., 2015). Ses, görüntü ve sinyal üzerinden elde edilen otomatik kimlik (AutoID), RFID ve barkod teknolojisi bu teknolojiler ile çalıştırılmakta, elde edilen veriler gerçek zamanlı planlama için genişletilebilir işaretleme dili (XML) biçiminde paylaşılabilir. (Zhang ve ark., 2011; Zhong ve ark., 2013). Üretim ortamında etkin takibin olması

için sadece XML üzerinden değil, takip teknolojilerini birlikte kullanabilen yazılımlar aracılığıyla da bütünleştirilmektedir (Zhang, Qu, O. K. Ho, ve ark., 2011).

2.2. Üretim Yönetimi

Taleplerdeki değişkenliğe cevap vermenin bir yolu üretim sisteminin çevik olmasıdır. İhtiyaç duyulan çevikliği sağlamak için tam zamanında üretim (JIT) ve hücresele imalat sistemleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. JIT sistemine çeviklik kazandırmak için dinamik rotalama çalışmaları yapılmıştır (Emde ve Boysen, 2012; Weng, Wei ve Fujimura, 2012). Hücresele imalatla ise, Prince ve Kay (2003) tesis yerleşiminden bağımsız olarak sanal gruplar oluşturmuşlar ve farklı üretim sistemlerinde grup teknolojisi uygulamışlardır. Bu sayede üretim sisteminin çevik ve yalın üretimin özelliklerini kazanmasını sağlamışlardır. Grup teknolojisinin çevikliği artıran bir yönü de, beklenmeyen durumlarda grup içindeki üretim sırasının değiştirilmesi sistemi fazla etkilemeyecek olmasıdır (Ji ve ark., 2014). Grup teknolojisinin hazırlık zamanlarını düşürmesi de çevikliği artırmaktadır (Lu, Wang ve Wang, 2014). Carlson ve Yao'nun (2008) çevikliği artırabilmek için, mantıklı yığınlarla makinelerin kuyruk kapasitesini dengeleyip imalat ön süresini düşürmeleri bu durumun bir göstergesidir.

2.2.1. Üretim sistemlerinde belirsizliğin ve değişkenliğin etkisi

Üretim sistemleri talepteki değişkenlik, tedarik süresindeki değişkenlik, makina arızaları ve kalitesizlik gibi sebeplere bağlı olarak belirsizlikle karşı karşıya kalmaktadır. Filho ve Uzsoy (2013) bu durumun yönetilebilmesi için hazırlık ve tamir süreleri gibi belirsizliğin neden olacağı zaman kayıplarını göz önünde bulundurarak çizelgeleme yapan dinamik bir sistem önermişlerdir. Li ve arkadaşları da (2009) böyle durumlarda gerçek zamanlı dar boğaz analizleri ile dinamik çözümler üretmenin verimliliği artırdığını göstermişlerdir. Meyyappan ve arkadaşları da (2008) dinamik sistemlerin hata toleranslarının klasik sistemlerden daha fazla olduğunu ve daha tutarlı çıktılar ürettiğini belirtmişlerdir. Wiklund (1999) benzer bir yaklaşımı kalite kontrolde

uygulamış ve takım ömürlerini kestirerek tezgâh verimliliğini önemli oranda artırmıştır.

2.2.2. Gerçek zamanlı üretim sistemleri

Günümüzde üretim sistemleri kestirimci mühendislik, sürdürülebilirlik, kaynak paylaşımı yaklaşımlarıyla organize edilmiş; iletişim, veri, malzeme ve imalat teknolojilerinin bir arada kullanılacağı biçimde kurgulanmış yapılardır (Kusiak, 2017). Qiu (2003) üretim sürecinin çeşitli kademelerinde kullanılan bilgisayar bütünlük tasarım / bilgisayar bütünlük imalat (CAD/CAM), bilgisayar bütünlük mühendislik (CAE), tedarik zinciri yönetim sistemi (SCM), müşteri ilişkileri yönetimi (CRM) ve üretim takip sistemi (MES) yazılımlarının internet üzerinden bütünlükleştirilebileceğini ve bu sayede verimliliğin artacağını göstermiştir. Watson ve arkadaşları da (2006) çeşitli kaynaklardan toplanan verilerin gerçek zamanlı çevrimiçi analitik işleme (OLAP) sistemi üzerinde bütünlükleştirilerek operasyonel kararlar için kullanılan bir model tasarlamışlardır. Sunny, Liu ve Shahriar (2017) bütünlükleştirilecek verilerin internet üzerinden etkin ve hızlı biçimde paylaşılabilmesi için bir iletişim protokolü geliştirmişlerdir.

Gelişen teknolojik altyapı ile toplanan verilerin zaman tabanlı analizinin kalite süreçleri, parti değişimleri, önleyici bakım ve üretim süresi ve sevkiyat açısından verimliliği artırdığı görülmüştür (Brown ve Vondráček, 2013). Özellikle sahadan toplanan veri ile sahanın durumunun analiz edilmesi, makina seçimi ve iş sıralamanın sahanın durumuna göre yapılması verimliliğin artırılması için önemli bir etkidir (Liu, Jiang ve Fung, 2007). Çünkü gerçek zamanlı sistemlerle yapılacak çizelgelmeme çalışmalarında mevcut duruma göre dinamik olarak hareket edildiği için iş merkezleri arası denge kaybı en aza indirilmektedir (Tai ve Boucher, 2002). Tam zamanında üretim sistemleri talepteki dalgalanmanın etkisini en aza indirecek biçimde kurgulanmış da olsa üretimdeki sapmaların gerçek zamanlı sistemlerle en aza indirilip, sistemin dengelenebileceği görülmüştür (Prabhu, 2000; Gong, Prabhu ve Liu, 2011). Fakat gerçek zamanlı sistemin dengelemeyi yapabilmesi için, beklenmeyen durumları tolere edecek düzeyde esnek olması gerekmektedir (Lee ve Kim, 2008). Bu sayede

planlama ufku içerisindeki olaylar daha doğru düzeyde kestirilebilecektir (Mousavi ve Siervo, 2017).

2.2.3. Üretim sistemlerinde gerçek zamanlı çizelgeleme

Üretim sistemlerinin çizelgelenmesi polinomal zamanda çözümü olduğu ispatlanamayan (NP-Hard) bir problemdir. Bu durum en iyi çözüme hızlı ulaşmayı engellemektedir. Optimizasyonun doğrusal olarak gerçekleştirilmesi için Nyström ve arkadaşları (2005) doğrusal olmayan bir modeli ikili (binary) değişkenlerle doğrusal hale getirmişlerdir. Literatürde sezgisel algoritmalarla bu probleme hızlı çözümler arandığı da görülmektedir (Framinan ve Perez-Gonzalez, 2017).

Çözümü zor olan çizelgeleme problemini lineer bir problem dönüştürmenin yollarından bir tanesi modeli gerçek zamanlı hale dönüştürmektir. Hong, Prabhu ve Wysk (2001) siparişlerin geliş anını kontrol değişkenine dönüştürerek, kombinatoriyal en iyileme problemini sürekli kontrol problemine dönüştürmüşlerdir. Çizelgeleme problemi, gerçek zamanlı çizelgeleme problemine dönüştürülürken iş merkezi üzerinde ikamet kısıtlarıyla yer almalıdır (Qiao, Wu ve Zhou, 2012; Wu ve M. Zhou, 2012). Wu ve M. C. Zhou (2012) üretimdeki sapmaların bu şekilde kontrol altında tutulabileceğini göstermişlerdir. Lim ve arkadaşları da (2014) gecikmeleri zaman kısıtı olarak değerlendirdikleri gerçek zamanlı planlama yöntemlerinin mevcut yöntemlerden daha esnek davrandığını belirtmişlerdir. Zaman kısıtı ile çalıştırılacak modellerin plandan sapmaları tolere edecek düzeyde olması için dinamik olarak çizelgeyi oluşturması gerekmektedir (Collart-Dutilleul ve ark., 2013). Çizelgenin dinamik olarak yapılması için makine ve iş seçimlerinin üretimin mevcut durumuna göre yapılması gerekmektedir (Raman ve Shaw, 1997; Zhang ve ark., 2014). Çizelgenin dinamik oluşturulması için mevcut durumun çizelgeden ne kadar saptığı değerlendirilmelidir (Khodke ve Bhongade, 2013).

Çizelgenin mevcut durumla karşılaştırılarak her an güncellenebileceği gerçek zamanlı çizelgelemenin gerçekleştirilebilmesi için seçilen algoritmanın hızlı olması gerekmektedir (Lee, Jiang ve Liu, 2009). Bu sebeple kritik oran, ilk giren ilk çıkar

(FIFO) ve en erken teslim zamanı algoritmaları gerçek zamanlı çizelgelemede en yaygın kullanılan algoritmalarlardır. Roychowdhury, Allen ve Allen'a (2017) göre en erken teslim zamanı algoritması toplam gecikme en aza indirilmek istendiğinde en iyi çözüme yakın sonuçlar üretmektedir. Park, Kim ve Fox da (2014) geliştirdikleri en az etkin boş zaman algoritmasını, en az boş zaman ve ilk giren ilk çıkar algoritmalarıyla karşılaştırmış ve termin gecikmelerinde azalma sağlamışlardır. Hung, Huang ve Yeh (2013) benzer sonuçlara en yakın termin tarihi algoritması ile ulaşmışlardır. Ham, Lee ve Kim (2011) ikili tamsayılı programlama modeli ile geliştirdikleri sezgisel modeli bütünleştirerek, Başak ve Albayrak da (2014) Petri Ağı'nın bir çeşidi olan işaretli grafik (marked graph) kullanarak hızlı çözüm aramışlardır. Çizelgelemede yapay sinir ağları kullanan Shiue, Guh ve Lee (2011) hızlı çalışmasıyla bilinen özdüzenleyici haritaları (SOM) kullanmıştır. Yapay sinir ağları zaman kısıtlarını oluşturmak üzere üretimin planlama ufku içerisindeki durumunun tahmininde etkin olarak kullanılmaktadır (Iwamura ve ark., 2006).

İşlerin sürekli olmadığı hatlarda gerçek zamanlı takip ve çizelgeleme verimliliği artırmaktadır (Luo, Fang ve Huang, 2015). Çünkü sahadan gerçek zamanlı sistemlerle toplanan veriler çizelgelemenin daha hassas yapılmasını ve güncellenmesini sağlamaktadır (Zhong vd., 2015). Bu sayede farklı faktörlerin de maliyete ve üretim süresine etkileri ölçülebilmekte ve yönetilebilmektedir. Monostori ve arkadaşları (2009) kitlesel üretimde verimliliği düşürmeden esnekliği artırabilmek için gerçek zamanlı çizelgelemeyi önermişlerdir. Ghimire ve arkadaşları (2016) ise IoT kullanarak gerçek zamanlı proje yönetimi yapmışlardır. Gerçek zamanlı planlamanın literatürde farklı örnekleri olsa da gerçek zamanlı çizelgeleme ile enerji maliyetini en aza indirilmesine yaygın olarak çalışılmıştır (Pach ve ark., 2015; Kim, Meng ve Son, 2017). Xu ve arkadaşları (2016) geliştirdikleri modelde, gerçek zamanlı çizelgeleme için enerji tüketim verisinin de gerçek zamanlı toplanmasının gerekliliğini göstermişlerdir. Li ve Hong (2017) gerçek zamanlı veri ile enerji maliyetinin düşürülmesi için enerji yükünün dengelenmesi gerektiğini savunmuşlardır. Adamson ve arkadaşları da (2017) enerji yükünü dengelemek için iki aşamalı bir en iyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Wang ve arkadaşları da (2018) enerji maliyetlerini düşürmek için anlık tepkilerin önemli olduğunu savunmuştur. Fan, Han ve Yang

(2017) işleri makinalara gerçek zamanlı tüketim verisini göz önünde bulundurarak atamışlar ve enerji maliyetini düşürmeyi başarmışlardır. Brundage ve arkadaşları (2016) benzer bir anlayışla çizelgeye göre çalışmayacak olan makinaların enerjisini keserek tasarruf sağlamışlardır.

2.3. Gerçek Zamanlı Sistemler

Gerçek zamanlı sistemler, işi belirli bir zaman kısıtına bağlı olarak tamamlamak zorunda olan sistemlerdir (Niu ve Zhu, 2017). Gerçek zamanlı sistemlerden, işlemi zamanında bitirememesi veya yanlış sonuç üretilmesi durumunda çalışmayı sonlandıranları katı gerçek zamanlı (hard real-time), hatayı tolere ederek devam eden sistemlere de zayıf gerçek zamanlı sistemler (soft real-time) denir. Bu sistemler bir acil durumun (Jeong ve ark., 2010), depremin (Brown ve ark., 2011) ya da kimyasal bir prosesin (Zuo ve Wu, 2000) takibi gibi belirli bir süre içinde müdahaleye ya da tepkiye ihtiyaç olan durumlarda uygulanmaktadır. Üretimde sadece takip değil, işlem esnasında kalite kontrol ve üretimde kullanılan robotik sistemlerin koordinasyonu gibi konular da gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Mani ve arkadaşlarının (2017) metal 3 boyutlu yazıcıdaki kontrolle baskı kalitesini artırmaları, Zhou ve arkadaşlarının (2016) kumaş kontrolü için önerdiği gerçek zamanlı sistem, Dotoli ve Fanti'nin (2004) önerdiği insansız güdümlü araçlar (AGV) için gerçek zamanlı rotalama yapan sistem üretimde kullanılan gerçek zamanlı sistemlerin birer örneğidir.

Gerçek zamanlı sistemler zaman kısıtıyla çalıştığı için sistemin çevrim süresini aşmaması gerekmektedir. Deng, Wang ve Zhou (2004) sistemi oluşturan alt sistemlerin de zaman kısıtına uymasını garanti altına alacak alt kısıtlara bağlı çalıştırılmasını önermiştir. Bastani, Rao ve Kong (2016) zaman kısıtını aşmamak için algoritmaların hızlı çalışacak biçimde tasarlanması gerektiğini savunmuş ve karmaşık bir sınıflandırma uygulaması için hızlı çalışacak bir algoritma önermişlerdir. Fakat Buttazzo, Velasco ve Martí (2007) sistem aşırı yük altında çalışırken ön tanımlı kısıtların sistemin çalışmasını olumsuz etkileyeceğini ve zaman kısıtının dinamik olarak güncellenmesinin başarıyı artıracak olduğunu gösteren bir çalışma yapmışlardır. Zaman kısıtına koşulsuz uymayı savunan yaklaşımlar katı gerçek zamanlı uygulamalar

için, zaman kısıtının dinamik olarak güncellenmesini savunan yaklaşımlar da zayıf gerçek zamanlı sistemler için uygundur. Fakat, sistem yaklaşımı her ne olursa olsun bu sistemler üretimde kullanıldığında geçmiş veriye ihtiyaç olacaktır (Rabin, 2003). Bu verilerin ve yeterli düzeydeki gerçek zamanlı verilerin kullanıldığı sistemler hızlı karar vermeye yardımcı olacaktır. İşletmeler geçmiş verilere sahiptir. Günümüz sanayinde kullanılan teknolojiler de yeterli düzeydeki gerçek zamanlı veriyi elde edecek düzeydedir (Zhuming Bi, Li Da Xu ve Chengen Wang, 2014).

2.4. Çalışmanın Bilimsel Literatüre Katkısı

İmalat sistemleri temel olarak itme ve çekme yaklaşımlarıyla kurgulanmaktadır. Çekme sistemleri ile talepteki belirsizliği ortadan kaldırabilmek için çevrim süresini ve imalat ön süresinin önemli ölçüde düşürülmesi gerekmektedir. Fakat bunu başarmak tedarikçilerle konum olarak yakın olmayı, ekonomik sipariş miktarı ölçüsünde üretim kapasitesini sağlayacak sermayeyi gerektirir. Çekme sistemlerinde tedarik ön süresinin de stok çevrim hızı ile dengeli olması gerekmektedir. Bu kısıtlardan dolayı her işletmenin yalın üretimi uygulaması mümkün değildir. İtme sistemlerinde bu kısıtlar olmamasına karşın taleplerdeki dalgalanmalar veya talep tahminine yapılan üretimler müşteri ihtiyaçlarını her zaman karşılayabilme durumunu ortadan kaldırmaktadır. Bu problem emniyet stoğu ile aşmaya çalışılmakta ve fazladan maliyete katlanılmaktadır. Üstelik malzeme tedariki için sipariş verme zamanı zamana bağlı bir bağımlı değişken olan stok miktarı kontrol edilerek verilmektedir. Malzeme tedariki tamamlanıp üretim sürecine geçildiğinde de makine arızaları ve kalitesizlik gibi nedenlerle her iki yaklaşımda da belirsizlikle yüzleşmek zorunda kalınmaktadır. Literatürde üretimdeki belirsizliğe karşı gerçek zamanlı çizelgeleme modelleri geliştirildiği görülmektedir.

Çalışmada stok yönetiminden üretim yönetimine kadar olan tüm süreç bağımlı değişken olan miktar değil, bağımsız değişken olan zaman ekseninde yeniden tasarlanmıştır. Bu sayede problem en iyi çözümün bulunamama olasılığı olan $O(n^2)$ zaman karmaşıklığı olan bir problemten $O(n)$ zaman karmaşıklığına sahip bir probleme dönüştürülmüştür. Gerçek zamanlı üretim uygulandığı çekme sistemlerinde

belirsizliğin yönetimini sağlayacağı gibi, itme sistemlerinin de karakterini çekme sistemine yaklaştıracaktır. Çünkü gerçek zamanlı üretimde emniyet stoğu tutulmamaktadır. Çizelgeleme ise zaman kısıtları altında dinamik makine seçimleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu durum, sanal hücreler oluşturarak dağıtık iş merkezlerinin çevrim sürelerinin dengelenmesini sağlamakta ve en az kaynak israfını hedeflemektedir.

2.5. Sonuç

Üretim sistemlerinin karmaşıklığı ve değişkenliği, bu sistemlerin yönetilmesini zorlaştırmaktadır. Taleplerdeki ve süreçlerdeki belirsizliğin (kalitesizlik gibi) etkisini düşürebilmek veya ortadan kaldırabilmek için emniyet stoğu gibi politikalar ya da yalın üretim gibi yaklaşımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen tüm yöntemler bu iki temel üzerine oturtulduğu için üretim sistemleri miktarsal ya da oransal çalışmaktadır. Üretimin etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için her iki sistemde de stok ve üretim yönetiminin etkin bir biçimde yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı, Tablo 2.1.'de özetlenen bilimsel literatür stok yönetimi, üretim yönetimi, çizelgeleme ve gerçek zamanlı sistemler başlıkları altında incelenmiştir. İnceleme sonucunda taleplerdeki değişkenliğin ve üretim sisteminde meydana gelen beklenmeyen durumların neden olduğu olumsuz etkiler ve çözüm yöntemleri ele alınmıştır.

Tablo 2.1. Literatür özeti

Ana Başlık	Açıklamalar	Makaleler
Stok Yönetimi	Tam sayılı programlama	(Tempelmeier ve Hilger, 2015; Tunc ve ark., 2016)
	Sezgisel modeller	(Önal, van den Heuvel ve Liu, 2012; Mazdeh, Emadikhiav ve Parsa 2015)
	Gerçek zamanlı stok takip sistemleri	(Huang ve ark., 2009; Wang ve ark., 2012; Dai ve ark., 2012; Zhang ve ark., 2011; Zhong ve ark., 2013)
Üretim Yönetimi	Tam Zamanında Üretim	(Emde ve Boysen, 2012; Weng, Wei ve Fujimura, 2012)
	Grup Teknolojisi	(Ji ve ark., 2014; Lu, Wang ve Wang, 2014; Carlson ve Yao'nun 2008)
	Gerçek zamanlı üretim sistemleri	(Tai ve Boucher, 2002; Prabhu, 2000; Gong, Prabhu ve Liu, 2011; Lee ve Kim, 2008)

Tablo 2.1. Devamı

Ana Başlık	Açıklamalar	Makaleler
Gerçek zamanlı çizelgeleme	Dinamik Çizelgeleme	(Collart-Dutilleul ve ark., 2013; Raman ve Shaw, 1997; Zhang ve ark., 2014; Khodke ve Bhongade, 2013)
	Seçim ve Sıralama Sezgiselleri	(Park, Kim ve Fox 2014; Ham, Lee ve Kim 2011; Shiue, Guh ve Lee 2011; Iwamura ve ark., 2006)
	Model ve Uygulamaları	(Luo, Fang ve Huang, 2015; (Pach ve ark., 2015; Kim, Meng ve Son, 2017; Li ve Hong 2017)
Gerçek Zamanlı Sistemler	Sistem Karakteristiği	(Bastani, Rao ve Kong 2016; Buttazzo, Velasco ve Martí 2007; Zhuming Bi, Li Da Xu ve Chengen Wang, 2014)
	Uygulama Alanları	(Jeong ve ark., 2010; Brown ve ark., 2011; Zuo ve Wu, 2000; Niu ve Zhu, 2017)

Üretim sistemlerinde değişkenliğin etkisinin azaltılması ve planlamada (enerji maliyetleri gibi) değişken faktörlerin de değerlendirilebilmesi için planlamanın miktar ya da oran yerine zaman temelinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda gerçek zamanlı sistemlerin değişkenlikten kaynaklanan verimsizliği azalttığı ve etkin bir planlama sağladığı görülmüştür. Bu sebeple stok yönetimi, üretim yönetimi ve lojistik yönetimi gibi bütünleşik fonksiyonların tamamını kapsayacak, miktar ya da oran temelli yaklaşımlar gibi, gerçek zamanlı bir üretim planlama yaklaşımına ihtiyaç vardır.

BÖLÜM 3. ÜRETİM SİSTEMLERİ

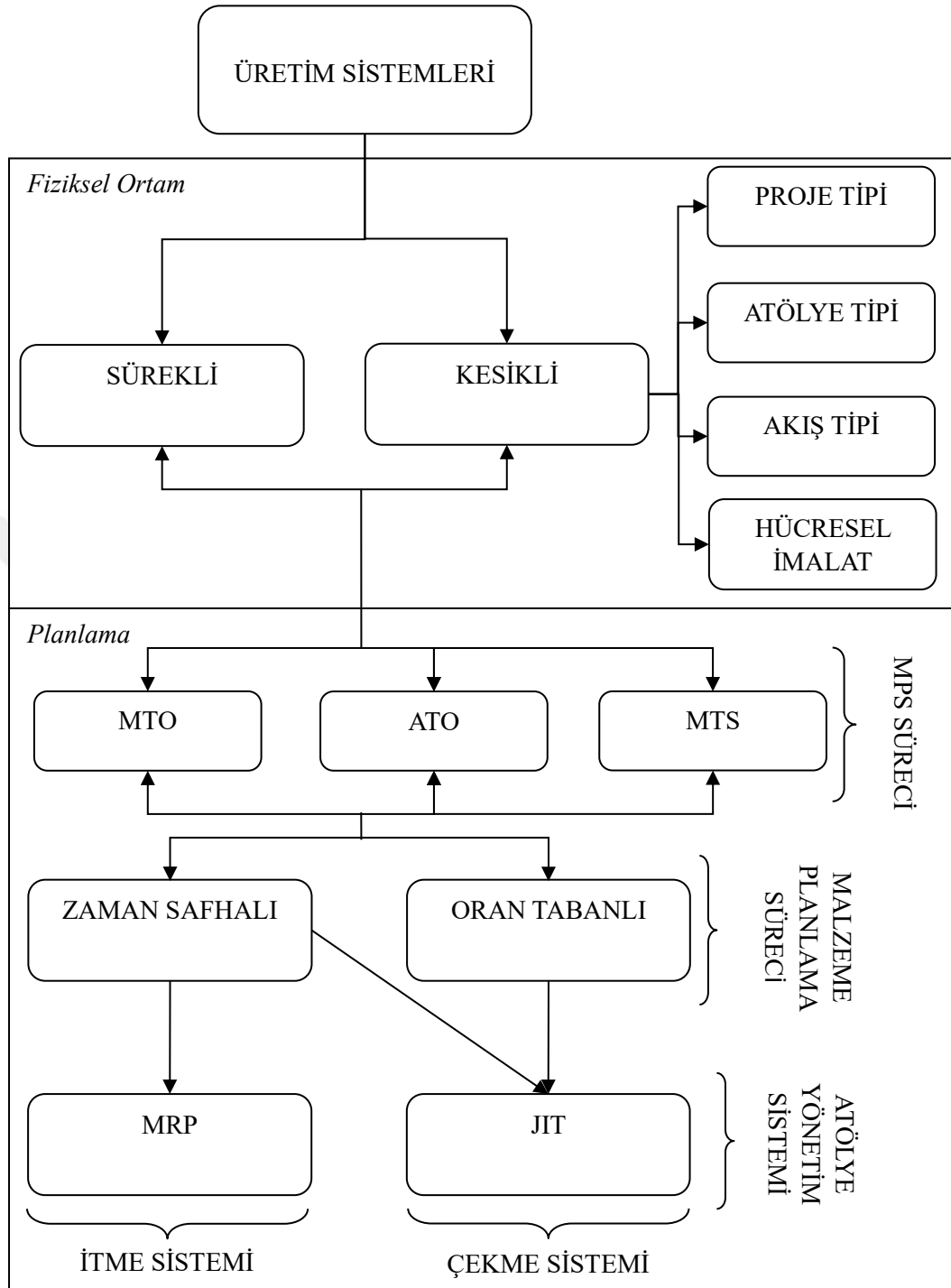
Üretim sistemleri, üretim faaliyetlerinin etkin olarak sürdürülebilmesi için hem fiziki açıdan hem de planlama açısından çeşitli alt sistemleri içeren yapılardır. Üretim sisteminin tasarımı üretilecek ürüne ve kullanılacak teknolojilere bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda üretim sistemleri sürekli ve kesikli üretim sistemleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Sürekli üretim sistemleri üretim işleminin durmadan yapıldığı ve üretim miktarı doğrudan zamana bağlı olarak değişen sistemlerdir. Ekstrüzyon hatları ve petrol üretimi sürekli üretimin birer örnekleridir. Sürekli üretim sistemlerinde hat durmadan çalışacağı için kontrol ve üretim işlemlerinin belirli bir süre içinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple sürekli üretim sistemleri gerçek zamanlı planlamaya uyum sağlayacak karakteristik özelliklere sahiptir.

Kesikli üretim sistemlerinde üretim işlemleri başlayıp bittiği için, çevrime bağlı yönetilen sistemlerdir. Atölye tipi üretim, akış tipi üretim, proje tipi üretim ve hücreli imalat olarak dört gruba ayrılmaktadır. Atölye tipi üretim, her tezgâhın kabiliyetine uygun her işi yaptığı üretim biçimidir. Atölye tipi üretimde, ürün çeşitliliğine bakmaksızın, her tezgâh farklı ürünleri işleyebildiğinden az sayıda tezgâhla çeşitli ürünler üretilebilmektedir. Ürün çeşitliliği arttığında tezgâhlarda hazırlık ihtiyacı doğabileceği için oluşan hazırlık zamanları ve rota üzerindeki işlem zamanlarının dengesizliği üretimin verimini düşürmektedir. Çünkü işlem zamanları kaçınılmaz olmasına karşın hazırlık zamanları işleme bağlı değil tezgâhların teknolojik kabiliyetleri nedeniyle oluşmaktadır ve verimsizliğe neden olmaktadır. Bu nedenle akış tipi üretimde, imalat hattı belirli bir düzende ilerleyecek ve her tezgâh sadece belirli işlemleri yapacağı için hazırlık zamanları oluşmamaktadır. Fakat yüksek miktarda tezgâh yatırımına ihtiyaç duyulmaktadır. Hücreli imalatla ise hazırlık zamanına neden olmayacak ya da çok düşük hazırlık zamanlarına neden olacak

biçimde ürün aileleri oluşturularak ürün ailelerine özgü tezgâh yatırımları yapılmaktadır. Bu sayede akış tipi üretimden daha düşük bir yatırımla yüksek verimlilik sağlanabilmektedir. Proje tipi üretimde ise ürün sabit konumlu yerleştirilmekte ve etrafında hareket eden takım ve araçlarla üretim yapılmaktadır. Proje tipi üretimde verimliliğin artması için eş zamanlı yapılan işlemlerin sayısının artırılması gerekmektedir.

Üretim sistemleri üretim biçimleri açısından ele alındığında zaman, Şekil 3.1.'deki gibi, ana üretim çizelgeleme açısından (MPS) montaja üretim (MTA), stoğa üretim (MTS) ve siparişe üretim (MTO) olmak üzere üç grupta incelenir. Üretim sistemi bu açıdan ele alındığında, sipariş verildiği zaman ürün stoktan teslim edilebilir, stoktan montaj hattına aktarılabilir veya gerekli malzemeler temin edilerek üretime başlanabilir. MTO sistemlerinde tedarik ön süresi ve maliyeti düşük olan malzemeler sipariş alındıktan sonra temin edilebilir veya gerekli malzemeler stoktan karşılanabilir. Sonuç olarak her üretim yaklaşımında da etkin bir stok ve lojistik yönetimine ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan planlama zaman safhalı ve oran tabanlı olarak iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Zaman safhalı sistemlerde stok yönetimi malzeme ihtiyaç planlaması (MRP) ile oran safhalı sistemlerde ise tam zamanında üretim (JIT) sistemleri ile yönetilmektedir.

Zaman ve ekonomik açıdan uygun olan stoklar JIT sistemi ile yönetilebilmekte, JIT sistemi ile yönetme imkânı olmayan stoklar ise MRP sistemiyle yönetilmektedir. JIT sisteminde stok çevrimi boyunca ihtiyaç duyulacak malzeme miktarına ve konteynır kapasitesine göre kanban sayısı hesaplanır ve stok ihtiyaçları kanbanlarla karşılanır. MRP sistemlerinde ise stok tedariki ortalama tüketim hızına bakılarak yapılır. Stok miktarı, ortalama talep ve tedarik ön süresinin çarpımına eşit olduğunda sipariş verilir. Fakat tüketim hızı her zaman ortalama talebe eşit olmayacağından taleplerdeki sapmayı dengelemek için emniyet stoğu tutulur. Emniyet stoğu tedarik ön süresi boyunca talepte oluşacak sapmanın belirli bir güven düzeyindeki miktarıdır. Sapma veya güven düzeyi arttıkça tutulacak stok miktarı ve maliyeti artmaktadır.



Şekil 3.1. Üretim sistemlerinin yapısı

İmalat planlama ise üretim sisteminin yapısına göre şekillendirilmektedir. Çekme sisteminde üretim akış şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı, çekme sistemlerinin planlama biçimi akış tipi üretimle çok benzemektedir. Amaç hattın dengeli bir biçimde çalışmasını sağlamaktır. Atölye tipi üretimde akış yerine yığın

üzerinde planlama yapılmaktadır. Temel hedef işin beklemesinin ya da makinanın boş beklemesinin önüne geçmektir. Dikkat edilen önemli bir nokta da hazırlık zamanlarının da en aza indirilmesidir. Hücresel imalatta, hücrelerin dengeli olması önemlidir. Hücre içi akışın dengelenmesi ayrı bir problem olmasına karşın, hücreler dengelendiğinde hücre içi çizelge sistemin bütününe etkilemektedir. Önemli olan işlerin belirlenen zaman kısıtı içinde bitirilmesidir. Proje tipi üretimde ise ana hedef kritik yol üzerindeki işlemleri gecikmesiz yapabilmektir.

Üretim sisteminin fiziki yapısı veya ürünün içeriği planlama sistemini etkilese de sistemin itme ya da çekme şeklinde çalışması konusunda kısıt oluşturmamaktadır. Üretim sisteminin yapısı ürün çeşitliliğini ve üretim miktarını doğrudan etkilemektedir. Müşteri taleplerindeki değişkenliğe ayak uyduracak ve müşteriye en kısa zamanda cevap verebilecek bir sistemin adaptif, çevik ve yalın olması gerekmektedir. Adaptif üretim sistemi CAD/CAM, ERP ve CIM sistemlerinin bütünleştirildiği çeşit (varyant) ürün ağacı yapısıyla sağlanabilir (Cesur, 2013). Üretim sisteminin çevik olması için de tepki zamanının düşürülmesi gerekmektedir. Tepki zamanı, zaman hedefleri belirlenip bu hedeflerin etkin biçimde takip edilebileceği gerçek zamanlı bir üretim sistemi ile başarılabılır. Verimlilik ve sürdürülebilirlik odaklı bir üretim sistemi için de yalın bir gerçek zamanlı esnek imalat sistemi tasarımı yapılmalıdır.

3.1. Üretimin Matematik Modeli

Üretim son derece değişken ve karmaşık bir ortamdır. Mevcut üretim sistemlerinde, üretimin sıralı ve eş zamanlı işlemlerle gerçekleştirilmesi bu değişken yapıya uygun esnek modellerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Çalışmada Groover'ın (2008) önerdiği matematik modeller indisli değişkenlerle genişletilmiş ve üretim sistemleri genellenerek değiştirilmiştir. Groover yığın üretim ve akış üretim için model önerse de önerdiği modeli akış mantığıyla geliştirmiştir. Çalışmada önerilen modelin farkı ise ürün ağacı tabanlı bir model olmasıdır. Bu sayede model akış tipi üretim, atölye tipi (yığın) üretim, proje tipi üretim ve hücresel imalat için sadeleştirilebilecek ya da genişletilebilecek düzeydedir.

Ürün ağacının yapısı önerilen modelde iki temel yaklaşımı beraberinde getirmiştir. Birincisi, ürünün alt seviyeleri üretilmeden ürün ağacında daha üst düzeydeki bileşenlerin üretilmemesidir. Bu yaklaşımın sonucu olarak, üretim çevrimi ürün rotasındaki darboğaz üzerinden hesaplanmaktadır. Üretim çevrimini bulmak için önce iş merkezlerinde veya tezgâhlarda geçen işlem sürelerinin belirlenmesi gerekmektedir. İşlem süresi T_o , iş merkezi w , işlem o , ürün ile bileşenleri i , iş merkezine malzemenin yüklenmesi için geçen süre $H_{w,o,i}$, iş merkezine (varsa) her işlem için yardımcı malzeme veya teçhizat bağlanması için geçen süre $TH_{w,o}$ ve birim miktarda üretim için işlemde geçen süre $PT_{w,o,i}^u$ ile ifade edilmiştir. Buna bağlı olarak işlem süresi Denklem 3.1.'de verilmiştir.

$$T_o(w, i) = H_{w,o,i} + TH_{w,o} + PT_{w,o,i}^u \quad (3.1)$$

İşlem süresi kullanılarak akış tipi üretimde ve sürekli sistemlerde darboğaz belirlenebilir, fakat atölye tipi üretim, proje tipi üretim ve hücreli imalatla darboğaz hesaplanırken sadece işlem süresi değil, malzemenin bekleme süresi ve hazırlık zamanları da gereklidir. Önerilen modelde iş merkezinde geçireceği süre en uzun olan ürün bileşeninin indisi $ix(i)$, ürün yayma işlemi sonunda hesaplanan üretim miktarı (a_i) ve işlemin gerçekleştirilebileceği iş merkezi veya makina sayısı (n_w) dikkate alınmıştır. İş merkezinde, işleme bağlı olarak yapılacak olan ek hazırlıkların hazırlık süresinin $STV_{w,o,i}$ ve üretim çevrimi içinde yapılması gereken ek hazırlıkların sayısı¹ σ_i olarak ifade edilmiştir. Sebebi her ne olursa olsun (taşıma, çizelgeleme kaynaklı bekleme vb.) iş merkezinin beklemesine neden olan tüm sürelerin toplamı işlemsiz geçen süre (T_{idle_j}) olarak belirtilmiştir. Bu parametreler kullanılarak ürün ağacının tüm bileşenlerinin birbirinden ayrı biçimde toplam üretim süreleri hesaplanmış ve toplam ek hazırlık süresi istasyon çevrim miktarına bölünerek Denklem 3.2.'de görüldüğü gibi çevrim süresi hesabı için darboğazın tespitinde kullanılmıştır. Hem darboğazın tespitinde hem de üretim çevriminin hesaplanmasında ihtiyaç duyulan istasyon çevrim

¹ Endirekt malzeme kullanılan işlerde, işlem bitmeden indirekt malzeme tükenirse yeni malzemenin iş merkezine sağlanması için hazırlık gerekmektedir. Hiç hazırlık gerekmeyen işlemlerde ise $\sigma_i = 0$ olacaktır.

miktarı, üretim miktarının iş merkezi sayısına oranı “ceil” fonksiyonu ile yukarı yuvarlanmasıyla hesaplanmıştır.

$$ix(i) = \operatorname{argmax} \left(\forall j \in i \ \& \ w \in R_j: \left(\operatorname{ceil} \left(\frac{a_j}{n_w} \right) T_o(w, j) + \frac{\sigma_i \operatorname{STV}_{w,o,j}}{\operatorname{ceil} \left(\frac{a_j}{n_w} \right)} + T_{idle_j} \right) \right) \quad (3.2)$$

Elde edilen indeks kullanılarak çevrim süresi (T_c) hesaplanmak istendiğinde Denklem 3.3. kullanılmalıdır. Üretim çevrimi, darboğaz iş merkezleri ve darboğazdan sonra gelen iş merkezleri içerisinde en büyük çevrime sahip olanın çevrim süresine eşittir. Üretim çevrimini iş merkezindeki beklemler etkilediği için modele eklenmiştir.

$$T_c(i) = \max(j, w \in ix(i): \operatorname{ceil} \left(\frac{a_j}{n_w} \right) T_o(w, j) + \frac{\sigma_i \operatorname{STV}_{w,o,j}}{a_j} + T_{idle_j}) \quad (3.3)$$

Modelin katkılarında bir tanesi üretim çevrimi hesaplanırken ürün bileşenlerinin birden fazla üretilebileceği ve alternatif iş merkezlerinde eş zamanlı üretim gerçekleştirilebileceğinin ön görülmesidir. Modelin bir diğer katkısı da üretim işlemi esnasında birden fazla hazırlık yapılabileceğinin ön görülmesidir. Ek hazırlıklar, toplam harcanan sürenin üretilen toplam ürün sayısına bölünmesiyle çevrime eklenmiştir. Çevrim ürün başına hesaplandığı için çevrim süresi belirlenirken toplam sürenin ortalaması kullanılmıştır. Ayrıca, darboğaz tespitinin aksine, çevrim süresi hesaplanırken işlemsiz geçen süre değerlendirilmemiştir. Çünkü çevrim süresi darboğaz olan makine ya da iş merkezindeki işlem süresine eşittir. Darboğaz rotaya ve (varsa) iş merkezindeki diğer işlerin durumuna bağlı olduğundan her ürünün çevrim süresi kendi rotasına bağlı olarak belirlenmiştir.

Toplam üretim süresinin hesaplanmasında çevrim süresi kullanılmaktadır. Çünkü üretim sistemi çevrim süresi boyunca bir ürün üretir. Fakat ilk ürünün hattan çıkması çevrim süresine değil istasyonlarda harcanan toplam süreye bağlıdır. Bu sebeple, üretim süresinin hesaplanabilmesi için ilk ürünün tüm işlemleri tamamlanana kadar geçen süre (T_{RLT}) hesaplanmalıdır. Sürenin hesabında kullanılan l parametresi ürün ağacının seviyesini ifade etmektedir. Ürünün hatta geçireceği süre hesaplanmak

isteniyorsa l bir olarak kabul edilmeli, daha alt bileşenlerin üretim süreleri hesaplanmak isteniyorsa l ilgili yarı mamul seviyesine karşılık gelen bir değer almalıdır. Ürün ağacının her bir seviyesindeki bileşenleri $\beta_{i,l}$ ile ifade edildiğinde T_{RLT} Denklem 3.4.'te görüldüğü gibi hesaplanabilir.

$$T_{RLT}(i,l) = \max \left(\forall j \in \beta_{i,l} \ \& \ w, o \in \beta_{i,l} : (T_o(w,i) + ST_{w,o,i}) \right) + (T_{RLT}(j,l + 1) \mid (\beta_{j,l+1} \neq \emptyset)) \quad (3.4)$$

Ürünün hatta geçireceği süre, ürün ağacının en alt seviyesinden en üst seviyesine kadar her seviyedeki bileşenlerin toplam üretim sürelerinin en büyüğü ile bağlı oldukları üst bileşenin üretim süresiyle toplamı hesaplanarak bulunur. Hatta geçen süre çevrim zamanı ile birlikte kullanıldığında imalat ön süresi (T_{MLT}) elde edilebilir. İmalat ön süresi, Denklem 3.5.'te görüldüğü gibi, ürünün hatta geçireceği süre ve üretilecek toplam ürün sayısının (n_i) bir eksiği ile çevrim süresinin çarpımı toplanarak hesaplanır. Sadece bir adet ürün üretileceği zaman imalat ön süresi ile ürünün hatta geçireceği süre eşit olacaktır.

$$T_{MLT}(i) = (n_i - 1)T_c(i) + T_{RLT}(i, 1) \quad (3.5)$$

3.2. Etki, Etkinlik ve Verimlilik

Üretim sistemlerinin performansının ölçülmesi için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Ele alınması gereken, en yaygın parametreler etki, etkinlik ve verimliliktir. Etki bir iş merkezinin, üretim hızına bağlı olarak, üretim sistemine sağlayacağı katkıdır. Bir iş merkezinin üretim hızı (R_p), Denklem 3.6.'da görüldüğü gibi, işlem süresi ile ters orantılı olarak hesaplanır.

$$R_p(w, o, i) = \frac{1}{T_o(w,i)} \quad (3.6)$$

Üretim hızı ürün seviyesinde hesaplanmak istendiğinde ürünün hatta geçirdiği süre ve çevrim süresi göz önünde bulundurulmalıdır. İlk ürün hatta geçen süre kadar

beklenecek, sonrasında çevrim süresinde bir ürün üretilecektir. Hatta geçen sürenin sebep olacağı gecikme üretilen ürünlere eşit miktarda paylaştırıldığında, üretim miktarı yakalanana kadar ulaşılacak üretim hızı Denklem 3.7.'de görüldüğü gibi hesaplanmış olacaktır.

$$R_p(i) = \frac{1}{T_c(i) + \frac{T_{RLT}(i,1)}{n_i}} \quad (3.7)$$

Bir iş merkezinin etkinliği (A) iş merkezinin etkinliğini göstermektedir. Denklem 3.8.'de iş merkezinin çalıştığı sürenin arızalar arasındaki toplam süreye (MTTF) oranı olarak hesaplanmıştır. Çalışılmayan süre, planlı duruşların dışında kalan, genellikle arıza duruşların neden olduğu süre olduğundan ortalama tamir süresi (MTTR) çalışılmayan sürenin tamamı olarak kabul edilebilir. Çünkü etkin süre içerisinde planlamadan kaynaklanan duruşlar sistemin etkinliğiyle alakalı değildir. Etkin süre sistemin üretim için hazır olduğu süredir.

$$A = \frac{MTTF - MTTR}{MTTF} \quad (3.8)$$

Arızalar arası süre arıza oranı (λ) ile ters orantılıdır. Arıza oranı, arıza sayısı (n_f) toplam çalışılan süreye (T_a) oranlanarak Denklem 3.9.'daki gibi bulunur.

$$\lambda = \frac{n_f}{T_a}, \quad MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.9)$$

Verimliliği hesaplamak için üretim kapasitesine (PC) ihtiyaç vardır. Denklem 3.10.'da verilen üretim kapasitesi, üretim hızı ile planlama ufkunun (T_{ph}) çarpımına eşittir.

$$PC = R_p T_{ph} \quad (3.10)$$

Verimlilik, Denklem 3.11.'de toplam ürün sayısının üretim kapasitesine (PC) oranı olarak gösterilmiştir.

$$U = \frac{n_i}{PC} \quad (3.11)$$

Verimliliği etkileyen unsurlar planlı duruşlar, kalite kontrolden geçememe veya üretim hataları nedeniyle oluşan hurdalar ya da yeniden işlem görmesi gereken ürün bileşenleridir. Hurda olan ürünlerin oranı (R_s) ve yeniden yapılması gereken işlem süresinin toplam zamana oranı (R_r) verimliliği olumsuz etkilemektedir (Matthew ve Meyers, 2013). Toplam üretim ihtiyacının (n_r) belirlenmesi için Denklem 3.12.'deki gibi üretilmesi gereken ürün sayısı, sağlam üretilen ürün oranına bölünür. Eğer birden fazla işlemde hurda söz konusu ise her işlem (n_o) için hurda oranların çarpımına bölünür.

$$n_r = \frac{n_i}{\prod_j^{n_o} (1-R_{s,j})} \quad (3.12)$$

Bu durumda üretim kapasitesi toplam üretim ihtiyacına eşit olurken gerçekleşen üretim miktarı toplam sipariş (üretim) miktarı kadar olacaktır. Yeniden işlem süresi (T_r) ise verimliliği toplam üretim zamanına bağlı olarak düşürecektir. Yapılması gereken toplam yeniden işlem miktarı Denklem 3.13.'te iş merkezlerindeki yeniden işlem ihtiyaçlarının toplamı veya toplam sürenin yeniden işlem oranı ile çarpımı olarak gösterilmiştir.

$$T_r = \frac{PC R_r}{R_p} = T_{ph} R_r \quad (3.13)$$

Hurda oranı ve yeniden işlem süresi verimlilik formülüne uygulandığında, formül Denklem 3.14.'te verildiği gibi olmaktadır. Sipariş miktarı kadar ürünü üretmek için kullanılması gereken kapasite hurda oranına ve yeniden işlem süresine bağlı olarak artacaktır. Hurda oranına göre değişim miktarı toplam üretim ihtiyacından sipariş miktarı çıkarılarak hesaplanmaktadır. Yeniden işlem süresince kullanılacak kapasite ise yeniden işlem süresi ile üretim hızının çarpımıyla bulunmaktadır. Bulunan bu farklar üretim kapasitesi ile toplandığında sipariş miktarı kadar ürünü üretmek için harcanan kapasite elde edilmektedir.

$$U = \frac{n_i}{PC+n_r-n_i+T_rR_p} \quad (3.14)$$

3.2.1. Masa örneği

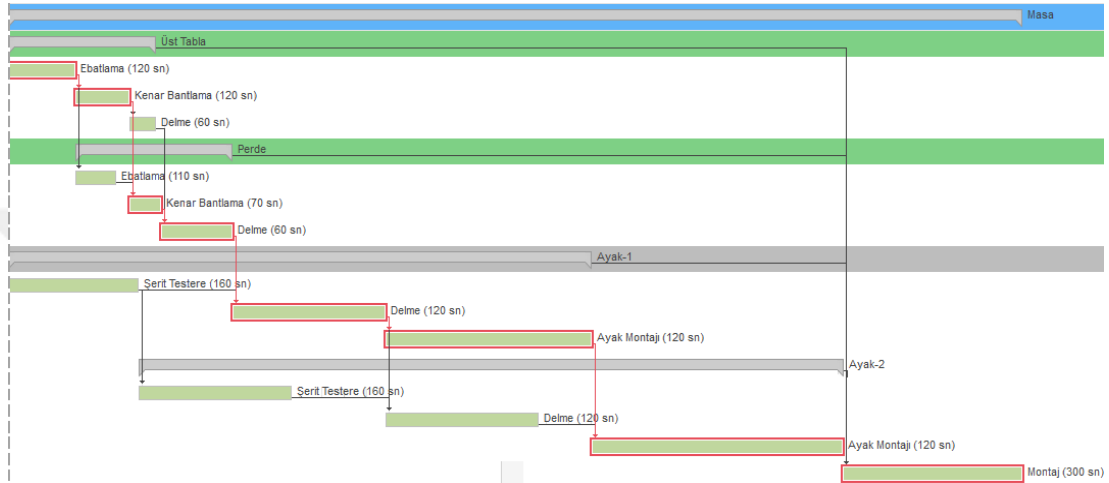
Önerilen matematik model Tablo 3.1.'de verilen masa ürün ağacı üzerinde uygulanarak açıklanmıştır. Masanın basit bir ürün olması modelin kısaca açıklanması için seçilmesinde etken olmuştur.

Tablo 3.1. Masa ürün ağacı

Ürün Ağacı	Miktar	İşlemler
1. Masa	1 Adet	Montaj (5 dk.)
1.1. Üst Tabla	1 Adet	Ebatlama (100 sn.), Kenar Bantlama (120 sn.), Delme (60 sn.)
1.1.1. PVC	6 m	
1.1.2. Suntalam	2 m ²	
1.2. Perde	1 Adet	Ebatlama (90 sn.), Kenar Bantlama (70 sn.), Delme (60 sn.)
1.2.1. PVC	2.6 m	
1.2.2. Suntalam	0.8 m ²	
1.3. Metal Ayak Komplexi	2 Adet	Şerit Testere (140 sn.), Delme (120 sn.), Ayak Montajı (120 sn.)
1.3.1. Alüminyum Sac	3.6 m	
1.3.2. Bağlantı elemanı	4 Adet	
1.3.3. Vida	19 Adet	

Ebatlama ve şerit testere işlemlerinde malzemenin makinaya yüklenmesi 20 saniye sürmektedir. Delme işlemindeki hazırlık süresi de 120 saniyedir. 3.1'de verilen formüle göre işlem zamanı makine, parça bağlama ve takım bağlama sürelerinin toplamına eşittir. Masa örneğinde parça bağlama süresi ebatlama işlemi için verilmiş, diğerlerinde ihmal edilmiştir. Verilenlere göre işlem süreleri hesaplandığında üst tabla için ebatlamada harcanan süre 120 saniye, perde için 110 saniye. ve metal ayak kompleksi için de 160 saniyedir. Her işlem için sadece bir tezgah ya da iş merkezi olduğu varsayılırsa işlem süreleri Şekil 3.2.'deki gibi olacaktır. 3.3'te verilen formülde çevrim süresi hesaplanırken ürün ağacındaki miktarın makine veya iş merkezi sayısına oranı dikkate alındığından metal ayak kompleksinin tüm işlemlerinin çevrim süresi

işlem süresinin iki katı olacaktır. Fakat parçalar iş merkezlerinde tek tek işleneceği için bir önceki işlemin çevrimi tamamlanmadan bir sonraki işleme başlanabilmektedir. Bu durumun oluşma nedeni çevrimin ürün ağacındaki işlemin tamamlanması olarak görülmektedir. Çünkü parçalar tek tek üretilse de iş emrinin tamamlanması ihtiyaç duyulan miktarın üretilmesine bağlıdır ve her ürünün üretiminde mutlaka çevrim süresi kadar kapasite kullanımı gerçekleşecektir.



Ürünün çevrim süresinin hesaplanabilmesi için darboğaz iş merkezinin belirlenmesi gerekmektedir. Darboğaz iş merkezinin belirlenmesi Denklem 3.2.’de belirtildiği gibi ek hazırlık süresi, işlem süresi ve işlemsiz geçen sürelerinin toplamı en fazla olan iş merkezi darboğazdır. Darboğazı belirlemenin pratik bir yolu da her iş merkezindeki son işlemin bitişi ile ilk işlemin başlama anı arasındaki farkları karşılaştırmaktır.

Masanın ve alt bileşenlerinin üretim süreci boyunca uğrayacağı iş merkezlerinin yer aldığı çizelge Tablo 3.2.’de verilmiştir. Saniye cinsinden oluşturulan çizelgenin başlangıç anı 0 kabul edilmiştir. Çizelgeye göre darboğaz iş merkezi 370 saniye iş yüküyle “Delme” olmuştur. Bunun için çevrim süresi delme ve sonrasındaki iş istasyonlarında aranacaktır. Tablodaki sütunların sıralaması üretim rotasına göre yapıldığı için delme sütununun sağında ayak montajı ve masa montajına yer verilmiştir.

² Kritik yol üzerinde olan işlemler kırmızı dikdörtgen içine alınmıştır.

Tablo 3.2. İlk masanın üretim çizelgesi

Ürün	Ebatlama		Kenar Bantlama		Şerit Testere		Delme		Ayak Montajı		Montaj	
	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş
Üst Tabla	0	120	120	240			240	300				
Perde	120	230	240	310			310	370				
Ayak-1					0	160	370	490	490	610		
Ayak-2					160	320	490	610	610	730		
Masa											730	1030
Toplam Süre	230		190		320		370		240		300	

Çevrim süresi hesaplanırken darboğaz iş merkezi ve sonrasındaki iş merkezlerinde işlem yapılarak veya işlemsiz geçen toplam süre incelenecektir. İşlemsiz geçen zamanın incelenebilmesi için, Tablo 3.3.'te görülen, ikinci ürünün üretim çizelgesinin incelenmesi gerekmektedir.

Tablo 3.3. İkinci masanın üretim çizelgesi

Ürün	Ebatlama		Kenar Bantlama		Şerit Testere		Delme		Ayak Montajı		Montaj	
	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş
Üst Tabla	230	350	350	470			610	670				
Perde	350	460	470	540			670	730				
Ayak-1					320	480	730	850	850	970		
Ayak-2					480	640	850	970	970	1090		
Masa											1090	1390
Toplam Süre	230		190		320		360		240		300	

İş merkezinin işlemsiz geçen süresi bir önceki işlemin bitiş anı ile bir sonraki işlemin başlangıcı arasındaki süredir. Buna göre ayak montajında 120 saniye, masa montajında ise 60 saniye işlemsiz geçen süre vardır. Ayak için ihtiyaç duyulan çevrim miktarı iki olduğundan ayak başına düşen işlemsiz süre 60 saniyedir. Delme işleminde ise hiç işlemsiz geçen süre yoktur. Delme işleminin çevrimi 120 saniye, ayak montajının 240 saniye ve masa montajının çevrimi de 300 saniyedir. İşlemsiz geçen

süreler dikkate alındığında delme işlemi çevrimi 120 saniye, ayak montajı 300 saniye ve masa montajı 360 saniye olmaktadır.

İş merkezlerinin çevrim süreleri dikkate alındığında, ürünün çevrim süresinin 360 saniye olduğu anlaşılmaktadır. Bu süre, aynı zamanda, darboğaz istasyonun bir ürünün üretimi için çalışması gereken toplam süreye eşittir. Fakat üretim, ürün ağacı temelinde değerlendirildiğinde, çevrim süresi işlem süreleri ve işlemsiz geçen süreler kullanılarak hesaplanmaktadır. Üretimin ürün ağacı temelinde değerlendirilmesinin temel nedenlerinden biri, karışık ürün üretilen hatlarda makinaların aynı ürünü ardışık olarak işleyememe ihtimalidir. Özellikle üretimde dijitalleşmenin temel hedeflerinden biri olan kitlesel özelleştirmeyi gerçekleştirirken benzer durumların oluşması kaçınılmazdır.

İş merkezlerine gelen işler sürekli, yığın veya akış olarak üretilmediğinde çizelgeleme yaklaşımı kritik yol, yığın veya akış olarak üretildiğinde ise darboğaz temelli olmalıdır. Çünkü bir ürün sadece bir kez üretildiğinde, Şekil 3.2.'de kırmızı dikdörtgen ile belirtilen, kritik yolun aksaması üretimin gecikmesine neden olur. Bu durum karışık üretim yapılan montaj hatlarında veya proje tipi üretimde görülmektedir. Seri üretim veya yüksek hacimli üretimlerde ise çevrim süresi ana etken olacağından, gecikmeyi tamamen darboğaz belirlemektedir. Bundan dolayı çevrim süresi darboğaz ve sonrasındaki iş merkezlerinde aranmakta, fakat üretimin tamamlanma süresi hesaplanırken, Denklem 3.4.'te ve Denklem 3.5.'te belirtildiği gibi, bir ürünün üretilme süresi hesaplanmakta, sonrasında çevrim süresi kullanılmaktadır. Masa örneğinde, darboğaz istasyonun toplam işlem süresi de çevrim süresi gibi görülmektedir. Fakat birden fazla çeşit ürünün üretildiği ortamlarda hem darboğazın ürün temelinde değişebileceği hem de darboğaz istasyonda farklı ürünlere ait işler olacağı için, çevrim süresi darboğaz ve sonrasındaki istasyonlarda aranmalıdır.

Ürün ağacı temelli yaklaşım çizelgelemenin karakterine uygun olmasıyla birlikte farklı üretim yaklaşımlarına da uyum sağlamaktadır. Bu sayede akış tipi üretim, atölye tipi üretim, hücresel imalat ve proje tipi üretimde darboğaz, çevrim süresi, imalat ön süresi

ve hatta kalma süresi rahatlıkla hesaplanabilir. Ayrıca, karışık üretim yapan sistemler de kolaylıkla modellenebilir.

3.3. İtme Sistemi

İtme sistemi üretim sürecine planlama ile başlayan ve parti büyüklüklerinin planlara bağlı olarak değiştiği bir sistemdir. İtme sistemi lojistik maliyetleri ve tedarik zincirinde çevrim sürelerinin dengesizliği gibi sebeplerden dolayı stoklu çalışır. İtme sisteminde, tutulan stoğun planlama ufku içerisindeki ihtiyaçları karşılayacağı belirsiz olduğundan; talep, hurda ve yeniden işlem gibi değişkenliğe neden olan faktörlere karşın ek stoklar tutulmaktadır. Tutulan stoklar değişkenliği yönetmek için ek maliyetlere katlanılmasına neden olmaktadır. Fakat katlanılan maliyet itme sisteminin esnek çalışmasına imkân tanımaktadır. Bu sayede itme sistemi stoka, montaja ve siparişe üretim yapmaya olanak sağlamaktadır.

3.3.1. Talep yönetimi

İtme sisteminde değişkenliğin yönetimi talep yönetimi ile başlamaktadır. Stoka ve montaja üretim yapan sistemlerde müşteri talebi oluşmadan üretime başlanmak zorundadır. İtme sistemi olarak çalışan tüm üretim sistemlerinde tahmine dayalı hareket edilmese de, talep tahmini itme sisteminin önemli bir sürecidir. Bu sürecin en önemli sorunu tahmin hatalarıdır. Tahmin hatalarının en aza indirilmesi için tahmin karakteristiğine uygun yöntemler geliştirilmiştir. Müşteri talepleri, çeşitli kategorilere ayrılrsa da, çok yaygın olarak değerlendirilen üç kategori altında incelenebilir. Bu kategoriler aşağıda verilmiştir.

- a. Sabit zaman serili talepler.
- b. Eğilimli (trend) talepler.
- c. Mevsimsel talepler.

3.3.1.1. Sabit zaman serili talepler

Sabit zaman serili talepler belirli bir ortalama ve sapma ile oluşan taleplerdir. Sabit zaman serili talepler, zaman içerisinde, ortalamanın belirli miktar altında ve üzerinde değiştikleri için Denklem 3.15.'teki gibi ifade edilmektedir. D_t oluşan talep, D ortalama talep ve ε_t ise talepteki sapmadır.

$$D_t = D + \varepsilon_t \quad (3.15)$$

Sabit zaman serili talep tahmini için yaygın kullanılan yöntemler hareketli ortalama, ağırlıklı ortalama ve basit üstel düzeltmedir. Hareketli ortalama, mevcut dönemden belirtilen dönem uzunluğu kadar önceki dönemlerde oluşan talebin ortalamasını kullanır. Denklem 3.16.'da görüldüğü gibi, mevcut dönemin talep tahmini (F_t) belirli bir dönem (n) içerisindeki taleplerin (D_{t-i}) ortalaması alınarak bulunmuştur.

$$F_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{t-i} \quad (3.16)$$

Denklem 3.17.'de verilen ağırlıklı ortalama ise belirli bir dönem içerisindeki taleplerin belirlenen ağırlıklarla (w_{t-i}) çarpımlarının toplamıdır. Ağırlıklı ortalama hesaplarken dikkat edilmesi gereken husus ağırlıkların toplamının 1 olması zorunluluğudur.

$$F_t = \sum_{i=1}^n w_{t-i} D_{t-i} \mid \sum_{i=1}^n w_{t-i} = 1 \quad (3.17)$$

Basit üstel düzeltmenin farkı da tahmin değerinin önceki dönemde gerçekleşen talep ile tahmin arasındaki farkın (hatanın) bir hata katsayısı (α) oranınca son tahmin değerine eklenmesiyle Denklem 3.18.'deki gibi hesaplanmasıdır.

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(D_{t-1} - F_{t-1}) \quad (3.18)$$

Sabit zaman serili talep tahmini yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmak için Tablo 3.4.'te verilen veriler kullanılmıştır. Tablodaki veriler herhangi bir eğilimi olmaksızın sadece bir ortalamaya bağlı olarak değişmektedirler.

Tablo 3.4. Talep verisi

Hafta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talep	80	90	86	92	93	81	88	79	81	92

Talep verisine bağlı olarak 2 dönem için hareketli ortalama, 0,4 ve 0,6 değerleri ile yapılan ağırlıklı ortalama ile α değeri 0,5 olan basit üstel düzeltme yöntemleri kullanılarak talep tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin performansını ölçmek için ortalama mutlak hata (MAD), ortalama kareli hata (MSE) ve ortalama yüzde hata (MAPE) kullanılmıştır.

Tablo 3.5.'te görüldüğü gibi mevcut talep verileri için hareketli ortalama ile yapılan tahminin ortalama mutlak hatası 5,375 olmuştur. Kareli hatası 52,428 ve ortalama yüzde hatası da %6,26 olarak gerçekleşmiştir. Hareketli ortalama, bu değerlerle, ağırlıklı ortalama dan biraz daha kötü; basit üstel düzeltmeden ise biraz daha iyi bir performans sergilemiştir. Tahmin yöntemlerinin performansları gerçek zamanlı karşılaştırılabileceği gibi, yeni başlanacak bir çalışmada geçmiş veriler üzerindeki performansa göre seçim yapılmalıdır. Tahmin yönteminin performansı değerlendirilirken MAD hata miktarının, MSE sapmanın ve MAPE de hata yüzdesinin anlaşılmasını sağlayacaktır.

Tablo 3.5. Hareketli ortalama tahmin performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
86	85	1	1	1,162790698
92	88	4	16	4,347826087
93	89	4	16	4,301075269
81	93	12	144	14,81481481
88	87	1	1	1,136363636
79	85	6	36	7,594936709
81	84	3	9	3,703703704
92	80	12	144	13,04347826
ORTALAMA		5,375	52,42857143	6,263123647

Ağırlıklı ortalamanın tahmin performansı, Tablo 3.6.'da görüldüğü gibi, kullanılan yöntemlerin performansları arasında en iyi performans olmuştur. Ağırlıklı ortalama da hem hata miktarı, hem sapma hem de hatanın yüzdesi en küçük değerleri almıştır.

Tablo 3.6. Ağırlıklı ortalama tahmin performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
86	86	0	0	0
92	88	4	16	4,347826087
93	90	3	9	3,225806452
81	93	12	144	14,81481481
88	86	2	4	2,272727273
79	85	6	36	7,594936709
81	83	2	4	2,469135802
92	80	12	144	13,04347826
ORTALAMA		5,125	51	5,971090675

Basit üstel düzeltme ile yapılan tahmin en kötü performansı sergilemiştir. Tablo 3.7.'de görülen MAD, MSE ve MAPE değerlerine göre ortalama mutlak hatada en iyi performansın yaklaşık %15, kareli hatada %4,17 ve ortalama yüzde hatada %14 daha kötü sonuç elde edilmiştir.

Tablo 3.7. Basit üstel düzeltme tahmin performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
90	80	10	100	11,11111111
86	85	1	1	1,162790698
92	86	6	36	6,52173913
93	89	4	16	4,301075269
81	91	10	100	12,34567901
88	86	2	4	2,272727273
79	87	8	64	10,12658228
81	83	2	4	2,469135802
92	82	10	100	10,86956522
ORTALAMA		5,888888889	53,125	6,797822866

Tahmin performansındaki değişimin oranına bakıldığında tahmin yöntemlerinin yaklaşık aralıklarda sonuç ürettiği fakat doğru talep miktarına en yakın sonuçları üreten algoritmanın ağırlıklı ortalama olduğu görülmektedir. Ağırlık değerleri 0,4 ve 0,6 olduğu göz önünde bulundurulduğunda bir önceki haftada gerçekleşen talebin mevcut talep üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

3.3.1.2. Eğilimli talepler

Sabit zaman serili talepler zaman (t) ile orantılı bir değişim (a) gösterirlerse eğilimli talep haline dönüşürler. Eğilimli talepler, her ne kadar dalgalanma gösterebilirler de, toplamda artış ya da azalma gösterirler. Her iki durumun da oluşması mümkün değildir. Eğilimli taleplerdeki bu değişim Denklem 3.19.'da gösterilmiştir.

$$D_t = D + at + \varepsilon_t \quad (3.19)$$

Eğilim olan taleplerin tahmininde doğrusal regresyon ve çift üstel düzeltme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal regresyon Denklem 3.20.'de görüldüğü gibi bir bağımlı değişken (y), bir bağımsız değişken (x), bağımsız değişkenin katsayısı (a) ve sabit sayıdan (b) oluşur.

$$y = ax + b \quad (3.20)$$

Doğrusal regresyonun amacı x parametresinin değerlerine bağlı olarak üretilen y değerleri ile gerçekte oluşan talep arasındaki kareli farkları en aza indirmektir. Bunu sağlamak için Denklem 3.20.'de verilen doğrusal bağıntıyı oluşturacak a ve b değerleri hesaplanmalıdır. b değeri Denklem 3.21.'de hesaplanırken ortalama talep ($\bar{y}$), bağımsız değişkenin (genellikle zaman) ortalaması ($\bar{x}$) ve planlama ufku n olarak kabul edilmiştir.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (3.21)$$

Sabit sayı (b) ise a, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ değerleri kullanılarak Denklem 3.22.'deki gibi hesaplanmaktadır. a ve b parametrelerinin değerlerinin belirlenmesiyle elde edilen doğrusal denklem bağımsız değişken ile talebin tahmin edilmesini sağlayacaktır.

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (3.22)$$

Çift üstel düzeltme yönteminde belirli bir dönem için (t) tahmin yaparken, Denklem 3.23.'de görüldüğü gibi, bir önceki dönemin tahmini (F_{t-1}) ile gerçekleşen talebin (D_{t-1}) α ve $1 - \alpha$ ile ağırlıklı ortalaması (a_{t-1}) hesaplanır.

$$a_{t-1} = \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha) F_{t-1} \quad (3.23)$$

Son iki a değeri arasındaki fark ve bir önceki eğilim parametresinin (b_{t-1}) değerlerinin β ve $1 - \beta$ ile ağırlıklı ortalaması kullanılarak eğilim parametresi b_{t-1} Denklem 3.24.'deki gibi hesaplanır.

$$b_{t-1} = \beta(a_{t-1} - a_{t-2}) + (1 - \beta)b_{t-2} \quad (3.24)$$

Denklem 3.25.'de, hesaplanan a ve b değerlerinin toplamı ile tahmin değerinin bulunduğu görülmektedir. Çift üstel düzeltmenin basit üstel düzeltmeden bir farkı hata parametresi yerine tahmin ve gerçekleşen talebin ağırlıklı ortalamasını kullanmasıdır. Diğer bir farkı da eğilim parametresinin (b_{t-1}) kullanılmasıdır.

$$F_t = a_{t-1} + b_{t-1} \quad (3.25)$$

Doğrusal regresyon ve çift üstel düzeltme yöntemleri Tablo 3.8.'deki eğilimli talep verisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. MAD, MSE ve MAPE performans parametreleri ile hata miktarı, sapması ve oranı kıyaslanmıştır.

Tablo 3.8. Talep verisi										
Hafta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talep	80	90	110	105	120	122	118	130	125	140

Talep verileri kullanılarak elde edilen doğrusal regresyon denkleminde bağımsız değişkenin katsayısı yaklaşık 5,61 ve sabit parametrenin değeri 83,13'tür. Bu denklem kullanılarak gerçekleştirilen tahminin performansı Tablo 3.9.'da görülmektedir. Doğrusal regresyon yöntemi kareli hatayı en aza indirecek doğrusal denklemi sağladığı için, eğilim olan taleplerde sapmayı düşürecek biçimde tahmin yapmayı sağlamaktadır.

Tablo 3.9. Doğrusal Regresyon Tahmin Performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
80	89	9	81	11,25
90	94	4	16	4,444444444
110	100	10	100	9,090909091
105	106	1	1	0,952380952
120	111	9	81	7,5
122	117	5	25	4,098360656
118	122	4	16	3,389830508
130	128	2	4	1,538461538
125	134	9	81	7,2
140	139	1	1	0,714285714
ORTALAMA		5,4	45,11111111	5,01786729

Tablo 3.10.'da α parametresinin değeri 0,5 ve β parametresinin değeri 0,2 kabul edilerek çift üstel düzeltme yöntemi ile yapılan talep tahmininin performansı görülmektedir. Çift üstel düzeltme yöntemi ile doğrusal regresyon yöntemi arasında ortalama mutlak hata ve ortalama yüzde hata açısından fazla bir fark yoktur. Fakat doğrusal regresyon yönteminin kareli hatası çift üstel düzeltme yönteminin hatasının yarısı kadardır.

Tablo 3.10. Çift üstel düzeltme tahmin performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
110	93	17	289	15,45454545
105	107	2	4	1,904761905
120	111	9	81	7,5
122	122	0	0	0
118	129	11	121	9,322033898
130	129	1	1	0,769230769
125	135	10	100	8
ORTALAMA		7	90,28571429	5,904535789

3.3.1.3. Mevsimsel talepler

Eğilimli taleplerin belirli zaman aralıklarında (T) farklı karakteristik özellikler sergilemesiyle ($c_t \bmod T$) mevsimsellik meydana gelmektedir. Mevsimsel talep 3.26'da görüldüğü gibi her mevsimde farklı eğilimler oluşacak biçimde $c_t \bmod T$ mevsimsellik etki parametresi ve ε_t hata payı ile değişmektedir.

$$D_t = (D + at)c_t \bmod T + \varepsilon_t \quad (3.26)$$

Mevsimsel talebin tahmininde Winter metodu ve trigonometrik modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Winter metodu ile talep tahmini yaparken üç ayrı parametre hesaplanır.

Winter metodu Tablo 3.11.'de görülen talep verileri üzerinde kullanılmıştır. Talep verisi ardışık dönemler halinde değişkenlik göstermektedir. Mevsimler dörder haftalık kümeler halinde olacak biçimde birinci dört hafta, ikinci dört hafta, üçüncü dört hafta ve dördüncü dört haftalık dönemi kapsamaktadırlar. Uygulamada, mevsimsel talepler karışık sıralanabilir. Yani birinci hafta bir mevsime aitken ikinci hafta başka bir mevsime ait olabilir. Bu durum tahmin algoritmasının performansını etkilemeyecektir.

Tablo 3.11. Talep verisi

Hafta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talep	220	232	213	240	180	175	182	168	130	135
Hafta	11	12	13	14	15	16				
Talep	125	137	110	90	103	118				

Mevsimsel talep, Winter metodunun α değeri 0.1, β değeri 0.2 ve Y değeri 0.99 olacak biçimde tahmin edilmiştir. Tablo 3.12.'de görülen tahmin performansına göre, talep miktarının yüksek olduğu dönemlerde daha fazla hata yapılmıştır. α ve β değerlerinin artması yapılan hatayı artıracaktır. Y değeri ise mevsimsel talebin yakalanması için önemli bir parametredir. Bu değer arttıkça mevsimsel talebin karakteristiği daha fazla yansıtılmaktadır. Bundan dolayı α , β ve Y değerleri talebin mevsimsel tabandaki sapmasına bağlı olarak belirlenmelidir. Eğer sapma miktarı büyükse Y biraz daha küçük α ve β değerleri ise biraz daha büyük alınabilir.

Tablo 3.12. Winter Metodu Performansı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
232	339	107	11449	46,12068966
213	277	64	4096	30,04694836
240	293	53	2809	22,08333333
180	227	47	2209	26,11111111
175	208	33	1089	18,85714286
182	208	26	676	14,28571429

Tablo 3.12. Devamı

TALEP	TAHMİN	MAD	MSE	MAPE
168	188	20	400	11,9047619
130	143	13	169	10
135	147	12	144	8,888888889
125	134	9	81	7,2
137	146	9	81	6,569343066
110	116	6	36	5,454545455
90	94	4	16	4,444444444
103	107	4	16	3,883495146
118	122	4	16	3,389830508
ORTALAMA		27,4	2328,7	14,6160166

3.3.2. Stok yönetimi

İtme sisteminde planlama, planlama ufku içerisinde yapıldığı için planlama sürecinde, planlama ufku boyunca oluşacak değişkenliğin yönetimi de göz önünde bulundurulur. Değişkenliğin etkisinin en aza indirilmesi için planlama ufku kısaltılabilir, planlama değişkenlik göz önünde bulundurularak yapılabilir veya fason üretim gibi stratejilerle tedarik zincirinin ve üretim sisteminin yapısı iyileştirilebilir. Tedarik zincirinin düzenlenmesi büyük bir ekonomik güç gerektirmektedir. Tüm işletmelerin böyle bir imkânı yoktur. Planlama ufkunu kısaltmanın ve planlamada değişkenliği göz önünde bulundurmanın ise maliyeti vardır. Planlama açısından önemli olan işletmenin stratejik hedeflerinden ayrılmadan maliyeti en uygun stratejiyi seçmesidir. Planlama ufkunu kısaltmak daha sık sipariş vermek anlamına geleceği için sipariş maliyeti (nakliye vb.) artacaktır. Planlamayı değişkenliğe göre yapınca stok tutmak hesaba katarak oluşturmak gerekecektir. Bu durum stok tutma maliyetine neden olacaktır. Stok yönetimi açısından önemli olan planlama ufku ile stok tutma maliyeti arasındaki dengeye göre karardır. Karar sürecinde cevaplanması gereken ilk soru ne zaman sipariş verileceğidir. En az stok tutma maliyetine katlanarak sipariş vermek için siparişin geliş anıyla eldeki stoğun tükenme anının aynı olması gerekmektedir. Bunun için stok miktarının ortalama talebe oranı tedarik ön süresine eşit olduğu anda sipariş verilmektedir.

Sipariş verilen stok miktarı yeniden sipariş noktası (ROP) olarak adlandırılmaktadır. Yeniden sipariş noktası hesaplanırken ortalama talep (tüketim) kullanıldığı için, talepteki sapmaya bağlı olarak, ortalamanın üzerinde tüketim olduğunda yok satma gerçekleşmektedir. Yok satmanın önüne geçebilmek için talepteki sapma göz önünde bulundurularak emniyet stoğu tutulmaktadır. Emniyet stoğunun miktarını belirlerken tedarik ön süresi (L) boyunca oluşacak sapma (σ_d) talebin sapması (σ) kullanılarak Denklem 3.27.'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_d = \sigma\sqrt{L} \quad (3.27)$$

Hesaplanan sapma değeri çevrim hizmet düzeyini sağlamamız için gerekli standart normal değerle (Z) çarpılarak emniyet stoğu (ss) miktarının hesaplanması Denklem 3.28.'de verilmiştir. Çevrim hizmet düzeyi ile emniyet stoğu arasında üstel bir bağıntı vardır. Beklenen çevrim hizmet düzeyi arttıkça tutulacak emniyet stoğu miktarı üstel olarak artmaktadır.

$$ss = \sigma_d Z \quad (3.28)$$

Emniyet stoğunun miktarı kullanılarak yeniden sipariş noktası belirlenecektir. Yeniden sipariş noktası tedarik ön süresi ile ortalama talebin ($\bar{D}$) çarpımına emniyet stoğu miktarının eklenmesiyle Denklem 3.28.'de görüldüğü gibi belirlenir.

$$ROP = \bar{D}L + ss \quad (3.29)$$

Tablo 3.4.'te görülen sabit zaman serili talebin standart sapması yaklaşık olarak 5,25'tir. Tedarik ön süresi iki hafta kabul edilirse, Denklem 3.27.'de verilen dmnemin standart sapması, talebin standart sapması (σ_d) ve tedarik ön süresi olan iki haftanın karekökü ile çarpımı olacaktır. σ_d yaklaşık 7,42'dir. %98 güvenle emniyet stoğu hesaplanmak istendiğinde, normal dağılıma göre %98 değerini sağlayacak olan standart normal değer (2,053749), Denklem 3.28.'de görüldüğü gibi, σ_d ile çarpıldığında 16 adet masanın emniyet stoğu olarak tutulması gerektiğini görülmektedir. Masayı satan bir bayinin ya da mağazanın haftalık talebi makul bir

hizmet seviyesinde karşılayabilmesi için Denklem 3.29.'da verilen yeniden sipariş noktasını ortalama talep (86,2) ve emniyet stoğunun toplamı olan 102 olarak belirlemelidir. Stokta 102 adet masa kaldığında sipariş açılması gerekmektedir. Sipariş verilecek en düşük miktar tedarik süresi ile ortalama talebin çarpımıdır. Bu miktardan daha fazla sipariş vermenin gerekliliği ise miktar belirleme kuralları ile irdelenecektir.

Tablo 3.8.'de verilen eğilimli talep verilerinin sapması 17,3, ortalaması ise 114'tür. Buna göre emniyet stoğu 51 yeniden sipariş noktası ise 279 olmaktadır. Toblo 3.11.'de verilen mevsimsel talebin sapması 46,68 ve ortalaması da 159,88'dir. Mevsimsel talep için ihtiyaç duyulan emniyet stoğu 136 ve yeniden sipariş noktası ise 456'dır. Sapmanın artması emniyet stoğu miktarını ve yeniden sipariş noktasını artırmakta, ortalamanın artması ise yeniden sipariş noktasının artmasına neden olmaktadır. Sapmayı azaltmak için eğilim olan durumda belirli bir zaman aralığına göre emniyet stoğu hesaplanabilir. Zaman aralığı, talep verisine bağlı olarak kümeleme analizi ile belirlenebilir. Ortalama küme uzunluğu ya da en fazla küme uzunluğu kabul edilebilir. Kullanılabilecek başka bir yöntem ise eğilim çizgisinin eğimine en yakın ortalama eğimi verecek zaman aralığını bir haftadan dönem uzunluğuna kadar deneyerek bulmak olacaktır. Mevsimsel talepte sapma azaltılmak istendiğinde emniyet stoğunun mevsime özgü belirlenmesinin katkısı olacaktır. Tablo 3.11.'deki veriler 110-120, 130-140, 160-180, 230-240 aralıklarında olacak şekilde gruplanarak her grup için emniyet stoğu hesaplandığında ortalama emniyet stoğu miktarı 22,75 olmuştur. Genel sapma düşünülerek hesaplanan emniyet stoğunun 136 olduğu düşünüldüğünde mevsimsel taleplerde mevsim içinde yeniden sipariş noktası belirlemenin, eğilimde de belirli bir dönem uzunluğundaki taleplere bağlı olarak emniyet stoğu belirlemenin ekonomik katkısı aşikârdır. Bu durum zamana bağlı değişikliklerin, yani gerçek zamanlı planlamanın katkısı olacağı yönünde bir kanaat sağlamaktadır.

3.3.3. Malzeme ihtiyaç planlama ve miktar belirleme kuralları

Siparişin verileceği zaman belirlendikten sonra miktarının da hesaplanması gerekmektedir. İtme sisteminde ihtiyaç duyulan malzeme miktarı malzeme ihtiyaç planlama (MRP) ile hesaplanmaktadır. MRP sistemlerinin malzeme ihtiyacını

hesaplayabilmesi için, üretimde ihtiyaç duyulacak toplam malzeme miktarını belirlemesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için ürün bileşenleri ve bileşen miktarlarının verilerini içeren ürün ağaçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ürün ağaçlarında ürünü oluşturan tüm bileşenler yer aldığından MRP hesaplarına girmemesi gereken ürün bileşenleri “hayalet” olarak tanımlanır. Diğer bileşenlerin tamamı malzeme ihtiyaç planlaması sürecinde değerlendirilir.

İhtiyaç duyulan malzeme miktarı üretilecek ürün sayısı ile orantılı olarak değişeceği için sipariş ve ana üretim çizelgesi üzerinden üretilecek ürün miktarı elde edilmektedir. Bu bilgiler ışığında hesaplanan brüt malzeme ihtiyacı stok bilgisiyle karşılaştırılarak net ihtiyaçlar hesaplanmaktadır. Stok bilgisi depoda bulunan malzemeleri, önceki MRP hesaplamalarında rezerve edilmiş fakat henüz kullanılmamış malzemeleri ve açık malzeme siparişlerini³ içerir.

Net ihtiyaçlar belirlendikten sonra sipariş verilecek malzeme miktarı belirlenmektedir. Miktar belirleme süreci sonunda, sipariş verilecek malzeme miktarı ihtiyaçların toplamından daha büyük bir rakam olabileceği gibi toplam ihtiyacın birden fazla seferde karşılanmasına karar verilebilir. Karar verme sürecinde stok tutma maliyeti, nakliye maliyeti, stoğun bozulma süresi, yasal düzenleme ve yasal maliyetler etkilidir. Bu parametrelerin değerlendirildiği yaygın kullanılan miktar belirleme kuralları ihtiyaç kadar (lot-for-lot), ekonomik sipariş miktarı, periyodik sipariş miktarı, parça periyot dengeleme ve Wagner-Whitin algoritmasıdır. Bu algoritmaların risk (stokastik) yaklaşımıyla geliştirilmiş farklı sürümleri de bilimsel literatürde tartışılmaktadır.

3.3.3.1. İhtiyaç kadar sipariş kuralı

İhtiyaç kadar sipariş (LFL) kuralında, hesaplanan net ihtiyaçlar tedarik ön süresi kadar zaman öncesinden sipariş verilirler. Siparişlerde herhangi bir bütünleştirme söz konusu değildir. Her sipariş planlama ufku içinde oluşan ihtiyaç kadar verilir. Tablo

³ Açık siparişler, tedarikçi tarafından henüz firmaya teslim edilmemiş siparişlerdir.

3.1.'de verilen masa ürün ağacı kullanılarak Tablo 3.4.'teki talepler karşılanmak istendiğinde Tablo 3.13.'te görülen net ihtiyaçlar belirlenecektir. Termin tarihi bir hafta kabul edilirse siparişler ihtiyaçtan bir hafta öncesinde verilmeye başlanacaktır. Başlangıçta depoda 52 m² suntalam olduğu ve dönem boyunca 36 m² emniyet stoğu tutulduğu varsayılmaktadır.

Tablo 3.13. Suntalam MRP tablosu (LFL için)

MALZEME		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SUNTALAM	Ana	224	252	240,8	257,6	260,4	226,8	246,4	221,2	226,8	257,6
	Üretim										
	Çizelgesi										
	Dönem	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	Sonu										
	Brüt	260	288	276,8	293,6	296,4	262,8	282,4	257,2	262,8	293,6
	İhtiyaç										
	Depo	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Net İhtiyaç	210	288	276,8	293,6	296,4	262,8	282,4	257,2	262,8	293,6
	Sipariş	210	288	276,8	293,6	296,4	262,8	282,4	257,2	262,8	293,6

İhtiyaç oluştuğunda sipariş vermek, eğer sipariş maliyeti (nakliye, yasal ücretler vb.) yüksekse, etkin bir yöntem olmayacaktır. Sipariş maliyetinin düşük olduğu durumlarda ise (özellikle çekme sistemlerinin) stok politikasını bu kural oluşturmaktadır. İhtiyaç kadar sipariş kuralında fazladan stok tutmaya gerek olmadığından stok tutuma maliyetini en aza indirmek için bu kurala benzer karaktere sahip sistemler geliştirilmelidir.

3.3.3.2. Ekonomik sipariş miktarı

Sipariş maliyetinin yüksek olduğu durumda toplam maliyet artacağı için ihtiyaç oluştuğunda sipariş verilmesi ekonomik olmamaktadır. Bu durumda siparişlerin birleştirilmesi gerekmektedir. 3.30'da verilen ekonomik sipariş miktarı (EOQ) stok tutma maliyeti (h), sipariş maliyeti (S) ve planlama ufku içindeki ortalama talebi ($\bar{D}$) göz önünde bulundurarak toplam maliyeti en aza indirecek stok miktarının hesaplandığı miktar belirleme politikasıdır.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2SD}{h}} \quad (3.30)$$

Tablo 3.14.'teki talep verisi için ekonomik sipariş miktarı hesaplanırken net ihtiyacın ortalaması (272,36) kullanılmıştır. Sipariş maliyeti 500 ₺ ve birim stok tutma maliyeti 1 ₺ olarak kabul edilirse EOQ 370 m² olacaktır. Sipariş verileceği zaman ihtiyaç 370 m²'den büyük olduğunda ihtiyaç kadar, küçük olduğunda ise 370 m² sipariş verilmelidir. Buna göre verilecek sipariş miktarı, depodaki stok miktarı, net ve brüt ihtiyaçların değerleri ihtiyaca göre sipariş politikasından farklı olacaktır.

Tablo 3.14. Suntalam MRP tablosu (EOQ için)

MALZEME		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SUNTALAM	Ana Üretim	224	252	240,8	257,6	260,4	226,8	246,4	221,2	226,8	257,6
	Çizelgesi										
	Dönem Sonu	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	Brüt İhtiyaç	260	288	276,8	293,6	296,4	262,8	282,4	257,2	262,8	293,6
	Depo	50	160	242	335,2	41,6	115,2	222,4	310	52,8	160
	Net İhtiyaç	210	288	34,8	0	254,8	147,6	60	0	210	133,6
	Sipariş	370	370	370	0	370	370	370	0	370	370

Ekonomik sipariş miktarı miktar indirimi olduğu durumlarda birim fiyat indirimli tüm senaryolar için toplam maliyet hesaplanıp en uygun maliyetli satın alma miktarı belirlenmelidir. Bunun için ekonomik sipariş miktarını kapsayan aralığın birim fiyatı, sipariş maliyeti ve ekonomik sipariş miktarı kullanılarak toplam maliyet hesaplanır. Ekonomik sipariş miktarını kapsamayan aralıklar için, ekonomik sipariş miktarına en yakın olan değer seçilerek toplam maliyet hesaplanır. Böylece tüm senaryoların maliyetleri belirlenmiş olur. En uygun maliyetli senaryonun seçimi için de toplam maliyet alım miktarına bölünerek birim maliyetler karşılaştırılır. Örneğin 100 ile 300 m² arasındaki suntalam alımı için birim fiyat 30 ₺, 301 ile 500 m² arasındaki suntalam alımı için birim fiyat 29 ₺, 501 m²'nin üzerindeki alımlar için de 28 ₺ olsun. Ekonomik sipariş miktarı 370 olduğu için bu miktarda alım yapıldığında toplam ürün bedeli (370x58) 10730 ₺ olacaktır. Sipariş maliyeti 500 ₺ olduğu için toplam maliyet 11230 ₺ olacaktır. Ekonomik sipariş miktarını kapsamayan fiyat aralıklarında, ekonomik

sipariş miktarına en yakın olan miktar seçilmesi gerektiğinden 300 m² ve 501 m² alım yapılacağı varsayılarak toplam maliyet hesaplanacaktır. 300 m² alım yapıldığında toplam maliyet 9500 ₺, 501 m² alım yapıldığında toplam maliyet 14528 ₺ olacaktır. Üç senaryo için birim fiyatlar hesaplandığında 300 m² için birim fiyat (9500/300) 31,67 ₺, 370 m² için 30,35 ₺ ve 501 m² için 29 ₺ olduğundan 501 m² alım yapmak gerekir.

3.3.3.3. Periyodik sipariş miktarı (POQ)

Periyodik sipariş miktarı, ihtiyaç kadar sipariş stratejisine benzerlik göstermektedir. Farklı olduğu kısım sadece parti için gerekli ihtiyacı değil, belirli bir süre içindeki toplam ihtiyacı karşılayacak kadar sipariş verilmesini ön görmektedir. Periyodik sipariş miktarı kuralı Tablo 3.15.'te iki haftalık ihtiyaçları karşılayacak biçimde uygulanmıştır.

Tablo 3.15. Suntalam MRP tablosu (POQ için)

MALZEME		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SUNTALAM	Ana	224	252	240.8	257.6	260.4	226.8	246.4	221.2	226.8	257.6
	Üretim										
	Çizelgesi										
	Dönem	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	Sonu										
	Brüt	260	288	276.8	293.6	296.4	262.8	282.4	257.2	262.8	293.6
	İhtiyaç										
	Depo	50	288	0	293.6	0	262.8	0	257.2	0	293.6
	Net İhtiyaç	210	0	276.8	0	296.4	0	282.4	0	262.8	0
	Sipariş	498	0	570.4	0	559.2	0	539.6	0	556.4	0

3.3.3.4. Parça periyot dengeleme kuralı

Parça periyod dengeleme (PPB) kuralı toplam stok tutma maliyetinin sipariş maliyetine eşit olduğu ana kadar stok tutmayı ön gören miktar belirleme stratejisidir. Bu strateji uygulanırken bir dönemden başlayarak planlama ufkuna veya toplam stok tutma maliyeti sipariş maliyetini aşana kadar stok tutulduğu varsayılarak tüm dönemler için toplam stok tutma maliyeti hesaplanır. Hesaplamaların kapsadığı

dönemlerdeki toplam ihtiyaç bir seferde karşılanır ve sonraki dönemler için hesaplamaya yeniden başlanır. Denklem 3.31.'de m dönem için toplam stokta tutma maliyeti (PP_m), dönem boyunca stokta tutulan miktar (D_m) ve stokta tutma maliyeti (h) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$PP_m = hD_2 + 2hD_3 + (m - 1)hD_m = \sum_{i=2}^m (i - 1)hD_i \quad (3.31)$$

Stok tutma maliyeti 1₺ olduğu için ikinci haftanın ihtiyacı ilk hafta ile birlikte sipariş verildiğinde 288 ₺ stokta tutma maliyeti, ikinci ve üçüncü haftanın ihtiyaçları ilk haftanın siparişinde karşılanırsa toplam stokta tutma maliyeti 841,6 ₺ olacaktır. Bu rakam, sipariş maliyeti olan 500 ₺'yi aştığı için üçüncü haftanın ihtiyacı ilk siparişe dâhil edilmeyecektir. Üçüncü hafta ve sonrasındaki haftalar üçüncü haftanın ihtiyacı ile birlikte karşılanmak üzere tekrar değerlendirilecektir. Bu şekilde tüm ihtiyaçlar karşılanana kadar sipariş verilecek haftalar ve satın alma miktarları belirlenmiş olacaktır. Tablo 3.16.'da parça periyod dengeleme stratejisi ile satın alma miktarları görülmektedir.

Tablo 3.16. Sentalam MRP tablosu (PPB için)

MALZEME		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sentalam	Ana Üretim Çizelgesi	224	252	240.8	257.6	260.4	226.8	246.4	221.2	226.8	257.6
	Dönem	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	Sonu										
	Brüt İhtiyaç	260	288	276.8	293.6	296.4	262.8	282.4	257.2	262.8	293.6
	Depo	50	288	0	293.6	0	262.8	0	257.2	0	293.6
	Net İhtiyaç	210	0	276.8	0	296.4	0	282.4	0	262.8	0
	Sipariş	498	0	570.4	0	559.2	0	539.6	0	556.4	0

3.3.3.5. Wagner – Whitin algoritması

Wagner – Whitin, dinamik programlama ile en uygun çözümü bulan bir algoritmadır. Algoritmada stok tutma ve ihtiyaç anında alım stratejileri karşılaştırılarak toplam maliyet en aza indirilmesi ön görülmektedir. Bunu sağlayabilmek için amaç

fonksiyonunda görüldüğü gibi Denklem 3.32.'de görüldüğü gibi sipariş maliyeti, stok tutma maliyeti, planlama ufku başlangıcı (b), dönem sonu (e) ve talep miktarı kullanılarak toplam maliyet (M) hesaplanmaktadır. Toplam maliyet, stokta tutulacak miktarın stokta kaldığı süre ve stok tutma maliyeti ile çarpımının sipariş maliyetiyle toplanmasıyla bulunmaktadır.

$$M_{b,e} = S + h \sum_{t=b+1}^e (t - b) D_t \quad (3.32)$$

Amaç fonksiyonu, planlama ufku başlangıcı ile bitişi arasındaki tüm dönemler (hafta, gün, vb.) için toplam maliyeti en aza indirecek biçimde tasarlanmıştır. Denklem 3.33.'teki amaç fonksiyonunda verilecek olan siparişin mevcut dönemde veya daha önceki her dönemin optimal stok politikasına bağlı olarak verilmesi değerlendirilmektedir.

$$F_i = \forall i \in [b, e] \min(F_{i-1} + M_{i,e}) \quad (3.33)$$

Tablo 3.17.'deki net ihtiyaç için Wagner Whitin algoritması optimal stok politikasını belirlemek için ihtiyaçların mevcut dönemde karşılanmasından başlayarak, ihtiyaçların önceki tüm dönemlerin optimal politikalarına bağlı olarak karşılanmasını değerlendirir. Buna göre ilk haftanın ve sonraki haftaların ihtiyaçlarının ilk haftadan karşılanması durumunda oluşacak maliyetler Tablo 3.17.'deki net ihtiyaç satırından sonraki ilk satırda yer almaktadır. İkinci haftanın stok politikası, ilk haftanın optimal politikası ile tedarikğin ilk hafta yapılması ve sonraki haftaların ihtiyaçlarının ikinci haftada karşılanması değerlendirilmiştir. İkinci haftanın optimal değeri ilk haftada ve ikinci haftada ayrı siparişler vermek (1000 ₺) ve ilk haftada iki haftanın ihtiyacını sipariş vermek (752 ₺) arasından en düşük maliyet olan 752 ₺'dir. Üçüncü haftanın optimal değeri ise ilk haftada tedarik (1233,6 ₺), ikinci haftanın optimal politikası ile tedarik (1252 ₺) ve ihtiyaç kadar sipariş politikasının maliyeti (1500 ₺) arasından en uygun olanıdır. Tablo 3.17.'deki sütunlar değerlendirilen haftayı yani Denklem 3.22.'de verilen bağıntıdaki e indisini temsil etmekte, satırlar ise b indisini temsil etmektedir.

Tablo 3.17. Wagner – Whitin algoritması çözüm adımları

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Net İhtiyaç	224	252	240.8	257.6	260.4	226.8	246.4	221.2	226.8	257.6
1	500	752	1233.6	2006.4	3048	4182	5660.4	7208.8	9023.2	11341.6
2		1000	1252	1509.6	2030.4	2710.8	3696.4	4802.4	6163.2	7966.4
3			1500	1733.6	1994	2447.6	3186.8	4071.6	5205.6	6751.2
4				2000	2009.6	2236.4	2729.2	3392.8	4300	5588
5					2500	2494	2740.4	3182.8	3863.2	4893.6
6						3000	2736.4	2957.6	3411.2	4184
7							3500	3229.2	3456	3971.2
8								4000	3457.6	3715.2
9									4500	3911.2
10										5000
Optimal	500	752	1233.6	1509.6	1994	2236.4	2729.2	2957.6	2957.6	3911.2

Tablo 3.17.'de koyu olarak belirtilen hücreler izlenecek politikayı göstermektedir. Her satırdaki ilk koyu hücreyi içeren sütunun temsil ettiği haftada, koyu hücrelerin toplamı kadar sipariş verilecektir. Buna göre iki haftalık dönem sipariş vermenin en uygun maliyetli sonuç olduğu görülmektedir. Siparişler Tablo 3.16.'da verilen parça periyod dengeleme algoritmasının satın alma politikasıyla aynı şekilde oluşturulacaktır.

3.4. Çekme Sistemi

Çekme sistemi daha az kaynak kullanımıyla üretimi gerçekleştirmeyi hedefleyen bir sistemdir. Siparişe üretim yapan çekme sisteminin temel karakteristiği küçük partiler halinde üretim yapılmasıdır. Bu sayede, planlama ufku daha kısa olmaktadır ve sistemin değişkenliklerden etkilenmeden çalışmasına katkı sağlamaktadır. Değişkenliği büyük ölçüde ortadan kaldıran çekme sistemlerinde, değişkenliği yönetmek için ek kaynaklara olan ihtiyaç da en aza indirilmiş ve kaynak kullanımı ideale yakın seviyelere düşürülmüştür. Çekme sistemlerinin kaynak kullanımını düşürmesinde iki ana etken olan maliyet ve zaman açısından olurlu yapılara ihtiyaç vardır.

Sistemin, ekonomik açıdan olurlu olması için stok ihtiyacının ekonomik sipariş miktarına eşit olması gerekmektedir. Bu sayede, ihtiyaç oluştuğunda sipariş vermek

ekonomik olacaktır. Küçük partilere bağlı oluşacak ihtiyaçların ekonomik olarak karşılanabilmesi için birim sipariş maliyetinin düşük olması gerekmektedir. Sipariş maliyetini düşürmenin en etkin yollarından biri lojistik maliyetini düşürmek olacağından, bu sistemlerde tedarikçiler ana firmaya yakın yerlerde konumlanmaktadır.

Çekme sistemleri üretim sürecine sipariş ile başladığından stoka üretim ön görülmemektedir. Sistemin bu karakteristik özelliği, zaman açısından uygunluğun sağlanması için, etkin bir kapasite yönetimini gerektirmektedir. Çekme sisteminde üretim yapan tedarikçilerin imalat ön süresi ve ana firmanın stok çevrim süresi ile dengeli olmak zorundadır. Çekme sistemleri akış tipi üretim uyguladıkları için, dengeyi sağlamak, ana firmadaki üretim hattının çevrim süresinin tedarikçi firmadaki üretim hattında aşılmamasına bağlıdır. Çekme sistemleri dengelendikten sonra parti büyüklüklerine ve stok hareketliliğini sağlayacak olan kanban kartlarının sayısının hesaplanması gerekmektedir.

3.4.1. Kanban sayısının hesaplanması

Kanban, parça konteynırlarının sürekli yenisiyle değiştirilmesi üzerine kurulmuş basit bir fikirdir. Her kanban belirli bir miktarda malzemeye karşılık gelir. Müşteriden tedarikçiye gönderilen kanban katrının temsil ettiği miktardaki malzeme bir konteynır ile müşteriye gönderilir. Her stok çevriminde kaç konteynır gönderilmesi gerektiği kanban sayısı hesabı ile belirlenmektedir. Kanban sayısı (N) hesaplanırken stok devir miktarı veya üretim oranı (R_p), konteynır için çevrim zamanı (T), verimlilik değişkeni (P) ve standart konteynır kapasitesi (C) Denklem 3.34.'de verildiği biçimde kullanılmaktadır.

$$N = \left(\frac{R_p T (1+P)}{C} \right) \quad (3.34)$$

Verimlilik değışkeni verimsizliğin neden olduğu ek sürenin (veya üretim miktarının) hesaplamaya dâhil edilmesi için kullanılmaktadır. Verimlilik değışkeni, Denklem 3.35.’teki gibi, birin verimliliğe (U) bölünerek sonuçtan bir çıkarılmasıyla elde edilir.

$$P = \frac{1}{U} - 1 \quad (3.35)$$

Örneğin, verimliliği %90 olan bir hattın verimlilik değışkeni $(\frac{1}{0.9} - 1)$ 0.11 olacaktır. Hattın üretim oranı saatte 120 parça, stok çevrimi 4 saat ve konteynır kapasitesi 50 adet malzeme ise ihtiyaç duyulan konteynır sayısı $(\frac{120 \times 4 \times 1.11}{50})$ 11 olacaktır.

3.5. Hücresel İmalat ve Seru Üretim Modeli

Üretimde verimliliğin artırılması hazırlık zamanı ve boş bekleme zamanı gibi üretim işlemine doğrudan etkisi olmayan zamanların ortadan kaldırılmasına bağlıdır. Üretim için gerek duyulan işlem zamanına katlanmadan üretim yapılmasının imkânı yoktur. Fakat hazırlık zamanı teknolojik sebeplerden, boş bekleme zamanı da çizelgeden kaynaklanmaktadır. Bu iki temel problemten kurtulmanın yolları benzer ürünleri işleyecek tezgâh grupları oluşturmak veya her tezgâhın sadece belirli işleri yapacağı bir akış hattı kurmaktır. Tezgâhların ya da iş merkezlerinin gruplanmasıyla oluşan kümeye imalat hücresi, imalat hücrelerinden oluşan sistemlere hücresel imalat sistemleri denmektedir. İmalat hücreleri oluşturulurken, işlenecek parçaların fiziksel özelliklerinin ve işlemlerin içeriklerinin benzerliği dikkate alınmaktadır.

İşlem içeriğine göre imalat hücreleri oluşturmada kullanılan en yaygın algoritmalarından birisi “Rank Order Clustering” (ROC) algoritmasıdır. Bu algoritma ürün parçalarının göreceği işlemlerin ikilik sayı tabanında ifade edilmesi ve elde edilen sayıların büyükten küçüğe doğru sıralanmasına dayanır. Sıralama gerçekleştirildikten sonra benzer işlemler görececek ürün ve ürün bileşenleri gruplanarak parça aileleri oluşturulur.

Tablo 3.18.’de beş malzemenin göreceği işlemlerle ilişkilendirildiği matris yer almaktadır. Bu matrise göre “P1” parçası, “O1” ve “O2” işlemlerini görmektedir. Buna

göre “P1” parçasına atanacak sayı değeri ikilik tabanda “1100000”, onluk tabanda 96 olacaktır. “P2” parçasının değeri 3, “P3” parçasının değeri 13, “P4” parçasının değeri 112 ve “P5” parçasının değeri 6 olacaktır.

Tablo 3.18. Parça işlem ilişki matrisi

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
P1	1	1					
P2						1	1
P3				1	1		1
P4	1	1	1				
P5					1	1	

Tablo 3.18.’i ürün bileşenlerine atana sayısal değere göre sıraladığımızda Tablo 3.19. elde edilmektedir. Buna göre “P4” ve “P1” benzer parçalar olurken “P2”, “P3” ve “P5” parçaları da bir grup oluşturmaktadır. Elde edilen sonuca göre “O1”, “O2” ve “O3” işlemlerini gerçekleştirecek bir imalat hücresi ile “O4”, “O5”, “O6” ve “O7” işlemlerini gerçekleştirecek bir imalat hücresi olmak üzere iki imalat hücresi kurulmasına ihtiyaç vardır.

Tablo 3.19. Parça işlem ilişki matrisi (düzenlenmiş)

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
P4	1	1	1				
P1	1	1					
P3				1	1		1
P5					1	1	
P2						1	1

Hücrel imalat parça ailelerinin oluşturulması parça ve işlem ilişkisine bağlı olarak gerçekleştirildiğinden, tesis yerleşiminden ve üretim sisteminden etkilenmemektedir. Oluşturulan imalat hücresindeki iş merkezlerinin, imalat sisteminin yerleşimi nedeniyle, fiziksel olarak bir araya getirilemediği durumlarda üretim rotası ayarlanarak sanal hücreler oluşturulmaktadır. Bu sayede hücrel imalat her imalat sisteminde uygulanabilmektedir.

Hücresel imalatın tam zamanlı üretime uygulanmasıyla “Seru” üretimi ortaya çıkmıştır. Villa ve Taurino’ya (2013) göre “Seru” üretimi, üretim sisteminin uzun az sayıda akış hattı yerine çok sayıda küçük akış hatlarından oluşacak biçimde dönüştürmektedir. Bu sayede her hücre birbirinden farklı işlemleri gerçekleştirmeye yarayacak donanıma sahip olmakta ve hat boyunca farklı iş merkezlerinde tekrarlı işlemlerin yapılmasının önüne geçilmektedir. Tekrarlı işlemler bir hücreye toplandığında çeşitli akış hücrelerinden ilgili hücreye taşınacak malzemelerin taşıma süresi dar boğaz istasyonun işlem süresini geçerse çevrim süresi taşıma süresine eşit olur. Bu durumun önüne geçebilmek için “Seru” üretim felsefesi hareketli hücreleri ön görmüştür. Ortak işlemlerin gerçekleştirilmesi için gerekli teçhizatın hafifleştirilmesi, taşınabilir olması ve çalışanların farklı hücrelerin işleri için de eğitilmesine odaklanılmıştır.

3.6. Kapasite Planlama ve Çizelgeleme

İş istasyonlarının belirli bir süre içerisinde üretebilecekleri en fazla çıktı miktarı üretim sisteminin kapasitesidir. Çıktı miktarı ürün çeşidine, tezgâh seçimine ve çalışan sayısına bağlı olarak değişebilir. Kapasite planlama süreci mevcut koşullar altında üretim miktarının en iyilenmesidir. Üretim miktarını artırmak her zaman ana amaç olmayabilir. Gecikmeleri en aza indirmek, üretim maliyetini en aza indirmek veya kârı en yüksek noktaya çekmek gibi amaçlarla üretim yapılmak istenebilir. Böyle problemlerin çözümünde matematiksel modeller ile dinamik programlama, çizelgeleme için geliştirilen özel algoritmalar ve sezgisel algoritmalarından yararlanılmaktadır.

3.6.1. Seçim (dispatching) stratejileri ve sezgisel algoritmalar

Sezgisel algoritmalar belirli bir amaç fonksiyonunu tekrarlı olarak iyileştiren ve durma şartları sağlandığında çalışmayı sonlandıran algoritmalarlardır. Bu algoritmalar iki farklı biçimde çalışır. Yerel arama (local search) algoritmaları olarak isimlendirilen sezgisel algoritmalar işlerin sıralamasını ve seçimini adım adım gerçekleştirmektedir. Sezgi üstü (meta-heuristic) algoritmalar ise başlangıç çözümü olarak rastgele ya da bir yerel

arama algoritması ile sıralanmış çizelgeyi kullanır. Mevcut sıralamayı rastgele değiştirerek daha iyi bir sıralama elde etmeye çalışırlar.

3.6.1.1. Temel seçim stratejileri

Literatürde çeşitli sıralama ve seçim stratejileri yer almaktadır. Bunların en yaygınları en az gevşek zaman (Minimum Slack First), rastgele sıralama (Service in Random Order), geliş sırasına göre (Earliest Release Date), teslim sırasına göre (Earliest Due Date), en kısa işlem süresi (Shortest Processing Time), en uzun işlem süresi (Longest Processing Time) ve kritik yol (Critical Path) kurallarıdır. Bu kurallar, uygulanmaları esnasında dikkat edilmesi gereken farklı ölçütleri temsil etmektedir.

Tablo 3.1.'de ürün ağacı verilen masanın rota bilgisi ile Tablo 3.20.'deki sehpanın rota verileri iş sıralama ve seçiminde ihtiyaç duyulacak süre ve iş merkezi bilgilerini içermektedir.

Tablo 3.20. Sehpa ürün ağacı		
Ürün Ağacı	Miktar	İşlemler
1. Sehpa	1 Adet	Montaj (120 sn.)
1.1. Üst Tabla	1 Adet	Ebatlama (30 sn.), Kenar Bantlama (30 sn.), Delme (90 sn.)
1.1.1. PVC	2.2 m	
1.1.2. Suntalam	0.3 m ²	
1.2. Metal Ayak Komplexi	2 Adet	Şerit Testere (40 sn.), Delme (90 sn.), Ayak Montajı (100 sn.)
1.2.1. Alüminyum Sac	2 m	
1.2.2. Bağlantı elemanı	4 Adet	
1.2.3. Vida	19 Adet	

Ürün ağacı verilerine göre ebatlama, kenar bantlama, delme, şerit testere, ayak montajı ve montaj işlemleri gerçekleştirilecektir. Ebatlama ve kenar bantlama işlemleri masanın üst tablası ve perdesi ile sehpanın üst tablası için, delme işlemi masanın üst tablası, perdesi ve ayağı ile sehpanın üst tablası ve ayağı için, şerit testere ile ayak montajı işlemleri sehpa ve masanın ayağı için, montaj işlemi ise masa ve sehpa

için gerçekleştirilecektir. İş sıralamada kullanılacak bu veriler Tablo 3.21.'de özetlenmiştir. Sehpaaya ait olan parçalar “(S)”, masaya ait olan parçalar ise “(M)” ile belirtilmiştir.

Tablo 3.21. Rota verileri

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
1.Sehpa						120 sn.
2.Üst Tabla (S)	30 sn.		60 sn.	90 sn.		
3.Ayak Komplexi (S)		40 sn.		90 sn.	100 sn.	
4.Masa						300 sn.
5.Üst Tabla (M)	100 sn.		120 sn.	60 sn.		
6.Perde (M)	90 sn.		70 sn.	60 sn.		
7.Ayak Komplexi (M)		140 sn.		120 sn.	120 sn.	

Tablo 3.21.'de verilen rota verileri kullanılarak en kısa işlem (SPT) zamanı kuralına göre işler sıralanarak Tablo 3.22.'deki çizelge elde edilmiştir. SPT kuralına göre eşit önceliğe sahip işler olursa, işler geliş sırasına göre (ERD) sıralanmıştır. İşlerin öncelikleri tabloda parantez içinde belirtilmiştir. Bu öncelikler kullanılarak çizelge oluşturulurken sehpanın ve masanın ayaklarından ikişer adet üretileceği göz önünde bulundurulmuş ve işlemler ikişer sefer yapılacak biçimde çizelgeye dâhil edilmiştir. Sadece ayak montaj işlemleri bir seferde yapılacaktır. Bu sebeple her iki ayağın ayak montaj işlemine giriş anları ile işlemden çıkış anları aynıdır.

Tablo 3.22. SPT stratejisi ile oluşturulan çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	0-30 (1)		30 - 90	220 – 310 (1)		
Ayak Komplexi (S)		0 – 40 (1)		40 – 130	220 - 320	
Ayak Komplexi (S)		40 – 80 (1)		130 – 220 (2)	220 - 320	
Sehpa						320 – 440
Üst Tabla (M)	120 – 220 (3)		220 - 340	370 - 430		
Perde (M)	30 – 120 (2)		120 – 190	310 – 370		
Ayak Komplexi (M)		80 -220 (2)		430 - 550	670- 790	

Tablo 3.22. Devamı

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Ayak Kompleksi (M)		220 -360 (2)		550 - 670	670- 790	
Masa						790 - 1090

Tablo 3.23.'teki çizelge oluşturulurken işler en uzun işlem zamanı zaman (LPT) algoritmasına göre seçilmiştir. LPT kuralına göre eşit öncelikli işler ise ERD kuralına göre seçilmiştir. Bu kurala göre atanan işler SPT kuralına göre atana işlerden 100 saniye erken bitmiştir. SPT kuralı kullanıldığında montaj işlemi darboğaz olurken, LPT kuralı kullanıldığında delme işlemi darboğaz olmuştur.

Tablo 3.23. LPT stratejisi ile oluşturulan çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	190-220 (3)		290 – 350 (3)	500 - 590		
Ayak Kompleksi (S)		280 – 320 (2)		590 - 680	770 - 870	
Ayak Kompleksi (S)		320 – 360 (2)		680 - 770	770 - 870	
Sehpa						870 - 990
Üst Tabla (M)	0 – 100 (1)		100 – 220 (1)	260 - 320		
Perde (M)	100 – 190 (2)		220 – 290 (2)	440 – 500		
Ayak Kompleksi (M)		0 -140 (1)		140 - 260	440- 560	
Ayak Kompleksi (M)		140 – 280 (1)		320 - 440	440 - 560	
Masa						560 -860

Denklem 3.2.'de belirtildiği gibi, darboğaz hesaplanırken istasyonun boş bekleme süresi de dikkate alındığından çizelge darboğazı etkilemektedir. Çizelgeye bağlı olarak darboğazın ve çevrim süresinin değişmesi de üretimin tamamlanma süresini (makespan) değiştirir. Bundan dolayı, çizelgeleme sürecini en iyilemek için darboğaz istasyonun tespitine ve en yüksek verimde çalıştırılmasına özen gösterilmelidir.

3.6.1.2. Birleşik seçim stratejileri

Birleşik seçim stratejileri birden fazla amaç fonksiyonun birleştirilmesiyle ortaya çıkan stratejilerdir. Birleşik seçim stratejilerinde birden fazla parametre belirli ağırlıklarla amaç fonksiyonuna dâhil edilerek seçimi etkiler. Amaç fonksiyonlarında yaygın olarak kullanılan parametreler tamamlanma zamanı, toplam gecikme, bekleyen iş miktarı ve işlem hızı gibi parametrelerdir. Bu parametreler temel seçim stratejilerinin amaç fonksiyonlarını oluşturmaktadır.

Temel seçim stratejilerinden en az gevşek zaman ve ağırlıklı toplam üretim zamanı (Weighted Sum of Production Time) stratejilerinin birleşimi ile bariz gecikme maliyeti (Apparent Tardiness Cost) stratejisi meydana gelmektedir. Her işe atanan ağırlık $w_{w,o,i}$, işlem zamanı $T_{w,o,i}$, ortalama işlem süresi $\bar{T}_i$, teslim zamanı $d_{w,o,i}$, işlemin başlama anı t ve ölçü parametresi K olan iş için ATC değeri Denklem 3.36.'daki gibi hesaplanır. İşler hesaplanan ATC değerlerinin büyüklüğüne göre önceliklendirilirler.

$$ATC_i = \frac{w_{w,o,i}}{T_{w,o,i}} \exp\left(-\frac{\max(d_{w,o,i} - T_{w,o,i} - t, 0)}{K\bar{T}_i}\right) \quad (3.36)$$

Sehpa ve masa üretiminin çizelgelenmesi için bütün ağırlıklar ve K değeri 1 olarak kabul edilmiştir. K değerinin küçük olduğunda eğer geciken işler varsa en az gevşek zaman, eğer geciken işler yoksa veya K çok büyük bir sayıysa ağırlıklı toplam işlem zamanı stratejisi baskın olarak çalışır. Teslim zamanı ise daha önceden hesaplanan tamamlanma süresi olan 980 kabul edilmiştir. Bu veriler ışığında ebatlama işlemindeki sehpanın üst tablasının öncelik değeri Denklem 3.37.'de verilmiştir. Sehpanın ortalama işlem süresi 75,71 saniye, masanın ortalama işlem süresi ise 118 saniyedir.

$$ATC_{\text{sehpa üst tabla}} = \frac{1}{30} \exp\left(-\frac{\max(980 - 30 - 0, 0)}{75.71}\right) = 1.18414E - 7 \quad (3.37)$$

Masanın üst tablası için ATC değeri 5.77024E-6 ve masanın perdesi için 5.89042E-6 olarak hesaplanmıştır. Buna göre ebatlama işlemine ilk masanın perdesi, sonra üst

tablası ve son olarak da sehpanın üst tablası girecektir. Bu algoritma ile üretilen Tablo 3.24'teki çizelgenin ile Tablo 3.23.'teki çizelgenin tamamlanma süreleri aynıdır. İki çizelge arasındaki küçük farklılık (masanın üst tablasının ve perdesinin üretim sırasının değişmesi) darboğazı değiştirmediği için sonuç aynı olmuştur. Tamamlanma süresi 0 kabul edildiğinde ise öncelik sırası tamamen değişecek ve çizelge Tablo 3.22.'deki gibi olacaktır.

Tablo 3.24. ATC stratejisi ile oluşturulan çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	190-220 (3)		310 - 370	500 - 590		
Ayak Kompleksi (S)		280 – 320 (2)		590 - 680	770 - 870	
Ayak Kompleksi (S)		320 – 360 (2)		680 - 770	770 - 870	
Sehpa						870 - 990
Üst Tabla (M)	90 – 190 (2)		190 - 310	440 - 500		
Perde (M)	0 – 90 (1)		90 - 160	260 - 320		
Ayak Kompleksi (M)		0 -140 (1)		140 - 260	440 - 560	
Ayak Kompleksi (M)		140 - 280 (1)		320 - 440	440 - 560	
Masa						560 -860

ATC stratejisine hazırlık zamanları da dâhil edilerek hazırlıklı bariz gecikme maliyeti (Apparent Tardiness Cost with Setups) stratejisi oluşturulmuştur. Bu stratejide ikinci bir ölçü parametresi olan K_2 , hazırlık zamanı $ST_{w,o,i}$ ve ortalama hazırlık zamanı $\overline{ST}_i$ mevcut denkleme ek olarak, Denklem 3.38.'deki gibi kullanılmıştır.

$$ATCS_i = \frac{w_{w,o,i}}{T_{w,o,i}} \exp\left(-\frac{\max(d_{w,o,i} - T_{w,o,i} - t, 0)}{K\overline{T}_i}\right) \exp\left(-\frac{ST_{w,o,i}}{K_2\overline{ST}_i}\right) \quad (3.38)$$

3.6.1.3. Sezgisel arama algoritmaları

Sezgisel algoritmalar çözümün alternatif permütasyonlarından amaç fonksiyonuna en uygununu seçen veya çözümün alt kümelerinden amaç fonksiyonuna en uygun olanları birleştirerek çözümü elde eden algoritmalarlardır. Çözümün alternatifleri ya da alt

kümeleri parametre sayısına bağlı olarak çok fazla olacağından bu algoritmalar amaç fonksiyonunu en iyilerken belirli bir durma koşulu sağlandığında çalışmayı sonlandırırlar ve elde edilen çözümü en iyi çözüm olarak sunarlar. Gerçek en iyi çözümün bulunması garanti edilemese de problem üzerinde iyileştirme sağlandığından sezgisel arama algoritmaları tercih edilmektedir. Özellikle çözümü çok zor olan ve uygun bir süre içinde çözülme imkânı olmayan problemlerin (NP-Hard) çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sezgisel algoritmalar, yerel arama algoritmaları ve sezgi üstü (meta-heuristic) arama algoritmaları olmak üzere iki farklı kategoride incelenmektedir.

3.6.1.3.1 Yerel arama algoritmaları

Yerel arama algoritmaları çözümün alt kümelerini oluşturup, bu alt kümelerden amaç fonksiyonuna en uygun olanları birleştirerek çözümü üreten algoritmalarlardır. Temel ve birleşik seçim stratejilerini uygularken her istasyonda kuyruktaki işlerden stratejiye en çok uyanı seçmek bir yerel arama işlemidir. Çünkü bu stratejilerle iş seçimi yaparken başlangıçta bir çizelge yoktur. Çizelge bu stratejilerin her istasyona tüm işler atanana kadar tekrarlı olarak uygulanmasıyla elde edilir. Sadece bir stratejiyi uygulayarak çözüme ulaşmak için açgözlü arama (Greedy Best – First Search) algoritması kullanılır. Temel iş seçim stratejileri bu algoritmaya uygun olarak çalışır. Çünkü açgözlü arama algoritmasında sadece bir sonraki adım için amaç fonksiyonunu en iyileyecek iş seçilir. Seçilen iş kullanılan stratejiye göre en kısa veya en uzun işlem süresine sahip olan, en az gevşek zamana sahip olan, ilk gelen, son gelen veya teslim tarihi en erken olan olabilir.

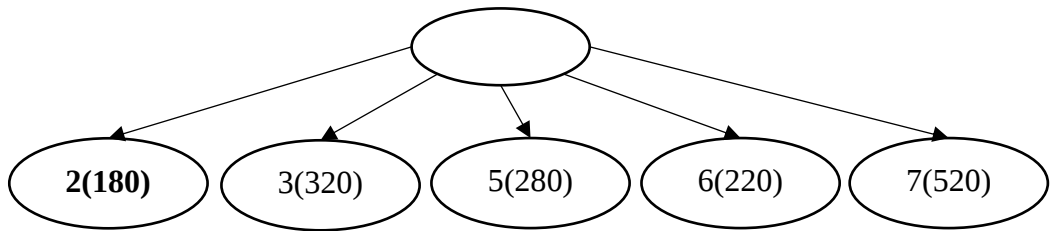
Masa ve sehpa örneği, açgözlü arama algoritmasıyla çizelgelenirken amaç fonksiyonu olarak iş seçim stratejilerinden en kısa işlem süresi kullanılmıştır. Algoritma çalışırken Tablo 3.21.'de rotası verilen işler önceliklendirilmiştir. İşlere öncelik verilirken, her iş çizelgeye tek tek yerleştirilmiş ve işleme başlama ile işlemin bitiş anları arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Başlangıçta çizelge boş olduğundan her ürün bileşenin göreceği tüm işlemlerin sürelerinin toplamı amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Toplam işlem süresi en küçük olan ürün sehpadır. Fakat öncelik kısıtlarından dolayı

sehpa ya da masa işlem göremeyeceği için amaç fonksiyonuna en uygun bileşen, perde, üst tablalar ve ayaklar arasından aranacaktır. En uygun alternatifin seçimi için, Tablo 3.25.'te görüldüğü gibi tüm alternatiflerin her biri ilk sırada üretilmiş gibi çizelge oluşturulmuştur.

Tablo 3.25. Açgözlü arama algoritmasında ilk adım

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı
2.Üst Tabla (S)	0 - 30		30-90	90 - 180	
3.Ayak Komplexi (S)		0 - 40		40 - 130	220 - 320
3.Ayak Komplexi (S)		40 - 80		130 - 220	220 - 320
5.Üst Tabla (M)	0 - 100		100 - 220	220 - 280	
6.Perde (M)	0 - 90		90 - 160	160 - 220	
7.Ayak Komplexi(M)		0 - 140		140 - 260	400 - 520
7.Ayak Komplexi(M)		140-280		280 - 400	400 - 520

Algoritmanın ilk adımında hesaplanan işlem süreleri Şekil 3.3.'te görülmektedir. Şekilde yer alan düğümlerde Tablo 3.21.'de ve Tablo 3.25.'te belirtilen sıra numaraları ve parantez içinde toplam işlem süreleri verilmiştir. Mevcut örnekte öncelik ürün ve bileşenlerine verildiği için arama yedi düğümün kombinasyonları üzerinde yapılacaktır. Arama işleminde iş seçimi stratejilerindeki gibi her istasyona gelen ürün bileşenleri ayrı önceliklendirilseydi 23 seçim yapılması gerekcekti. Bu kadar kombinasyon örnek olarak gösterilemeyeceğinden bu algoritmayla sadece ürün ve bileşenleri önceliklendirilmiştir. Açgözlü arama algoritması ve SPT stratejisine göre ilk adımda şekildeki ilk düğüm seçilmiştir.



Şekil 3.3. Açgözlü arama algoritması ile öncelik atama işleminin ilk adımı

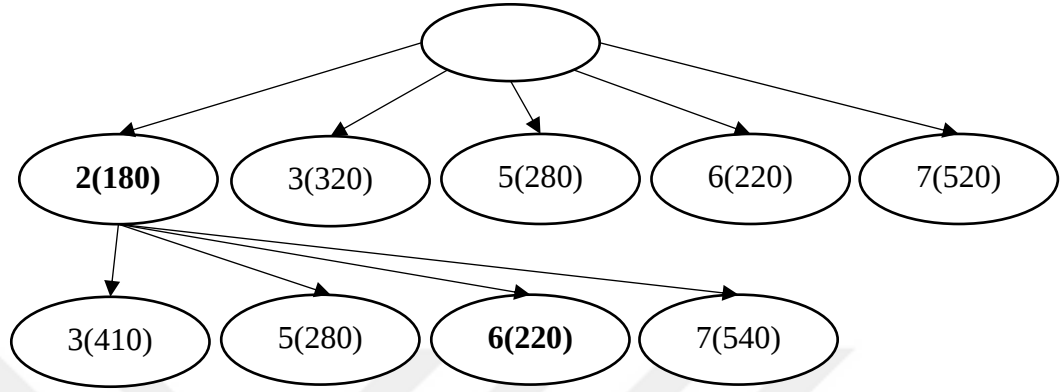
İkinci adımda sehpa ve masa öncelik kısıtından dolayı yine değerlendirilmeyecektir. Bu adımda kalan 3, 5, 6 ve 7 numaralı işler değerlendirilecektir. İkinci adımın ilk adımdan farkı çizelgeye 2 numaralı işin atanmış olması ve alternatifler değerlendirilirken ilk adımda oluşturulan çizelgenin üzerinden devam edilmesidir. Çizelgedeki bir farklılık da sehpanın ayak kompleksinin delme işlemine üst tabladan önce başlamasıdır. Bu yüzden ayak kompleksinin bir tanesi 40 ile 130. saniyeler arasında işlenmiştir. Bunun sebebi daha öncelikli olan üst tablanın 40. saniyede istasyona gelmemiş olmasıdır. Üst tabla 130 ve 220. saniyeler arasında işlenecektir. İkinci ayak kompleksinin delme işlemi ise 220 ve 310. saniyeler arasında gerçekleştirilecektir. Ayak kompleksi çizelgeye henüz dâhil olmadığından delme işleminin zamanında herhangi bir güncelleme yapılmamıştır. Ayak kompleksi çizelgeye dâhil olduğunda üst tablanın delme işlemi de güncellenecektir. Oluşan yeni çizelge Tablo 3.26.'da görülmektedir.

Tablo 3.26. Açgözlü arama algoritmasında ikinci adım

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı
2.Üst Tabla (S)	0-30		30-90	90 - 180	
3.Ayak Kompleksi (S)		0 - 40		40 - 130	310 - 410
3.Ayak Kompleksi (S)		40 - 80		220 - 310	310 - 410
5.Üst Tabla (M)	30 - 130		130 - 250	250 - 310	
6.Perde (M)	30- 120		120 - 190	190 - 250	
7.Ayak Kompleksi(M)		0 - 140		180 - 300	420 - 540
7.Ayak Kompleksi(M)		140-280		300 - 420	420 - 540

Yeni çizelgeye göre ağaç üzerinde seçilecek ikinci düğüm 6 numaralı iş (perde imalatı) olacaktır. İlk adımda 6 numaralı iş için amaç fonksiyonunun değeri 220 iken atamanın ardından 250 olmuştur. Ebatlama işlemine girecek bir diğer ürün bileşeni de masa üst tablası olduğu için masa üst tablasının da işlem bitiş zamanı değişmiştir. Fakat bu durum 6 numaralı işin öncelikli olmasını önlememiştir. Çizelgenin son haline göre işlem bitiş anı 250 olan 6 numaralı işin toplam işlem süresi yine 220 saniye, 310 olan 5 numaralı işin toplam işlem süresi de 280 saniyedir. Ayak kompleleri ise ebatlama işlemine girmedikleri için işe başlama anları “0” olarak kalmış, fakat delme işlemindeki darboğaz sebebiyle toplam işlem süreleri uzamıştır. Buna göre 3 numaralı

işin toplam işlem süresi 410 saniye, 7 numaralı işin de toplam işlem süresi 540 saniyedir. Yapılan hesaplamaların sonucunda arama ağacının son durumu Şekil 3.4.'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Ağaçlı arama algoritması ile öncelik atama işleminin ilk adımı

Üçüncü adımda 2 ve 6 numaralı işler çizelgeye atanmış; 3, 5 ve 7 numaralı işler ise değerlendirilecektir. Değerlendirmede sehpanın ayak kompleksinin delme işlemine ilk sırada gideceği göz önünde bulundurulmuştur. Değerlendirmenin sonucu Tablo 3.27.'de görülmektedir.

Tablo 3.27. Ağaçlı arama algoritmasında üçüncü adım

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı
2.Üst Tabla (S)	0-30		30-90	90 - 180	
3.Ayak Kompleksi (S)		0 - 40		40 - 130	370 - 470
3.Ayak Kompleksi (S)		40 - 80		280 - 370	370 - 470
5.Üst Tabla (M)	120- 220		220 - 340	340 - 400	
6.Perde (M)	30- 120		120 - 190	190 - 250	
7.Ayak Kompleksi(M)		0 - 140		180 - 300	420 - 540
7.Ayak Kompleksi(M)		140-280		300 - 420	420 - 540

Mevcut durumda 5 numaralı iş seçilecektir. Bir sonraki adımda ise 3 numaralı iş seçilecektir ve sehpa için öncelik kısıtı kalkacaktır. Algoritmanın beşinci adımında sehpa, altıncı adımında ise 7 numaralı iş olan ayak kompleksi ve son olarak da masa seçilecektir. Çizelgenin son hali Tablo 3.28.'de görülmektedir.

Tablo 3.28. Ağgözlü Arama Algoritmasında Dördüncü Adım

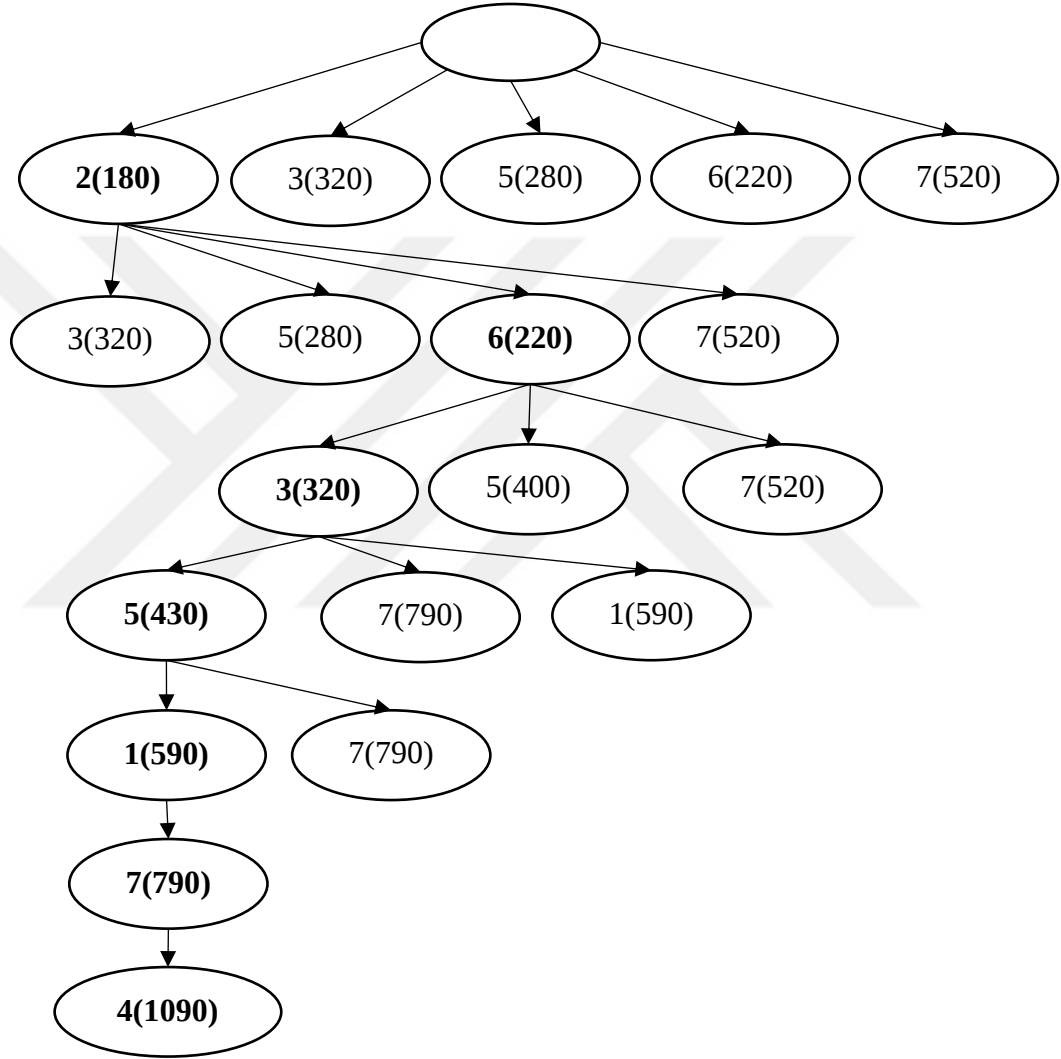
Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
1.Sehpa						470 - 590
2.Üst Tabla (S)	0-30		30-90	130 - 220		
3.Ayak Komplexi (S)		0 - 40		40 - 130	370 - 470	
3.Ayak Komplexi (S)		40 - 80		280 - 370	370 - 470	
4.Masa						790 - 1090
5.Üst Tabla (M)	120- 220		220 - 340	370 - 430		
6.Perde (M)	30- 120		120 - 190	220 - 280		
7.Ayak Komplexi (M)		80 - 220		430 - 550	670 - 790	
7.Ayak Komplexi (M)		220-360		550 - 670	670 - 790	

Ağgözlü arama algoritması her seferinde en az sürececek işlemi seçerken darboğazı dikkate almadığından SPT stratejisi ile çok benzer bir sonuç üretmiştir. Ağacın son durumu Şekil 3.5.'te görülmektedir.

Toplam işlem süresi dikkate alındığı için önceliklendirmede küçük farklılıklar olmuştur, fakat darboğaz ver verimsiz süre aynı gerçekleşmiştir. Bu durumun sebebi en fazla iş yüküne sahip olan delme ve montaj istasyonlarının verimli çizelgelenememesidir. Çizelgenin verimli olması için bu iki istasyonun dengeli çalışması gerekmektedir. İstasyonun dengeli çalışması ise her istasyonun ürüne bağlı en yüksek işlem süresini aşmayacak biçimde çalıştırılmasıyla sağlanabilir. LPT ve ATC stratejilerinin verilen örneğe göre daha iyi sonuç üretmesinin sebebi her iki ürünün bileşenlerinin hem ürünleri sırayla üretecek hem de hattı dengeleyecek biçimde önceliklendirilmesidir. Çizelgenin verimli olması darboğaza ve hattın dengeli çalışmasına bağlı olduğundan darboğaz olmayan işlemlerin önceliklendirilmesi esnasında da bu duruma dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bir istasyona iş seçileceği zaman sadece istasyonun durumu değil, darboğaz ve hattın denge kaybı gibi üretimin genelini etkileyen faktörler de değerlendirilmek isteniyorsa

A* algoritması değerlendirilmelidir. Bu algoritma hem çözümün alt kümelerinden amaç fonksiyonuna en uygununu hem de çözümün bütününe en fazla katkıyı sağlayanı seçmeyi amaçlar. Bu sebeple A* algoritmasının amaç fonksiyonu iki ayrı fonksiyonun birleşiminden oluşur. Bunlardan ilki alternatif işlerden birini seçmenin maliyeti, yani düğüm maliyet fonksiyonudur.



Şekil 3.5. Açgözlü arama algoritması ile öncelik atama işleminin ilk adımı

Açgözlü arama algoritmasındaki gibi SPT ve ATC stratejileri düğüm maliyet fonksiyonu olarak kullanılabilir. Bir diğer fonksiyon da amaç maliyet fonksiyonudur. Bu fonksiyon amaca yakınlığı kontrol etmek için kullanıldığından, fonksiyonun çizelgelenecek istasyonun parametreleri yerine ürünün üretimini ilgilendiren genel

parametrelerle tasarlanması gerekmektedir. Örneğin, teslim sırası (EDD) stratejisi amaç maliyet fonksiyonu olarak kullanılabilen iyi bir stratejidir. İki fonksiyonun bir arada kullanımı ise her bir fonksiyonun değerlerinin toplamı veya ağırlıklı ortalaması şeklinde tasarlanmaktadır.

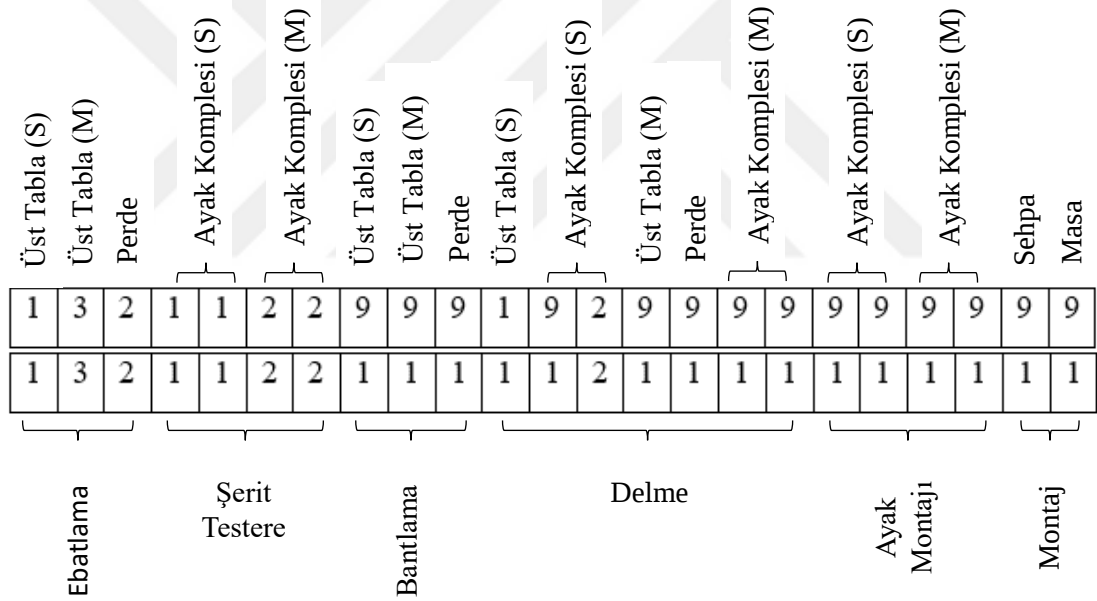
3.6.1.3.2 Sezgi üstü (meta-heuristic) arama algoritmaları

Yerel arama algoritmaları çözümü oluştururken parçadan bütüne gittiği için her adımda yapılan seçim sonraki adımları da kısıtlamakta ya da şekillendirmektedir. Bu sebeple, yerel arama algoritmaları bazen iyileştirilmiş bir çözüme (local optima) takılıp en iyi çözümü (global optima) bulamayabilir. Bu durumun önüne sezgi üstü (meta-heuristic) algoritmalarla geçilmektedir. Sezgi üstü algoritmalar çözümün alt kümelerini birleştirmezler, yani parçadan bütüne gitmezler. Alternatif çözümleri deneyerek permütasyon uzayındaki en uygun çözümü bulmaya çalışırlar. Tabu, benzetimli tavlama (Simulated Annealing), karınca kolonisi, arı algoritması ve genetik algoritma bu algoritmaların en yaygın kullanılanlarıdır.

3.6.1.3.2.1 Genetik algoritmalar

Genetik algoritmaların çalışma biçimi çizelgeleme problemlerini kısa sürede çözmeyi sağladığı için, çizelgeleme alanında çok sayıda genetik algoritma örneği görmek mümkündür. Genetik algoritmalarla çok sayıda alternatif çizelgenin iyi yönlerini içeren en iyi çizelgenin oluşturulması sağlanabilir. Bunun için genetik algoritmalarda bir çaprazlama işlemi, bir uygunluk fonksiyonu ve mutasyon işlemlerinden oluşur. Çaprazlama işlemi için yerel arama algoritmalarıyla ve iş seçim stratejileriyle başlangıç çözümleri (çizelgeler) oluşturulur. Oluşturulan çizelgelerin kromozom olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Bunun için Tablo 3.22., Tablo 3.23., Tablo 3.24. ve Tablo 3.28.'de verilen matrislerdeki (çizelgelerdeki) her bir hücre kromozomu oluşturan genler olacaktır. Ebatlama ve bantlama işlemlerinde 3'er, şerit testere ve ayak montajı işlemlerinde 4'er, deleme işleminde 7 ve montaj işleminde 2 iş bulunmaktadır. Her bir işin öncelik değerleri gen, genleri içeren 23 elemanlı dizi ise kromozomdur.

Başlangıç çözümü olarak oluşturulan dört çizelgedeki her işlem için belirlenen öncelik değerleri kullanılarak kromozomlar oluşturulurken tablolardaki satır ve sütun sıraları kullanılmıştır. Kromozomun ilk üç elemanı ebatlama, sonraki dört elemanı şerit testere, sonraki üç elemanı bantlama, sonraki 7 elemanı delme, sonraki dört elemanı ayak montajı ve son iki elemanı da montaj işlemlerine girecek parçaların öncelik değerleri olacaktır. İlk üç elemenden ilk tablolardaki satır sıralamasına göre “Üst Tabla (S)”, “Üst Tabla (M)” ve “Perde” olacaktır. Bu sıralamaya göre öncelik değerleri yazılarak kromozomlar oluşturulacaktır. Çizelgelerde önceliklendirilmeyen ürün bileşenleri de yer aldığından, önceliklendirilmeyen ürün bileşenlerine en yüksek (1) ve en düşük (9) önceliklerin verildiği ikişer kromozom her çizelge için hazırlanmıştır. Tablo 3.22. için hazırlanan kromozomların yapısı Şekil 3.6.’da görülmektedir.



Şekil 3.6. Genetik algorithmada kullanılan kromozomun yapısı

Başlangıç çözümü olarak kullanılacak ilk üç çizelgenin her biri için ikişer kromozom, açgözlü arama algoritması için de bir kromozom olmak üzere toplam 7 adet kromozom oluşturulmuştur. Çaprazlamada bütün kromozomların eşleşmesi için bir adet kromozomda bütün değerler öncelikli olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu kromozomlar Tablo 3.29.’da verilmiştir. Kromozomlar en iyi çözüme ulaşmak için önemlidir. Bundan dolayı en iyi çözümde görülmesi umulan özelliklere sahip kromozomların kullanılması, çözüme ulaşmayı kolaylaştıracaktır.

Tablo 3.29. Farklı algoritmalarla oluşturulan kromozomlar

Algoritma	Kromozom
En Kısa İşlem Süresi (SPT)	1321122111112111111111
En Kısa İşlem Süresi (SPT)	1321122999192999999999
En Uzun İşlem Süresi (LPT)	3122211312111111111111
En Uzun İşlem Süresi (LPT)	3122211312999999999999
Bariz Gecikme Maliyeti (ATC)	3212211111111111111111
Bariz Gecikme Maliyeti (ATC)	3212211999999999999999
Açgözlü Arama Algoritması	14233661421334266336657
-	1111111111111111111111

Genetik algoritmanın çalışması esnasında, çaprazlama işlemi için öncelikle avantajlı kromozomlar seçilmelidir. Avantajlı kromozomların belirlenmesi uygunluk fonksiyonu ile sağlanmaktadır. Mevcut örnekte uygunluk fonksiyonu işlerin tamamlanma süresi (makespan) seçilebilir. Bu sayede en kısa sürede biten çizelgeler öncelikli olacaktır. İşlem süresi SPT stratejisi ile 1090 saniye, LPT ile 990 saniye, ATC ile 990 saniye, açgözlü arama algoritması ile 1090 saniye ve tüm öncelikler 1 olduğunda 1090 saniye sürmüştür. Kromozomlar işlem süreleri ile ters orantılı puan alacağından işlem süresi 990 saniye olan kromozomlar %13.1, işlem süresi 1090 olan kromozomlar ise %11.9 puan alacaklardır. Kromozomların puanlarına göre rulet tekeri yöntemiyle kromozomlar ikili olarak seçilip çaprazlanacaktır. Çaprazlanma işlemi esnasında kromozomlar bir veya birden fazla noktadan bölünerek birleştirilirler. Mevcut örnekte altı işlem olduğu için kromozomlar işlemler göz önünde bulundurularak altı parçaya bölünüp bir birleriyle birleştirilebilirler. Birleştirme işlemi bittiğinde elde edilen yeni kromozomlar üzerinde mutasyon oranına göre rassal genler seçilip gendeki değer rassal olarak değiştirilir. Bu sayede eldeki çözümden farklılaşma sağlanmaktadır. Mutasyonun yüksek olması çözümü olumsuz etkilemektedir. Düşük olması yerel en iyilerden kaçmada yardımcı olmaktadır. Mutasyon oranı genellikle %0.5 ile %1 arasında belirlenmektedir. Mutasyon oranı belirlendikten sonra genetik algoritmanın durma koşulu belirlenir. Durma koşulu genellikle bir hedef değer, çaprazlama sayısı, çalışma adımı sayısı veya işlem süresi gibi bir parametre ile belirlenmektedir. Durma koşulu belirlendikten sonra algoritma çalıştırılır. Mevcut problem çözüldüğünde çizelge 940 saniyede tamamlanmaktadır. Genetik algoritmanın

avantajı, seçim kurallarıyla sadece işlere atanan öncelikler kullanılarak he istasyonda işlere farklı öncelikler atayarak iyileştirme sağlaması olmuştur. Genetik algoritmalar çizelgelemede doğrudan kullanıldığı gibi, çeşitli algoritmaların ürettiği çizelgeleri iyileştirmek için de yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

3.6.1.3.2.2 Tabu arama algoritması

Tabu algoritması çözümün maliyetini azaltan adımları hafızasında saklayarak geliştirmeye çalışan, çözümün maliyetini artıran seçenekleri hafızada saklayarak bunları uygulamadan kaçınan bir algoritmadır. Tabu algoritmasının etkinliğini belirleyen en önemli unsur olumsuz adımları içeren tabu listesinin ve çözümü iyileştiren seçeneklerin listesi olan elit listenin boyutudur. Tabu algoritmasını çalıştırabilmek için diğer sezgi üstü algoritmalarda olduğu gibi başlangıç çözümüne ihtiyaç vardır. Başlangıç çözümü en iyi çözüm olarak atanır ve üzerinden komşuluk stratejilerine bağlı olarak alternatif çözümler geliştirilir. Çizelgeleme için kullanılacak olan komşuluk stratejisi önceliğin bir işten alınması ve bir işe öncelik verilmesi şeklindedir. Algoritmanın ilk adımında tabu listesi ve elit liste boştur. Tabu listesi, alternatif çözümler oluşturulurken önceliği azaltılan veya önceliği artırılan işlerden üretim süresini en fazla uzatanlarla oluşturulur. Elit liste ise önceliği azaltıldığında veya artırıldığında üretim süresini kısaltan işlerle oluşturulur.

Elit liste ve tabu listesi kullanılarak alternatif çözümler oluşturulur. Tabu listesinde kayıtlı olan öncelik azaltma veya artırma işlemleri alternatif çözüm oluşturmada kullanılmaz. Elit listede ise önceliği artırılan işlerin öncelikleri daha fazla artırılarak, önceliği azaltılan işlerin önceliği daha fazla azaltılarak alternatif çözümler üretilir. Tabu listesinde veya elit listede olmayan işler için öncelik atama işlemleri rassal yapılır. Üretilen çözümlerdeki durumlara göre tabu listesi ve elit liste yeniden güncellenir. Eğer tabu listesi dolarsa üretim süresini tabu listesindeki elemanlardan herhangi birinden daha fazla uzatan öncelik ataması tabu listesine yazılır ve listedeki en son eleman silinir. Elit liste dolarsa üretim süresini listedeki elemanlardan herhangi birinden daha fazla kısaltan öncelik ataması elit listeye yazılır ve listenin son elemanı silinir. Elit listeye eleman eklenmesi çözümde iyileşme sağlandığı anlamına

geleceğinden oluşan yeni çözüm en iyi çözüm olarak kabul edilir. Durma koşulu sağlanana kadar bu adımlar yinelenir. Tabu algoritması durduğunda ise son atanan çözüm, algoritmanın bulduğu en iyi çözüm olarak değerlendirilir.

Sehpa ve masa örneğinde herhangi bir yerel arama algoritması veya bir iş seçim stratejisi ile belirlenmiş olan çizelge başlangıç çözümü olarak kullanılabilir. SPT stratejisi ile oluşturulan çizelge tabu algoritmasıyla iyileştirilmek istenirse ilk adımda işler rassal olarak seçilecek ve öncelikleri değiştirilerek tabu listesi, elit liste ve alternatif çözümler oluşturulacaktır. Başlangıç durumundaki iş önceliklerini ifade edebilmek için açgözlü arama algoritmasıyla oluşturulan iş öncelikleri kullanılmıştır. Tablo 3.21.'de sıra numaraları verilen ürün bileşenlerinin sırasına göre üretim öncelikleri "5,1,3,7,4,2,6" şeklindedir. Buna göre tablonun ilk satırında yer alan sehpanın işlem önceliği 5, ikinci satırda yer alan sehpa üst tablasının işlem önceliği 1 olacaktır. Diğer bileşenlerin öncelik değerleri de dizinin kalan elemanlarıdır.

Tabu algoritması çalışırken ikişer tane iş rastgele seçilecek ve seçilen işlerin önceliklerini rassal olarak güncellenecektir. Seçilen iş çiftlerinden birinin önceliği rassal olarak azaltılacak, diğerinin önceliği ise rassal olarak artırılabilecektir. Rassal seçimlerin sonucunda iş çiftleri "1-6, 7-3, 2-3, 7-2, 4-7" olarak belirlenmiştir. 1-6 iş çiftinin üretim önceliğinin değiştirilmesi üretim süresini değiştirmemektedir. 7-3'te ise masa ayak kompleksinin önceliğinin artırılacak ve sehpa ayak kompleksinin önceliğinin azaltılacaktır. Yapılan değişikliğin sonucunda üretim süresi 50 saniye uzamaktadır. Bundan dolayı, değişiklik tabu listesine yazılacaktır. Masa ayak kompleksinin önceliği artırılırken sehpa ayak kompleksinin önceliği düşürülmemelidir. 2-3 öncelik değişikliği de aynı etkiyi yapacağı için tabu listesine alınır. 7-2 öncelik değişikliğinde ise toplam üretim süresi 1010 saniyeye düşmüş ve bu değişiklik tabu listesine alınmıştır. En iyi çizelge de Tablo 3.30.'da belirtilen çizelge olarak değiştirilmiştir. Üretim süresi 4-7 değişikliği ile değişmediğinden (990 saniye olarak kaldığından), bu değişiklik herhangi bir listeye eklenmemiştir.

Tablo 3.30. Masa Üst Tablasının İşlem Önceliği Değiştirildiğinde Oluşan Çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	190-220 (3)		290 – 350 (3)	610 - 700		
Ayak Kompleksi (S)		280 – 320 (2)		520 - 610	790 - 890	
Ayak Kompleksi (S)		320 – 360 (2)		700 - 790	790 - 890	
Sehpa						890 - 1010
Üst Tabla (M)	90 – 190 (1)		190 – 310 (1)	460 - 520		
Perde (M)	0 – 90 (2)		90 – 160 (2)	400 – 460		
Ayak Kompleksi (M)		0 -140 (1)		140 - 260	380- 500	
Ayak Kompleksi (M)		140 – 280 (1)		280 - 400	380 - 500	
Masa						500 -800

Algoritma çalışmaya devam ederken öncelikle 7-2 öncelik değişimine bağlı olarak 2 numaralı işin (sehpa üst tablası üretimi) önceliği sürekli düşürülecek ve 7 numaralı işin (masa ayak kompleksi üretimi) önceliği sürekli artırılabacaktır. Kalan işler ise rassal olarak belirlenip önceliklerinin artırılması ve azaltılması da rassal olarak yapılacaktır. Algoritma anlatılan biçimde çalışarak üretim süresinin 980 saniyeye kadar düşürülmesini sağlamıştır. Tabu algoritmasının ürettiği sonucun genetik algoritmanın ürettiği sonuçtan daha kötü olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tabu algoritmasında kullanılan modelin sadece ürün bileşeni seviyesinde olması, genetik algoritmada ise ürün bileşenlerinin her istasyonda ayrı önceliklere sahip olmasıdır. Tabu algoritmasının çalışma adımlarının gösterilebilmesi için daha basit bir model kurulmuştur.

3.6.2. Matematiksel modeller

Çizelgeleme probleminin matematiksel modellerle çözümünde ikili değişkenler modelin karar değişkenleri olmaktadır. Çözüm ikili değişkenler olarak ifade edilmektedir. Öncelik kısıtları için Bu sayede amaç fonksiyonunun değeri hesaplanırken maliyet matrisi 1 ve 0'lerden oluşan çözümle çarpılarak toplam maliyet

elde edilmektedir. Çözüm matrisinde 1 olan iş ve tezgâh eşleşmeleri ya da iş sıralamaları en uygun maliyeti sağlayan atamaları ifade etmektedir. Üretim süresinin en aza indirilmesi için toplam ağırlıklı işlem süresini veya toplam üretim süresini (C_{max}) amaç fonksiyonu olarak kullanmak gerekmektedir.

Matematik modelle çizelgeleme yapılırken, model üretim sisteminin yapısına göre kurgulanmaktadır. Tek makine çizelgelemek için ayrı bir modele ihtiyaç duyulurken, atölye çizelgelemek için ayrı bir model ve paralel makinelerin çizelgelenmesi için ayrı bir modele ihtiyaç vardır. Tek makine çizelgelemede amaç fonksiyonunun toplam işlem sürelerini en aza indirecek biçimde oluşturulması yeterlidir. Bu sebeple, amaç fonksiyonunda ağırlık (w_j), işlem süresi (T_{oj}), iş önceliği (x_{ij}) ve iş indisleri (i, j) kullanılacaktır. x_{ij} sadece 1 veya 0 değeri alabilen ikili değişkendir. x_{ij} 'nin 1 olması i . işin, j . işten önce yapılacağı anlamına gelmektedir. Verilen parametrelerle elde edilen amaç fonksiyonu Denklem 3.39.'daki gibi olacaktır.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} w_j T_{oj} + \sum_{l=1}^n w_l T_{ol} \quad (3.39)$$

Kısıtlar 3.40. ile 3.43. arasındaki denklemlerde verilmiştir. Çözüm ikili değişken üzerinden üretileceğinden, kısıtlar x değişkeni üzerinde oluşturulmuştur. Denklem 3.40.'taki kısıta göre iki iş aynı anda birbirinden önce olamaz.

$$\left\{ \forall_{j=1, l=1}^n : j \neq l \right\} x_{jl} + x_{lj} = 1 \quad (3.40)$$

Denklem 3.41'de verilen kısıta göre en az bir iş diğerlerinden önce olmalıdır. Bu sayede, modelin üreteceği çözümde mutlaka öncelikli işler olacaktır. Aksi takdirde model amaç fonksiyonunu en aza indirmek için hiçbir işe öncelik vermeyecek ve üretim yapılmayacaktır.

$$\left\{ \forall_{j=1, k=1, l=1}^n : j \neq k, \right. \\ \left. j \neq l, k \neq l \right\} x_{kj} + x_{lk} + x_{jl} \geq 1 \quad (3.41)$$

Denklem 3.42.'de ve Denklem 3.43.'te verilen son iki kısıt ise x matrisinin ikili değerlerden oluştuğunu ve hiçbir işin kendisiyle öncelik kıyaslaması yapılamayacağını göstermektedir. Öncelik matrisi (x) iki boyutlu olduğu için her iş birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Örneğin bir numaralı iş kendisiyle, iki numaralı işle ve matristeki diğer işlerle karşılaştırılacaktır. Her iş kendisinden önce olamayacağından 1-1, 2-2 gibi eşit indisli elemanların değeri 0 olmalıdır.

$$\{\forall_{j=1,l=1}^n\} x_{jl} \in \{0, 1\} \quad (3.42)$$

$$\{\forall_{j=1}^n\} x_{jj} = 0 \quad (3.43)$$

İkili değişkenlerin kullanıldığı modellerden biri de alternatif makineler arasından seçim yapmak (dispatching) için oluşturulmuştur. Modelin amaç fonksiyonu (iş seçim mantığı) en hızlı makineye işi atamaktır. Bunun için makinenin hızı bire bölünerek ($\frac{1}{v_i}$) amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Denklem 3.44.'teki amaç fonksiyonunun bir diğer değişkeni de ikili değişkendir. Yeni amaç fonksiyonunda x değişkeni sadece işler için değil, makineler için de bir indis alıp üç boyutlu hale gelmiştir.

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n x_{ijl} \frac{1}{v_i} \quad (3.44)$$

Denklem 3.45.'te verilen kısıt x matrisindeki her satırın toplamının 1 olması gerektiğini yani her işin mutlaka bir öncelik değeri alması gerektiğini göstermektedir.

$$\{\forall_{j=1}^n\} \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^n x_{ijl} = 1 \quad (3.45)$$

Denklem 3.46. ve Denklem 3.47'de verilen kısıtlar ise tüm değerlerin ikili olması gerektiğini ve önceki modeldeki gibi her işin kendisiyle öncelik kıyaslamasının yapılamayacağını ifade etmektedir.

$$\{\forall_{i=1}^m \forall_{j=1,l=1}^n\} x_{jl} \in \{0, 1\} \quad (3.46)$$

$$\{\forall_{j=1}^n\} x_{jj} = 0 \quad (3.47)$$

Makine seçim ve çizelgeleme işlemlerinde ikili değişkenlerin katkısı büyüktür. Akış tipi üretimde de darboğaz istasyonun çizelgelenmesinde benzer modeller kullanılabilir. Fakat atölye tarzı üretimin çizelgelenmesinde zaman indisli (t) ikili değişkenler ve $C_{\max}$ kullanılmaktadır. $C_{\max}$ 'ın modelde kullanılması çizelgelemeden kaynaklanan verimsizliklerin de modele yanıtılma gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Atölye tipi üretimin çizelgelenmesinde amaç fonksiyonu Denklem 3.48.'de verildiği gibi $C_{\max}$ 'ın en aza indirilmesine dayanmaktadır.

$$\min C_{\max} \quad (3.48)$$

$C_{\max}$ en aza indirilirken dikkat edilmesi gereken iki temel durum vardır. Bunlardan ilki üretimin tamamlanma süresinin imalat ön süresine eşit veya imalat ön süresinden büyük olması gerekliliğidir. Denklem 3.49.'da verilen kısıt eklenmezse $C_{\max}$ 'ın değeri 0'ın altına inecektir. Kısıt başlangıçtan (t=1) planlama ufkuna (H) kadar olan tüm zaman dilimini kapsayacak biçimde ayarlanmıştır.

$$\{\forall_{i=1}^m \forall_{j=1}^n\} \sum_{t=1}^H tx_{ijt} - C_{\max} \leq 0 \quad (3.49)$$

Dikkat edilmesi gereken bir diğer durum da işlerin öncelik kısıtlarıdır. Çünkü mevcut modelde tüm işlemler aynı anda başladığında $C_{\max}$ işlem sürelerinin toplamına eşit olacaktır. Olması gereken ise işlemler sıralı olduğunda $C_{\max}$ 'ın toplam işlem süresine eşit olması veya toplam işlem süresinden büyük olmasıdır. Bu durumun modelde ifade edilebilmesi için Denklem 3.50.'deki kısıt modele eklenmiştir. x'in ikili değişken olduğunu gösteren kısıt da Denklem 3.51.'de verilmiştir.

$$\{\forall_{h=1}^m \forall_{i=1}^h \forall_{j=1}^n\} \sum_{t=1}^H tx_{ijt} + p_{ij} - \sum_{t=1}^H tx_{hjt} \leq 0 \quad (3.50)$$

$$\{\forall_{i=1}^m \forall_{j=1,l=1}^n\} x_{jl} \in \{0, 1\} \quad (3.51)$$

3.6.3. Dinamik programlama

Dinamik programlama, problemleri “Böl ve fethet!” yaklaşımı ile çözmektedir. Dinamik programlama ile çözülecek olan problem öncelikle alt kümelerle ayrılır. Alt kümelerden en iyileri seçilerek problemin çözümü elde edilir. Dinamik programlama çözümleri ileriye ve geriye doğru olmak üzere iki biçimde yapılır. Her ikisinde de başlangıç fonksiyonu, bir özyinelemeli ilişki fonksiyonu ve amaç fonksiyonu yer almaktadır. Başlangıç fonksiyonu çözümün ilk aşamasında kullanılacak parametreleri içermektedir. Öz yinelemeli ilişki fonksiyonu problemin alt kümelerini oluşturmada kullanılan fonksiyondur. Bu fonksiyon sonlandığında en iyi çözüm elde edilmiş demektir. Amaç fonksiyonu ise öz yinelemeli ilişki fonksiyonunun çalıştığı her adımda çalıştırılarak problemin alt kümelerini karşılaştırmada ve en iyi çözümün seçilmesinde kullanılır.

Amaç fonksiyonu $(V(I))$ işlem zamanını $(T_o(w, o, i))$ kullanan bir maliyet fonksiyonundan $(C(T_o(w, o, i)))$ oluşur. Denklem 3.52.’de verilen amaç fonksiyonu maliyet fonksiyonunun çözüm alt kümesinde yer alan ürünlerin ilgili iş merkezlerindeki işlem sürelerinin toplamına eşittir. Amaç fonksiyonu işlem sürelerini kullanan her türlü doğrusal veya polinomal bir denklem olabilir. Fonksiyondaki I indisi tüm ürünleri, i indisi ürünü, o indisi işlemi ve w ise iş merkezini ifade etmektedir.

$$V(I) = \sum_{i=1}^I C(T_o(w, o, i)) \quad (3.52)$$

Özyinelemeli ilişki fonksiyonu ise mevcut alt çözümden sonra kalan alt kümeler içinden en iyiyi seçmeyi sağlar. Bunun için yeni problem parçasının alt kümelerinden, mevcut çözümün maliyetini en az artıracak olanı seçer. Denklem 3.53.’te verilen özyinelemeli fonksiyondaki $I - \{i\}$ yeni problem parçasına kadar olan çözümü, $j \in (I - \{i\})$ ’ise yeni alt problemin çözüm alt kümelerini ifade etmektedir.

$$V(I) = \min(V(I - \{i\}) + \sum_{j \in (I - \{i\})'} C(T_o(w, o, j))) \quad (3.53)$$

Başlangıç durumu ise ilk alt problemin her bir alt kümesinin çözümünün maliyetidir. Denklem 3.54.'te başlangıç durumunda yapılan hesaplama verilmiştir.

$$V(i) = C(T_o(w, o, i)) \quad (3.54)$$

Dinamik programlama ile çizelgeleme yaparken işlerin öncelikleri sırayla değiştirilecektir. Bu haliyle dinamik programlama ile en iyi çözümü bulma süreci sezgi üstü algoritmalarındaki çözüm süreci ile çok benzemektedir. Dinamik programlama ile sezgi üstü algoritmaların arasındaki fark ise dinamik programlamanın en iyi çözümü garantilemesi, fakat daha uzun çalışmasıdır. Sezgi üstü algoritmalar çözümde iyileştirme yapsalar da en iyi çözümü garanti etmezler ve daha kısa sürede sonlanırlar.

Çizelgeleme sürecinin ilk adımı sehpa ve masa bileşenlerine teker teker öncelik verip toplam üretim sürelerinin belirlenmesi olacaktır. Bu bağlamda maliyet fonksiyonu C_{max} , amaç fonksiyonu ise C_{max} 'ın en aza indirilmesi olacaktır. Çözümün ilk adımında başlangıç fonksiyonu çalıştırılır. Bu fonksiyon, 2'den 7.2'ye kadar numaralandırılmış olan ürün bileşenlerinin sırayla önceliklendirilerek üretim sürelerinin hesaplanmasını sağlar. Tablo 3.31.'de verilen çözümde F_0 satırı başlangıç fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. F_0 satırının ilk sütunu ($V(1)$) 2 numaralı ürün bileşeni önceliklendirildiğinde üretimin tamamlanma zamanını içermektedir. F_1 satırının ikinci sütunu $F_{1,2}$ Denklem 3.53.'te verilen eşitliğe göre " $V(1)+C_2$ " ile " $V(2)+C_1$ " değerlerinden küçük olanına eşittir. Yani 2 numaralı ürün bileşeni ile 3.1 numaralı ürün bileşeninin öncelikleri değiştirilerek tekrar C_{max} hesaplanmakta ve küçük olanı $F_{1,2}$ olarak kabul edilmektedir. $F_{1,2}$ 'den $F_{1,7}$ 'ye kalan olan tüm sütunlar ilgili ürün bileşenlerinin öncelikleri değiştirilerek hesaplanmıştır. Tablonun üçüncü satırı (F_2) hesaplanırken üç değer arasından en küçüğü seçilecektir. Örneğin üçüncü sütun ($F_{2,3}$) için hesaplanacak değerler " $V(2,3)+C_1$ ", " $V(1,2)+C_3$ " ve " $V(1,3)+C_2$ " olacaktır. Yani 3.2 ve 3.1 numaralı ürün bileşenlerinin optimal önceliklerinin belirlendiği senaryoda 2 numaralı ürün bileşeninin üçüncü en yüksek önceliğe sahip olması, $F_{1,2}$ çözümünde 3.2 numaralı ürün bileşeninin üçüncü en yüksek önceliğe sahip olması ve $F_{1,3}$ çözümünde 3.1 numaralı ürün bileşeninin üçüncü en yüksek önceliğe sahip olması

karşılaştırılacaktır. Sonraki adımlar da aynı biçimde tekrarlanarak devam edecek ve Tablo 3.31.'deki sonuçlar elde edilecektir.

Tablo 3.31. Dinamik programlamanın adımları

SIRA	2	3.1	3.2	5	6	7.1	7.2
F ₀	1090	1090	1090	1090	1210	1360	1360
F ₁		1090	1090	1090	1090	1360	1360
F ₂			1090	1090	1090	1090	1090
F ₃				1090	1090	1090	1090
F ₄					1090	1060	1060
F ₅						1060	1060
F ₆							990

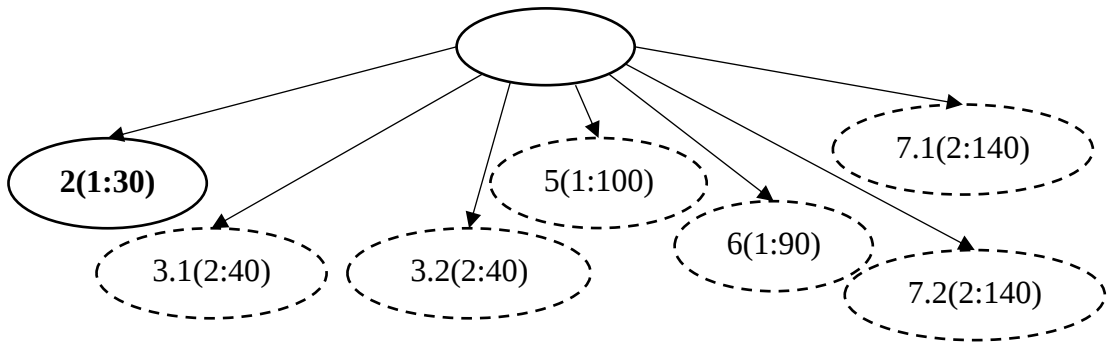
Elde edilen en iyi seçenek önce masanın sonra sehpanın bileşenlerinin sırayla üretildiği senaryodur. Bu senaryoya göre üretim 990 saniyede tamamlanmaktadır. Dinamik programlama ile tabu algoritmasında aynı modeller çözülerek aynı sonuçlar elde edilmiştir. Problem küçük ve örnek olarak verilen model yüzeysel olduğu için sezgisel yöntemlerle en iyi sonuca ulaşılmıştır. Fakat sezgisel yöntemler iyi sonucu garantilemezken, dinamik programlamada en iyi sonuca ulaşma garantisi vardır. Sezgisel yöntemlerin avantajı hızlı olmalarıdır. Dinamik programlama çözümün alt kümelerini oluşturur ve problem parçalarını iyileştirerek çözümü bulur. Bundan dolayı çözüm uzayında daha fazla zaman harcar, fakat tüm alternatifleri göz önünde bulundurmadan, akılcı bir strateji ile en iyi sonuca ulaşır.

3.6.4. Dal sınır algoritması

Dal sınır algoritması, dinamik programlama gibi en iyi sonucu garantileyen bir yöntemdir. Bu algoritmanın avantajı en uzun çalışma süresinin dinamik programlama kadar olması veya daha kısa sürede çözüme ulaşmasıdır. Buna karşın algoritmanın dinamik programlamadan daha kısa sürede sonlanacağını bir garantisi yoktur. Dal sınır algoritmasının çalışma biçimi yerel arama algoritmalarına benzemektedir. Yerel arama algoritmalarından farklılaştığı nokta komşuluk stratejisidir. Yerel arama algoritmaları mevcut durum (düğüm) ile ilişkili olan yeni durumlar (düğümler) ile

komşuluk ararken, dal sınır algoritması henüz bir düğümle ilişkisi bulunmayan tüm düğümleri (yapraklar) değerlendirerek amaç fonksiyonun değerinin en uygun olduğu düğümden çözümü devam ettirir. Bu sayede her seferinde farklı düğümlerden ilerlenerek çözüm aranır. Optimal çözümün değerini geçen düğümlere uğranmayacağından çözüm kümesinin tüm alt kümeleri değerlendirilmemiş olacaktır.

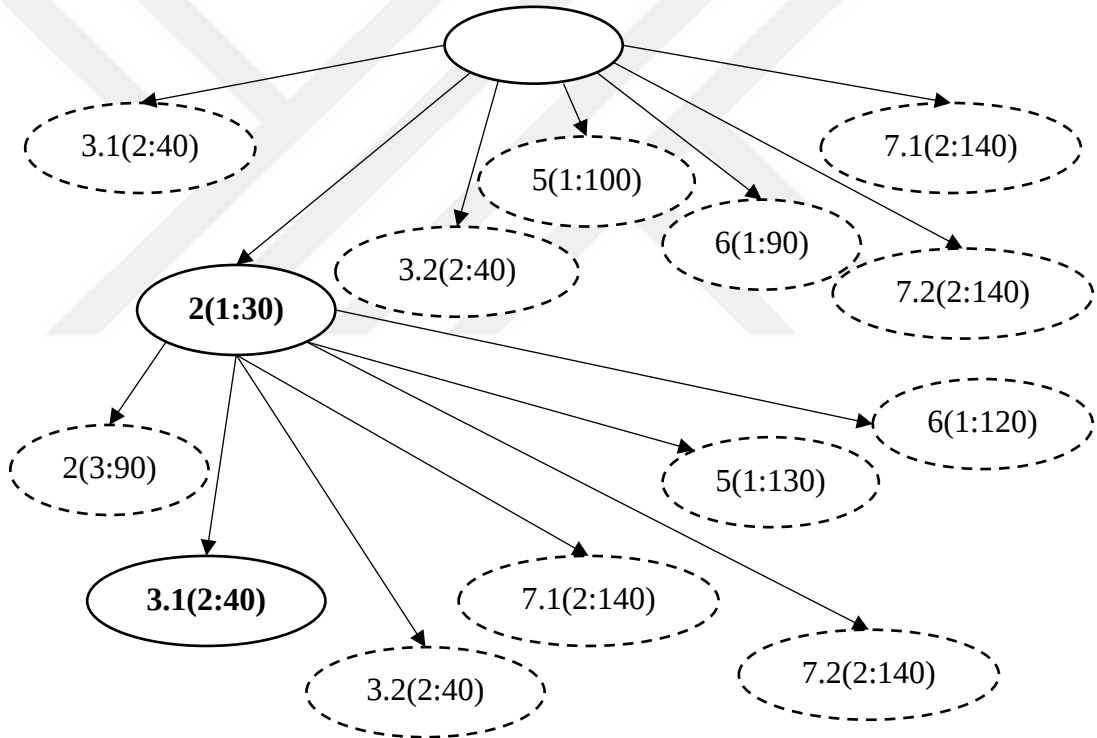
Dal sınır algoritması ile en iyi çözümü bulmak için sadece ürün bileşenleri önceliklendirilmemiş her ürün bileşeni tüm iş merkezlerinde ayrı önceliklerde seçilmiştir. Yani tüm işler birbirinden bağımsız olarak önceliklendirilmiştir. Açgözlü arama algoritmasında seçilen ürün bileşeninin göreceği tüm işlemler ile C_{max} hesaplanırken, dal sınır algoritmasında sadece seçilen iş kullanılarak C_{max} hesaplanmıştır. Dal sınır algoritmasında çözülen model açgözlü arama algoritmasıyla da çözülebilir, fakat problemin çözümünde farklı yaklaşım ve algoritmaları gösterebilmek için farklı modeller ve algoritmalar kullanılmıştır. Dal sınır algoritması ile mevcut modelin çözümüne Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi en kısa süreli işlem seçilerek başlanır. Şekilde işlem sürelerinin yanında işlemi belirtmek için bir de numara kullanılmıştır. Buna göre ebatlama işlemi 1, şerit testere 2, kenar bantlama 3, delme 4, ayak montajı 5 ve montaj 6 numaralı işlemlerdir.



Şekil 3.7. Dal sınır algoritması ile iş seçiminin ilk adımı

İlk adımda en kısa işlem süresine sahip olan iş, sehpanın üst tablası öncelikli olarak seçilir. İkinci adımda ise sehpa üst tablasının ebatlama işlemi ardından önceliklendirilmesi gereken iş seçilecektir. Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi alternatif işler arasında sehpa üst tablasının kenar bantlama işlemi ve ilk adımdaki diğer işlemler yer almaktadır. Üst tablanın kenar bantlama işlemi ikinci sırada seçildiğinde C_{max} 'ın değeri

90 olmaktadır. İkinci sırada sehpanın ayağı şerit testerede işlendiğinde, farklı istasyonlarda işlem gördükleri için, C_{max} 'ın değeri 40 olmaktadır. İkinci adımın sonunda yapraklar arasında iki tane alternatif oluşacaktır. Bunlardan biri birinci adımda sehpa ayağının şerit testere işlemine gitmesidir. Diğeri ise sehpa üst tablasının üretilmesi ve sehpa ayağının üretilmesidir. Alternatiflerden herhangi birinin seçilmesinde bir sakınca yoktur. Çünkü ilerleyen adımlarda seçilmemiş olan yaprak da mutlaka değerlendirilecektir. Mevcut durumda ikinci adımdaki en iyi seçenek tercih edilmiştir. Bu tercih stratejisine derinine arama (breadth first search) stratejisi denir. Derinine arama stratejisi sonuca ulaşmaya odaklandığından en iyi çözüme daha hızlı ulaşmayı sağlayabilir.



Şekil 3.8. Dal sınır algoritması ile iş seçiminin ikinci adımı

Algoritmanın üçüncü adımındaki alternatif düğümler birinci ve ikinci adımdaki alternatif düğümlerin yanı sıra sehpa ayağının delme işlemine girmesidir. Alternatif düğümler içerisinde C_{max} değeri en küçük olan seçim ilk aşamada sehpanın 3.2 numaralı ayağının şerit testerede işlem görmesidir. Bu seçenek değerlendirildiğinde Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi mevcut çözümden (daldan) başka bir dala geçilmiştir olacaktır.

Modelde dikkat edilen önemli bir nokta ise işler önceliklendirilirken sadece istasyonun müsait olduğu anda ara stokta yer alan işlere değil mutlaka istasyonda birlikte yer alacak (işlemde veya tampon stokta bekleme anları kesişecek) işler arasında önceliklendirme yapılmış olmasıdır. Bir işin kendinden önce istasyonu terk etmiş herhangi bir işle kıyaslanması anlamsızdır. Fakat bir işin bekleyebileceği veya bekletebileceği tüm işlerle karşılaştırılması gerekmektedir. Tablo 3.32.'de verilen çizelgede görüldüğü gibi, bu durum ele alınmasaydı delme istasyonun da masanın ayağından önce perdesi işleme alınacaktı ve masanın ayak montaj işlemine bağlı olarak masa montaj işlemi de gecikecekti.

Tablo 3.32. Masa ayağının işlem önceliği değiştirildiğinde oluşan çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	190-220		410 – 470	700 – 790		
Ayak Kompleksi (S)		260 – 300		520 – 610	700 - 800	
Ayak Kompleksi (S)		300 – 340		610 – 700	700 - 800	
Sehpa						820 - 940
Üst Tabla (M)	90 – 190		290 - 410	460 - 520		
Perde (M)	0 – 90		90 - 160	400 - 460		
Ayak Kompleksi (M)		0 -140		140 – 260	400 - 520	
Ayak Kompleksi (M)		140 - 280		280 - 400	400 - 520	
Masa						520 -820

3.6.5. Kısıt karşılama (constraint satisfaction) problemi

Kısıt programlama (constraint programming), problemin en iyi çözümünü bulmak yerine, kısıtları karşılayacak bir çözüm elde etmeyi amaçlamaktadır. Kısıt karşılama probleminin çözümünde kullanılan kısıt programlama modeli iki temel parçadan oluşur. Bunların biri modelin kısıtlarıdır. Kısıt karşılama probleminin modellerinde matematiksel modellerdeki gibi doğrusal veya doğrusal olmayan kısıtlar kullanılabileceği gibi diğer kısıtlarla mantıksal bağları olan veya nicelik ifade eden

kısıtlar da kullanılabilir. Kısıt karşılama probleminin diğer parçası da modelin çalışması esnasında karar değişkenlerinin değerlerini güncelleyecek prosedürlerden oluşan program parçalarıdır. Kısıt programlama bu yönleriyle matematiksel programlamadan daha esnektir ve zamanla en iyileme problemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Kısıt programla modeli oluşturulurken tümünden gelim yaklaşımı ile modelin optimal durumu düşünülmektedir. Atölyede en iyi çizelge oluşturulduğunda, kısıtlar teorisine göre, darboğaz istasyon olabilecek en yüksek verimde çalıştırılmış demektir. Darboğaz istasyondan sonraki istasyonlarda darboğazı etkileyecek gereksiz beklemler de olmayacaktır. Mevcut problem kısıt programlama ile çözülmek istendiğinde model darboğaza erişimi hızlandıracak ve darboğazı bekletmeyecek biçimde kurgulanmalıdır. Bundan dolayı darboğaz istasyona uğrayan işler içerisinde istasyona en çabuk ulaşacak ürün bileşenlerine ve bu ürün bileşenlerinin ilişkili oldukları diğer ürün bileşenlerine öncelik verilmelidir. İşler sıralanırken işlem önceliği kısıtları da modele eklenmelidir.

Kısıt programlama ile çizelgeleme problemi çözülürken kullanılabilir başka bir yaklaşım da proje çizelgeleme (PERT scheduling) yaklaşımıdır. Bu yaklaşım da darboğaz istasyon mantığına benzemektedir fakat istasyon yerine iş temel alınmaktadır. Her zaman en az gevşek zamana sahip olan işler önceliklendirildiğinde, en öncelikli işler aksaması halinde C_{max} 'ı da uzatacak işler olacaktır. Bu yaklaşım ile kurulan model kullanılarak Comet yazılımı ile sehpa ve masa üretimi en iyilenmeye çalışıldığında C_{max} 'ı azaltmak için amaç fonksiyonu Şekil 3.10.'daki gibi oluşturulmuştur. Şekilde minimize parametresi içinde görülen “cp” değişkeni kısıt programlama motorunu ifade etmektedir. “*makespan.start()*” fonksiyonu ise “*makespan*” isimli aktivitenin başlangıç anını, yani üretimin tamamlanma süresini (C_{max}) vermektedir. Model çalışırken her adımda amaç fonksiyonu çalıştırılmakta ve amaç fonksiyonunu azaltacak adımlar çözüme dâhil edilmektedir.

```
minimize<cp>
    makespan.start()
```

Şekil 3.10. Kısıt karşılama modelinin amaç fonksiyonu

Modelin sonraki bölümü kısıtların oluşturulmasıdır. Çözümün her adımında kısıtlar kontrol edilerek çözümün kısıtlara uygunluğu sorgulanır. Kısıtlara uygun bir alternatif çözüm bulunamadığında en iyi çözümün bulunduğu kabul edilmektedir. Modelin kısıtları Şekil 3.11.'de verimlidir.

```

subject to {

    forall(j in Jobs)
        forall(t in Tasks: t != Tasks.getUp())
            a[j,t].precedes(a[j,t+1]);
    forall(p in Precedings)
        a[precedingConstraints[p,0],precedingConstraints[p,1]].precedes(
            a[precedingConstraints[p,2], precedingConstraints[p,3]]);

    forall(j in Jobs)
        a[j,Tasks.getUp()].precedes(makespan);
    forall(j in Jobs, t in Tasks)
        a[j,t].requires(r[machine[j,t]]);

```

Şekil 3.11. Kısıt karşılama modelinin kısıtları

Modelin ilk kısıtı Tablo 3.33.'te verilen rotadaki işlerin sıralı olarak üretilmesi gerektiğidir. Kısıtın oluşturulması için “Jobs” olarak tanımlanmış ürün bileşenleri ile “Tasks” olarak tanımlanmış ürünler döngü içerisinde “j” ve “t” indisleriyle ifade edilmiştir. “a” matrisi “Activity” türünde olup satır sayısı parça miktarı kadar, sütun sayısı ise işlem miktarı kadardır. “a” matrisinde öncelik kısıtları ve kullanılacak makineler yer almaktadır. Öncelik kısıtları “a[j,t].precedes(a[j,t+1]);” komutu ile tanımlanmıştır. İlgili kısıtlar Tablo 3.33.'te verilmiştir.

Tablo 3.33. Masa ve sehpanın rota verileri

Parça	İşlem 1	İşlem 2	İşlem 3
Üst Tabla (S)	Ebatlama (30)	K. Bantlama (60)	Delme (90)
Ayak Kompleksi (S)	Şerit Testere (40)	Delme (90)	-
Ayak Kompleksi (S)	Şerit Testere (40)	Delme (90)	-
Ayak (S)	A. Montajı (100)	-	-
Sehpa	Montaj (120)	-	-
Üst Tabla (M)	Ebatlama (30)	K. Bantlama (60)	Delme (90)
Perde (M)	Ebatlama (30)	K. Bantlama (60)	Delme (90)
Ayak Kompleksi (M)	Şerit Testere (140)	Delme (120)	-
Ayak Kompleksi (M)	Şerit Testere (140)	Delme (120)	-
Ayak (M)	A. Montajı (120)	-	-
Masa	Montaj(300)	-	-

İkinci kısıt ise “*precedingConstraint*” dizisinde yer alan montaj önceliklerinin eklenmesidir. Bu dizide ayak kompleksinin ayak montaj işleminin yapılması için her iki ayağın şerit testere ve delme işlemlerinin tamamlanmış olması gerektiği yer almaktadır. Bu kısıtın eklenebilmesi için ürün ağacında verilmeyen “Ayak” isimli bir ürün bileşeni rotaya eklenmiştir. Ayak montaj işlemi de ayak bileşenine atandığı için ayak komplelerinin tüm işlemleri bitmeden ayak montajı başlamamaktadır. Montaj işleminin başlaması için de üst tabla, (masada) perde ve ayak bileşenlerinin tamamlanması gerekmektedir. Bu gereklilik de “*precedingConstraints*” dizisinde belirtilmiştir.

Üçüncü kısıtta “*makespan*” isimli aktivitenin tüm işlerden sonra başlayacağı belirtilmiştir. Tüm işler tamamlandıktan sonra başlayacak olan bu kukla aktivitenin başlama anı üretimin tamamlanma süresine eşit olacaktır. Bu aktivite kullanılarak üretimin tamamlanma süresi modele eklenmiş ve amaç fonksiyonunda temsili sağlanmıştır. Modeldeki sın kısıt ise her aktivitenin gerçekleştirileceği makine veya istasyonların (iş merkezlerinin) tanımlanmasıdır. Çünkü bir iş merkezi doluyken başka bir işin iş merkezinde başlamaması gerekmektedir.

Kısıt tanımlarından sonraki işlem ise çalışma prosedürünün belirlenmesidir. Bu aşamada hangi strateji ile en iyileme yapılacağı belirlenir. Şekil 3.12.’de verilen prosedürde bütün iş istasyonları toplam boş zamanlarına göre öncelik verilmektedir. “*r[m].rank()*” komutu önceliklendirmeyi sağlamaktadır. Bir sonraki satırda uygulanan “*makespan.scheduleEarly()*” komutu ise verilen öncelikleri de kullanarak proje çizelgeleme yaklaşımıyla en kısa süreyi sağlayacak çizelgeyi oluşturmaktadır.

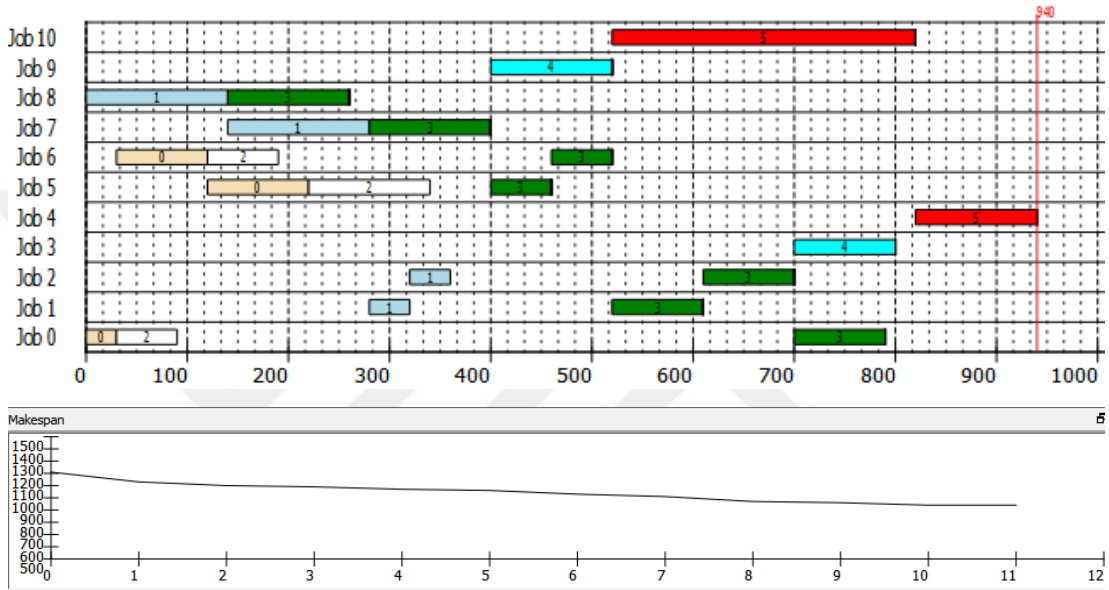
```

} using {
    forall(m in Machines) by (r[m].globalSlack())
        r[m].rank();
    makespan.scheduleEarly();
    cout << "Makespan: " << makespan.start() << endl;
    cout << "time: " << System.getCPUtime() - t0 << endl;
    cout << "fail: " << cp.getNFail() << endl;
}

```

Şekil 3.12. Kısıt karşılama modelinin prosedürü

Bulunan en iyi çizelge Şekil 3.13.'te görülmektedir. Çizelgeye göre üretim 940 saniyede sonlanmaktadır. Çizelgede ürün bileşenleri Tablo 3.33.'teki sıraya uygun olarak; "Job 0" sehpa üst tablası ve "Job 1" sehpa ayak kompleksini temsil edecek biçimde eşleştirilmiştir. Diğer işler sıralamaya uygun olarak diğer ürün bileşenleriyle eşleşmiştir. Gantt diyagramında görülen iş merkezlerinden ebatlama 0, şerit testere 1, kenar bantlama 2, delme 3, ayak montajı 4 ve montaj ise 5 numaralı istasyondur.



Şekil 3.13. Kısıt programlama ile elde edilen en iyi çizelge

3.7. Sonuç

Sürekli ve kesikli olmak üzere iki ana başlık altında incelediğimiz üretim sistemleri üretilen ürün veya hizmetin fiziksel ve karakteristik özelliklerine göre şekillenmektedir. Üretim sistemlerinin süreç bakımından çeşitlilik arz etmesi farklı planlama yaklaşımlarının gelişmesini sağlamıştır. Tam zamanlı üretimden atölye tarzı üretime kadar farklı miktar ve esneklikte üretilen ürünlerin planlama sürecinde tahmin hataları, stok maliyetleri, hazırlık süreleri ve iş istasyonunun boş beklemesi gibi verimsizlikler giderilmeye veya azaltılmaya uğraşılmaktadır.

Üretim sistemlerindeki verimsizliğin kök nedenleri ise taleplerdeki belirsizlik ve dalgalanma, kalitesizlik, fiziksel uzaklıklar ve ulaştırma maliyetleri, teknolojik

nedenlerle işlemlerin verimsiz gerçekleştirilmesi ve çizelgeleme verimsizlikleridir. Klasik üretim planlama yaklaşımları bu problemleri azaltacak yöntemler önermektedir. Fakat klasik planlama yaklaşımları kitlesel üretim ile esnek üretim sistemleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiş yaklaşımlardır. Ayrıca, bu yaklaşımlar miktar veya oran temelli çalıştıkları için kalitesizlik, taleplerdeki belirsizlik ve dalgalanmadan kaynaklanan miktarsal hatalar geliştirilen yöntemlerin de yanlış sonuç üretmesine neden olmaktadır.



BÖLÜM 4. GERÇEK ZAMANLI ÜRETİM MODELİ

Belirsizlik ve dalgalanmaların üretim sistemleri üzerindeki etkisinin azaltılabilmesi için miktar ve oran tabanlı planlama yerine zaman tabanlı planlamaya ihtiyaç vardır. Çünkü belirsizliklerin neden olduğu miktar hataları planlama yöntemlerinin de yanlış sonuçlar üretmesine neden olmakta ve planlama süreci boyunca her aşamada hata miktarı artarak devam etmektedir. Üretim sistemini olumsuz etkileyen bu hataların giderilmesi için planlama sürecinin değişken ve belirsiz olan miktara bağlı olarak değil zamana göre yapılması gerekmektedir.

Zamana bağlı yapılan planlamada talepteki dalgalanmaya planlama ufku içinde karşılık verilmesi hedeflenmektedir. Miktar tabanlı yöntemlerde ise dönem içinde oluşabilecek dalgalanmalara karşı önlemler (emniyet stoğu, uzun termin süresi vb.) dönem başında alındığı için maliyeti yüksek olmaktadır. Ayrıca, planlama sistemin tepki süresi uzun olmaktadır. Literatürdeki gerçek zamanlı planlama çalışmalarının bir bölümü planların anlık verilerle güncellemesini içerse de, bu sistemlerin tepki süresi kısaltmamakta sadece mevcut planlar değiştirilerek yerel çözümler oluşturulmaktadır. Fakat mevcut modeller kullanıldığında israfa neden olan (emniyet stoku, ek operasyon süreleri) unsurlar plana dâhil edilmekte ve mevcut plan sahadaki duruma göre güncellenmektedir.

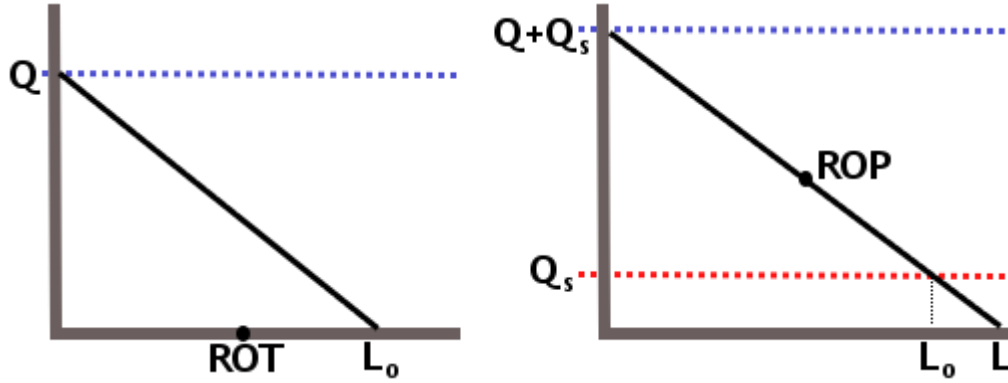
Üretim sistemi gerçek zamanlı bir sistem olarak ele alınırsa, üretim planlamanın temel çalışma parametresinin zaman olması gerekmektedir. Çünkü gerçek zamanlı sistemler belirli bir zaman içerisinde görevini gerçekleştirmek zorunda olan sistemlerdir. Bir üretim sisteminin gerçek zamanlı olması talep yönetiminin, stok yönetiminin ve üretim çizelgelemenin aşılabilir zaman kısıtlarına bağlı yapılması gerekmektedir.

4.1. Gerçek Zamanlı Stok Modeli

Gerçek zamanlı stok yönetiminin yapılabilmesi için, sistemin belirlenen zaman içerisinde tepki vermesi gerekliliğinden, klasik stok modelindeki sipariş verme noktası (ROP) yerine sipariş verme zamanı (ROT) kullanılacaktır (Torkul vd., 2016). Mevcut sistemlerde stoklar belirlenen seviyeye (ROP) indiğinde sipariş oluşturulmakta, taleplerdeki ve tedarik süresindeki değişkenlik ise emniyet stoğu ile yönetilmektedir. Bu durum stok tutma maliyetini artırmaktadır. Emniyet stoğu tutulmayan JIT sistemlerinde de tedarikçi firmaların benzer uygulamaları ana firmalara gizli bir maliyet olarak yansımaktadır.

Gerçek zamanlı stok modelinde talepteki değişkenlikler de göz önünde bulundurularak stoğun tükenme süresi hesaplanacağı için emniyet stoğuna gerek olmayacaktır. Emniyet stoğunun kalktığı durumda maliyetin davranışını analiz edebilmek için üç durum incelenecektir. Bunlardan ilki gerçek zamanlı modelin ve klasik stok modelinin hatasız çalıştığı, talebin istenen çevrim hizmet düzeyinde zamanında karşılandığı, ikincisi talebin eldeki stoktan az olduğu ve elde stok kaldığı, üçüncüsü ise talebin yok satmaya sebep olacak kadar çok olduğu durumlardır. Hem gerçek zamanlı modelin, hem de miktar temelli modelin bu üç durumdaki davranışları stok tutma maliyeti açısından değerlendirilmiş ve gerçek zamanlı modelin avantajları ortaya konmuştur.

İlk durumda dönem içindeki toplam talep ile eldeki stoğun eşit miktarda olduğu değerlendirilmiştir. Klasik modelde stok seviyesi ROP'a eşit olduğunda, gerçek zamanlı modelde ise tedarik süresi ROT'a eşit olduğunda sipariş verilmektedir. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi klasik modelde emniyet stoğu kullanılmış, gerçek zamanlı modelde ise sadece tutulan stok ile talep karşılanmıştır. Talep tam karşılandığı için klasik modeldeki stoğun Q , emniyet stoğunun (Q_s) tamamı tüketilmiştir. Gerçek zamanlı modelde ise, aynı tüketim hızında, stok daha çabuk tükeneceği için erken sipariş açılmıştır. İki stok modelinde de stoklar tükendiği anda yenileri gelmiştir.



Şekil 4.1. Stok modellerinde stok tüketimi

Her iki modelde stokların miktarları farklı ve tükenme hızları aynı olduğu için stokların tükenme süreleri farklıdır. Bu durumda, iki modelin karşılaştırabilmesi için ortalama stok tutma maliyeti (toplam stok tutma maliyeti / çevrim süresi) kullanılacaktır. Gerçek zamanlı modelin stok tutma maliyeti ilk grafiğin altındaki alan ile deponun birim değişken maliyeti (C_V) çarpımının deponun birim sabit maliyeti (C_C) ile dönem uzunluğunun (L_0) çarpımının toplamına eşittir. Başlangıçta depodaki stok miktarı Q , stoğun tükenme süresi L_0 'dur. Buna göre gerçek zamanlı modeldeki toplam stok tutma maliyeti (C_T) ortalama stok tutma maliyeti (C_A) Denklem 4.1.'de verildiği gibi olacaktır.

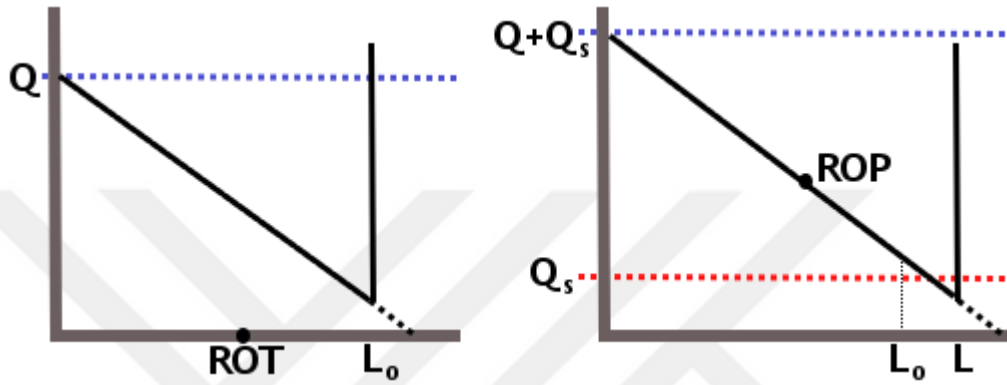
$$C_T = L_0 C_C + \frac{Q C_V L_0}{2} \Rightarrow C_A = \frac{C_T}{L_0} = C_C + \frac{Q C_V}{2} \quad (4.1)$$

Klasik stok modelinde başlangıçtaki stok miktarı emniyet stoğundan dolayı $Q+Q_s$ 'dir. L_0 boyunca Q miktardaki stok tükenmiş, sipariş gelene kadar geçen sürede $(L-L_0)$ emniyet stoğu kullanılmıştır. Bu modelde C_T ve C_A Denklem 4.2.'deki gibi olacaktır.

$$C_T = L C_C + \frac{(Q+Q_s) C_V L}{2} \Rightarrow C_A = C_C + \frac{(Q+Q_s) C_V}{2} \quad (4.2)$$

İki stok modelinin birim süredeki stok tutma maliyetleri karşılaştırıldığında $Q < (Q+Q_s)$ için gerçek zamanlı modelde stok tutma maliyeti ve çevrim süresi daha düşük olacaktır. Bu durum stoğun tükenme hızı olan $\frac{Q}{L_0}$ tam olarak hesaplandığında geçerli

olacaktır. Eğer gerçek tükenme hızı hesaplanandan daha küçük olursa Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi stoklar tükenmeden verilen siparişler gelir. Bu durumda stok tutma maliyetinin hesaplanabilmesi için grafiğin altında kalan yamukların alanlarının hesaplanması gerekmektedir. Alan hesaplanırken stoğun tükenme hızı (E) kullanılarak gerçek zamanlı model için siparişin gelme anı olan L_0 , klasik model için de siparişin gelme anı olan L anındaki stok miktarı (Q_0) hesaplanmalıdır.



Şekil 4.2. Tüketim hızının düşük olması

Gerçek zamanlı modelde tükenme anı $\frac{Q}{E}$, klasik modelde ise $\frac{Q+Q_s}{E}$ olur. Buna göre Gerçek zamanlı modelde L_0 anında eldeki stok miktarı (Q_{01}), C_T ve C_A Denklem 4.3.'te verildiği gibidir.

$$Q_{01} = E \left(\frac{Q}{E} - L_0 \right), C_T = L_0 C_C + \frac{(Q+Q_{01})C_V L_0}{2} \Rightarrow C_A = C_C + \frac{(Q+Q_{01})C_V}{2} \quad (4.3)$$

Klasik modelde ise L anında eldeki stok miktarı (Q_{02}), C_T ve C_A hesaplanırken, emniyet stoğu ve eldeki stok miktarı birlikte kullanılacaktır. Elde edilen bağıntılar Denklem 4.4.'te verildiği gibi olacaktır.

$$Q_{02} = E \left(\frac{Q+Q_s}{E} - L \right), C_T = L C_C + \frac{(Q+Q_s+Q_{02})C_V L}{2} \Rightarrow C_A = C_C + \frac{(Q+Q_s+Q_{02})C_V}{2} \quad (4.4)$$

Her iki model için C_A değerleri karşılaştırılırken, Denklem 4.3. ve Denklem 4.4.'te verilen bağıntılarda C_C , C_V ve Q parametreleri aynı olduğu için, Q_{01} ve $Q_s + Q_{02}$ bağıntılarının karşılaştırılması, iki modelin karşılaştırılması için yeterlidir. Bu iki

bağıntının karşılaştırılabilmesi için Denklem 4.3.'te ve Denklem 4.4.'te verilen Q_{O_1} ve Q_{O_2} parametreleri açılarak karşılaştırıldığında Denklem 4.5.'teki durum elde edilecektir.

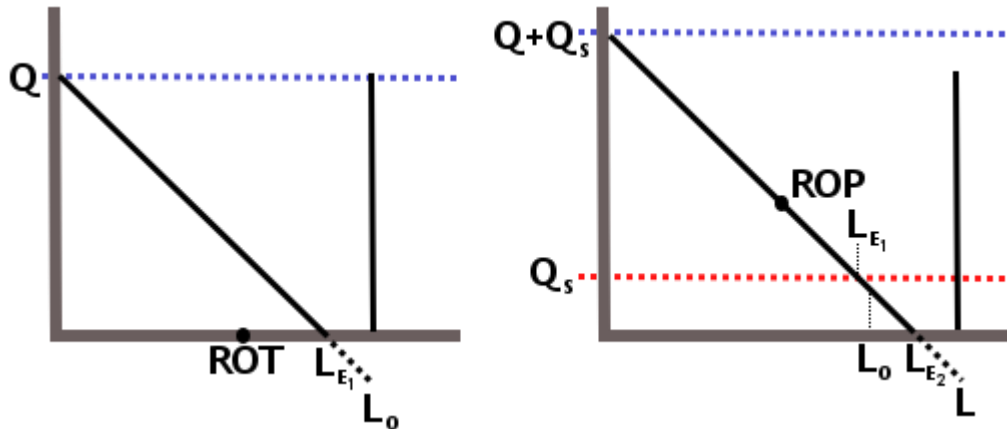
$$Q_{O_1} < Q_S + Q_{O_2} \Rightarrow Q - EL_0 < Q + 2Q_S - EL \Rightarrow EL_0 > -2Q_S + EL \quad (4.5)$$

EL , L süresi boyunca tüketilen stok miktarıdır. Bu miktar $EL = EL_0 + E(L - L_0)$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda Denklem 4.6.'da verilen EL_0 ile Q_S arasındaki bağıntının incelenmesi gerekmektedir.

$$EL_0 > -2Q_S + EL_0 + E(L - L_0) \Rightarrow 2Q_S > E(L - L_0) \quad (4.6)$$

$L - L_0$ 'ın ortalama tüketim hızı ile çarpımı emniyet stoğunu vermektedir. Fakat gerçek tüketim hızı ortalama tüketim hızından düşük olduğu için $Q_S > \frac{E(L - L_0)}{2}$ ifadesi doğrudur. Buna göre gerçek zamanlı stok modeli daha iyi sonuç vermektedir.

Gerçek tüketim hızının hesaplanan değerden büyük olduğunda Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi yok satma durumu oluşacaktır. İki modelde yok satılan stok miktarının (Q_R) karşılaştırılabilmesi için öncelikle tüketim hızının hesaplanması gerekmektedir. E parametresi stoğun bitiş anına (L_E) göre hesaplanmalıdır.



Şekil 4.3. Gerçek tüketim hızının hesaplanandan yüksek olması

Gerçek zamanlı modelde yok satılan stok miktarı (Q_{R_1}) Denklem 4.7.'de verilmiştir. Yok satma miktarı ortalama tüketim hızı ile stoğun tükenme anından (L_{E_1}) L_O 'a kadar geçen sürenin çarpımına eşit olacaktır.

$$Q_{R_1} = \frac{Q}{L_{E_1}}(L_O - L_{E_1}) \Rightarrow Q_{R_1} = \frac{QL_O}{L_{E_1}} - Q \quad (4.7)$$

Klasik modeldeki yok satılan stok miktarı (Q_{R_2}) ise Denklem 4.8.'de verilmiştir. Modeldeki stok tükenme anı gerçek zamanlı modeldeki ile eşit olmayacağından klasik modelde stoğun tükenme anı L_{E_2} olarak ifade edilmiştir.

$$Q_{R_2} = \frac{Q+Q_S}{L_{E_2}}(L - L_{E_2}) \Rightarrow Q_{R_2} = \frac{(Q+Q_S)L}{L_{E_2}} - (Q + Q_S) \quad (4.8)$$

İki modelin performanslarının karşılaştırılabilmesi için her iki modeldeki toplam yok satma miktarı kullanılacaktır. Her iki modelde meydana gelen yok satma miktarları Denklem 4.9.'da verilen eşitsizlikte karşılaştırılmıştır.

$$\frac{QL_O}{L_{E_1}} - Q \stackrel{?}{<} \frac{(Q+Q_S)L}{L_{E_2}} - (Q + Q_S) \Rightarrow \frac{QL_O}{L_{E_1}} + Q_S \stackrel{?}{<} \frac{(Q+Q_S)L}{L_{E_2}} \quad (4.9)$$

Denklem 4.10.'da verildiği gibi, stok miktarının tüketim anına (tükenme süresine) oranı tüketim hızını (E) belirleyecektir. Her iki model aynı şartlarda çalıştığı için tüketim hızı her iki modelde de aynı olacaktır. Bundan dolayı iki modelde aynı sürede aynı miktarda stok tüketilecektir. Gerçek zamanlı modelde stok tükendiği anda, klasik modelde emniyet stoğu kullanılmaya başlanacaktır. Emniyet stoğu miktarı ise tüketim hızıyla iki modeldeki stok tükenme sürelerinin arasındaki farkın çarpımı kadar olacaktır.

$$E = \frac{Q}{L_{E_1}} = \frac{Q+Q_S}{L_{E_2}}, Q_S = E(L_{E_2} - L_{E_1}) \Rightarrow Q_S = \frac{(L_{E_2} - L_{E_1})Q}{L_{E_1}} \quad (4.10)$$

Tüketim hızları eşit olduğu için Denklem 4.10.'da verilen bağıntılar Denklem 4.9.'da verilen eşitsizliğe uygulandığında Denklem 4.11.'deki eşitsizlik elde edilmektedir. Bu

eşitsizlikte klasik modelde siparişin geliş anına kadar oluşan toplam tüketimin gerçek zamanlı modelde sipariş gelişine kadar oluşan tüketimden farkının emniyet stoğundan büyük olup olmadığı sorgulanmaktadır. Eğer emniyet stoğu iki modelde tutulan toplam stoktan fazla ise gerçek zamanlı model daha avantajlı olacaktır.

$$EL_o + Q_s \leq EL \Rightarrow Q_s \leq E(L - L_o) \quad (4.11)$$

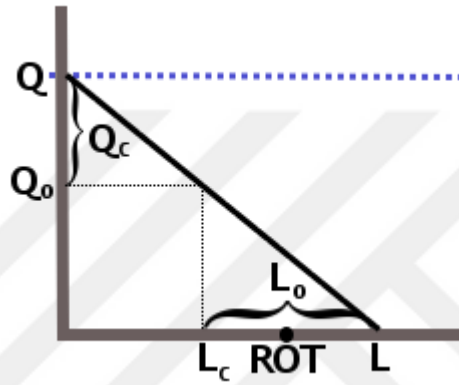
Elde edilen eşitsizlikte $L-L_o$ ortalama tüketim hızından daha büyük bir değerle çarpılmıştır. Eğer ortalama tüketim hızıyla çarpılmış olsaydı sonuç Q_s 'ye eşit olacaktı. Fakat daha büyük bir değerle çarpıldığı için $Q_s < E(L - L_o)$ olduğu kesinleşmiştir. Bu durumda gerçek zamanlı stok modeli daha avantajlıdır.

4.1.1. Yeniden sipariş zamanının hesaplanması

Gerçek zamanlı stok modelinin çalışma prensibi tüketim hızı ve taleplerdeki sapmaya bakılarak stoğun tükenme süresinin tahmin edilmesine dayanır. Gerçek zamanlı bir sistemin mutlaka sahip olması gereken zaman hedefi bu modelde ROT ile sağlanır. ROT siparişin verileceği anı belirlemektedir. Bu anda stoğun tükenme süresi tedarik ön süresine eşit olmaktadır. Sipariş verme anının yakalanabilmesi ve doğru zamanda sipariş verilmesi için gerçek zamanlı modelin her stok hareketinde çalıştırılması gerekmektedir. Her harekette dönem içi taleplerin sapması güncellenip ROT tekrar hesaplanmalıdır. ROT'un sürekli güncellenmesi siparişin tükenme anının belirlenmesini sağlasa da, o anın yakalanmasını sağlamayabilir. Bunun için bir sayaç zamanı sürekli olarak hesaplanan ROT değerine eşitleyip geriye doğru saymaya devam etmelidir. Sayaçtaki süre tedarik ön süresine eşitlendiğinde sipariş verilmelidir.

Gerçek zamanlı stok modelinde sipariş verme anının sürekli güncellenmesi klasik stok modelindeki emniyet stoğunun gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır. Çünkü değişkenliklere anında tepki verilmekte ve doğru zamanda sipariş verilmektedir. Klasik modelde ise değişkenlikten kaynaklanan sapma sipariş verme anına etki etmemekte, siparişler hep belirli bir stok seviyesinde verildiğinden değişkenliği karşılamak için sürekli fazladan stok tutulmaktadır. Sipariş verme anının

güncellenmesi emniyet stoğunun işlevini yerine getireceği için, sipariş verme anının emniyet stoğu hesabına benzer biçimde yapılması gerekmektedir. ROT hesaplanırken Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi stok hareketinin olduğu anda tüketilen stok (Q_c), kalan stok (Q_o), siparişin verildiği an (L_c) kullanılacaktır. Bu parametrelerle birlikte mevcut stok çevrimi içindeki taleplerdeki sapma (σ_c), dönem başına ortalama talep (D) ve tüm taleplerin sapması (σ) kullanılarak stoğun tükenmesine kalan süre (L_o) hesaplanacaktır.



Şekil 4.4. Yeniden sipariş noktası

Stoğun tükenmesine kalan süre hesaplanırken dönem içindeki değişkenliğin dönem sonuna kadar devam edeceği kabul edilmektedir. Mevcut hesaplamalar tüm talebin normal dağılıma uyduğu kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Stoğun tükenmesine kalan sürenin hesaplanabilmesi için Denklem 4.12.'de verilen bağıntı kullanılmıştır. Bağıntıda L_o ve mevcut andan (L_c) dönem sonuna kadar oluşacak talebin sapması (σ_o) bilinmemektedir. Bu iki bilinmeyenden L_o 'ın değeri kullanılarak ROT hesaplanacaktır.

$$\frac{Q_c - DL_c}{\sigma_c} = \frac{Q_o - DL_o}{\sigma_o} \quad (4.12)$$

Verilen bağıntıda DL_c ve DL_o , L_c ve L_o süreleri boyunca tüketilmesi gereken toplam stoğu ifade etmektedir. Çevrim içinde en son stok hareketinin olduğu L_c anı ile tahmin edilecek L_o süresince oluşacak talep aynı ana kitlenin örneklemeleri olduğu ve kalan stok mevcut dönemdeki talep karakteristiği ile tüketileceği ön görüldüğü için bu iki

süre içinde gerçekleşen taleplerin standart normal değerler eşit olmalıdır. Kalan stoğa olacak taleplerin sapması $\sigma_o = \sigma\sqrt{L_o}$ olarak kabul edilebildiği için σ_o eşitlikten kaldırılacak ve eşitliğe mevcut ürüne olan tüm taleplerin sapması eklenecektir. Bu sayede eşitlikteki tek bilinmeyen, Denklem 4.13.'te verildiği gibi, L_o olacaktır.

$$Q_c\sigma_o - DL_c\sigma_o + DL_o\sigma_c = Q_o\sigma_c \Rightarrow DL_o\sigma_c + \sigma\sqrt{L_o}(Q_c - DL_c) = Q_o\sigma_c \quad (4.13)$$

Elde edilen denklemde $\sqrt{L_o} = x$ olarak düşünüldüğünde denklem $ax^2+bx+c=0$ formunda 2. Dereceden bir denklem olarak çözülmüş ve kökleri Denklem 4.14.'te verildiği gibi bulunmuştur.

$$L_o = \frac{2DQ_o\sigma_c^2 + (\sigma(Q_c - DL_c))^2 \pm \sqrt{(\sigma(Q_c - DL_c))^2 (4DQ_o\sigma_c^2 + (\sigma(Q_c - DL_c))^2)}}{2(D\sigma_c)^2} \quad (4.14)$$

Bulunan L_o değerlerinden pozitif ve en küçük olanı stoğun tükeneceği ilk anı gösterdiği için bu değerden tedarik ön süresi çıkarılarak siparişin verilmesine kalan süre bulunur. Siparişin verildiği an ROT'tur. Hesaplanan ROT değişken talep ve sabit tedarik süresi içindir. Tedarik süresinin (L) de değişken olduğu durumda L_o değerinin hesaplanması için denklemde $\sigma\sqrt{L_o}$ yerine tedarik süresinin standart sapmasını (S_c) içeren $\sqrt{L\sigma^2 + D^2S_c^2}$ ifadesi yazılır. Çözüm, Denklem 4.15.'teki hale gelir.

$$L_o = \frac{Q_o\sigma_c - \sqrt{L\sigma^2 + D^2S_c^2}(Q_c - DL_c)}{D\sigma_c} \quad (4.15)$$

ROT hesaplanırken karşılaşılabilecek en önemli sorun dönem içinde oluşan çevrim hizmet düzeyinin, moeldeki kabule aykırı olarak, kalan stoklar tükenene kadar birebir aynı devam etmemesidir. Bu hatanın en aza indirilmesi için sipariş verildikten sonra oluşacak sapmanın ve ortalama talebin değeri bilişim paylaşımı yoluyla elde edilmelidir.

4.1.2. Bilişim paylaşımının etkisi

Bilişim paylaşımı tedarik zincirinde stok miktarını ve maliyeti azaltan bir yaklaşımdır (Lee, et al., 2000). Gerçek zamanlı modelde bilişim paylaşımı kullanmak L_o süresi boyunca oluşacak ortalama ve sapmaların ana kitle dağılımından tahmin edilmesiyle oluşan hataların önüne geçilmesini sağlayacaktır. Bilişim paylaşımı kullanıldığında, L_o boyunca oluşacak sapma (σ_o) ve ortalama (D_o) değerleri tedarik zincirindeki düğümlerden elde edilecek talep verileriyle hesaplanacaktır. Müşterilerden (bayilerden) gelecek siparişlerden L_o süresi içerisinde gerçekleşecek olanları da sapma ve ortalamaya dâhil edilerek sabit bir L_o elde edilene kadar sürekli L_o hesaplanmalıdır. Çünkü L_o değeri değiştiğinde, hesaplamalara dâhil edilmeyen başka müşteri taleplerini hesaba dâhil etmek ya da bazı talepleri hesaptan çıkarmak gerekebilir. Bu sayede sadece L_o süresince oluşacak taleplerin ortalama ve sapmaları tespit edilmiş olur.

L_o süresi hesaplanırken çevrim içindeki son talebin bu değeri artırması ve çevrime eklenen yeni taleplerin L_o değerini azaltması hesaplama algoritmasının sonsuz döngüye girmesine sebep olabilir. L_o değerinin düşmesi, düşüşün başladığı ilk andan itibaren yok satmanın başlayacağını gösterir. Böyle bir durumda, bu duruma sebep olan talebin geleceği tarihe uygun bir ROT belirlenmelidir. Tedarik süresi sabit ise talebin tarihinden tedarik süresi çıkarılarak ROT elde edilir. Tedarik süresi değişkense Denklem 4.16.'da verilen bağıntı kullanılarak tedarik süresi (L) hesaplanır. Bağıntıdaki L_s değeri sistemin çevrim hizmet düzeyini sağlayacak tedarik süresidir.

$$\frac{Q_C - DL_C}{\sigma_C} = \frac{L_S - L}{S_C} \Rightarrow L_S = \frac{S_C(Q_C - DL_C)}{\sigma_C} + L \quad (4.16)$$

L_o ise çevrim içinde alınacak taleplerin sapması (σ_I) ve ortalamasına (D_I) göre Denklem 4.17.'de verildiği şekilde hesaplanacaktır.

$$\frac{Q_C - DL_C}{\sigma_C} = \frac{Q_O - D_I L_O}{\sigma_I} \Rightarrow D_I L_O \sigma_C + \sigma_I (Q_C - DL_C) Q_O \sigma_C \Rightarrow L_O = \frac{Q_O \sigma_C - \sigma_I (Q_C - DL_C)}{D_I \sigma_C} \quad (4.17)$$

Tedarik süresi değişken olduğu durumlarda σ_I yerine $\sqrt{L\sigma^2 + D^2S_C^2}$ yazılarak L_o hesaplanabilir. Bu durumda L_o 'ın değeri Denklem 4.18.'de verildiği gibi hesaplanmalıdır.

$$L_o = \frac{Q_o\sigma_C - \sqrt{\sigma_I^2 + D_I^2 S_C^2}(Q_C - DL_C)}{D_I\sigma_C} \quad (4.18)$$

Bilişim paylaşımının katkısını anlamak için, bilişim paylaşımı olmadığına kullanılan ortalama ve sapma değerlerindeki hatanın L üzerindeki etkisinin incelenecektir. Bunun için bilişim paylaşımı olmadığına kullanılacak talep ortalaması ile dönem sonuna kadar gerçekleşen talebin ortalamaları arasındaki fark (ΔD) ve sapmalar arasındaki fark ($\Delta\sigma$) hesaplanmalıdır. Talep verilerinden gerçekleşen verilere ulaşmak için gerçek talebin ortalaması (D_I) ve gerçek sapma (σ_I) olarak Denklem 4.19.'da ifade edilmiştir.

$$D_I = D + \Delta D, \quad \sigma_I = \sigma + \Delta\sigma \quad (4.19)$$

Gerçek ortalama ve sapma değerleri kullanıldığında gerçek çevrim hizmet düzeyi (SL) ile hesaplama yapılacağı için, dönem verileri kullanıldığında oluşacak hatanın L_o 'ya etkisini araştırmak amacıyla Denklem 4.20.'de verilen bağıntı kurulmuştur.

$$SL = \frac{Q_o - D_I L_o}{\sigma_I} \Rightarrow D_I L_o = Q_o - SL\sigma_I \Rightarrow \Delta D L_o + \Delta\sigma SL = Q_o - D L_o - \sigma SL \quad (4.20)$$

Yukarıdaki eşitlikte, $D L_o = Q_o - \sigma SL$ olduğu için, $Q_o - D L_o - \sigma SL$ ifadesi 0'a eşittir. Bu durum göz önüne alındığında bağıntı " $\Delta D L_o = -\Delta\sigma SL$ " halini alır. Elde edilen eşitlikte sapmadaki hata ile ortalamadaki hata arasında negatif bir bağıntı vardır. Buna göre gerçek talep ortalaması ile dönem ortalaması arasındaki fark ile gerçek sapma değeri ile dönemin sapma değeri arasındaki fark aynı anda 0'dan büyük veya küçük olduğunda L_o negatif olur. Stoğun tükenme süresinin negatif olması yok satma anlamına gelir ve gerçek durumdan bağımsız olarak bu hata ile karşılaşılır. Denklem 4.20.'de verilen eşitlikten elde edilen sonuca göre gerçek zamanlı stok modelinin en

büyük sorunu gerçekleşecek talebin ortalamasının ve sapmasının yanlış tahmin edilmesinden kaynaklanan yok satmalar olacaktır.

4.1.3. Gerçek zamanlı ekonomik sipariş miktarı (REOQ)

Gerçek zamanlı stok modelinde stoğun tükenme süresi tedarik süresine eşit olduğunda sipariş verilmektedir. Bu sayede, talepteki değişkenliğin emniyet stoğu yerine sipariş noktasının değiştirilmesiyle dengelenmesi hedeflenmiştir. Emniyet stoğunu kaldırmanın stok tutma maliyetini azaltmada olumlu etkisi olsa da toplam maliyeti en aza indirmek için gerekli olan sipariş miktarının hesaplanmasına ihtiyaç vardır.

Mevcut miktar belirleme politikaları zaman temelli olmadığı için gerçek zamanlı değildirler. Miktar temel alınarak yapılan en iyileme taleplerdeki belirsizlikten olumsuz etkilenecektir. Çünkü talepteki sapma belirli bir miktara ulaştığında dual kısıtları olurlu aralıktan çıkarabilir. Bu da en iyi çözümün değişmesine sebep olur. Fakat zaman temelli yapılacak bir en iyileme ile stok miktarı değil, stok tutulacak dönemin uzunluğu hesaplanacaktır. Tutulacak stok miktarı hesaplanan dönemler için yapılacak talep tahmini ile belirlenebilir. Bu sayede sapma doğrudan tahmin hatasına eşit olacaktır. Klasik modelde ise hatalı talep tahmininden elde edilen hatalı stok miktarı kullanılacağı için entropinin daha yüksek olacağı kesindir.

Stok tutulması gereken dönemin süresi ekonomik sipariş miktarına benzer biçimde toplam maliyeti en aza indirecek şekilde hesaplanabilir. Bunun için öncelikle stok tutma maliyeti hesaplanmalıdır. Stok tutma maliyeti (C_h) L_c dönemi içinde Q miktarınca tutulan stoğun maliyetidir. C_h , deponun sabit (C_f) ve değişken (C_v) maliyetleri göz önünde bulundurularak Denklem 4.21.'deki bağıntıda verildiği biçimde hesaplanmaktadır.

$$C_h = C_f + C_v L_c \quad (4.21)$$

L_c döneminin uzunluğu gerçek zamanlı stok modelinde stoğun tükenmesi için kalan sürenin hesaplanması ile bulunabilir. Buna göre başlangıçta geçen süre (L_o) ve

tüketilen stok miktarı (Q_0) 0 olacaktır. Denklemden bu değerler yerine konduğunda Denklem 4.22.'de verilen bağıntı elde edilmektedir.

$$L_c = \left(\frac{-\sigma(Q_0 - DL_0) \pm \sqrt{(\sigma(Q_0 - DL_0))^2 + 4DQ_c\sigma_0^2}}{2D\sigma_0} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{4DQ_c\sigma_0^2}}{2D\sigma_0} \right)^2 = \left(\sqrt{\frac{Q_c}{D}} \right)^2 = \frac{Q_c}{D} \quad (4.22)$$

İfadedeki Q_c mevcut stok miktarı ve D ise ortalama taleptir. Bu ifade 4.21. numaralı denklemden yerine yazıldığında Denklem 4.23.'te verilen bağıntı elde edilecektir.

$$C_h = C_f + C_v \frac{Q_c}{D} \quad (4.23)$$

Mevcut denklemden stok miktarı Q 'dan 0'a düşene kadar oluşacak stok tutma maliyeti Denklem 4.23.'te verilen bağıntının 0'dan Q 'ya kadar integralinin alınmasıyla hesaplanacaktır. Toplam maliyeti elde etmeye yarayacak olan bağıntı Denklem 4.24'te verilmiştir.

$$\int_0^Q C_f + C_v \frac{Q_c}{D} \frac{d}{dQ_c} = QC_f + \frac{C_v Q^2}{2D} + c \quad (4.24)$$

Toplam maliyette stok tutma maliyeti ile birlikte satın alınan stoğun toplam tutarı (C_p) ve sipariş maliyeti yer almaktadır. Stoğun tutarının miktar belirlemede bir etkisi yoktur. Toplam sipariş maliyeti ise sipariş sayısı ile sipariş maliyetinin (C_o) çarpımına eşittir. Sipariş sayısı iyileştirme yapılacak dönem uzunluğunun (L_t), sipariş dönemi (L_c) uzunluğuna bölünmesiyle bulunabilir. Buna göre toplam maliyet (C_t) Denklem 4.25.'te verildiği gibi olacaktır.

$$C_t = \frac{L_t C_o}{L_c} + QC_f + \frac{C_v Q^2}{2D} + C_p \quad (4.25)$$

Denklem 4.25.'te verilen denklemden Q yerine, Denklem 4.22.'de elde edilen sonuca göre, $L_c D$ yazılırsa Denklem 2.26.'da verilen bağıntı elde edilecektir.

$$C_t = \frac{L_t C_o}{L_c} + L_c D C_f + \frac{C_v L_c^2 D}{2} + C_p \quad (4.26)$$

Elde edilen bağıntı üzerinden en uygun stok tutma süresi hesaplanmak istenirse L_c 'ye göre türev alınması gerekmektedir. Türevin sonucunda ise Denklem 4.27.'de verilen bağıntı elde edilir.

$$C_t dL_c = \left(\frac{L_t C_o}{L_c} + L_c D C_f + \frac{C_v L_c^2 D}{2} + C_p \right) dL_c \Rightarrow -\frac{L_t C_o}{L_c^2} + D C_f + C_v L_c D = 0 \Rightarrow$$

$$L_c^3 C_v D + L_c^2 C_f D - L_t C_o = 0 \quad (4.27)$$

Elde edilen denklem ax^3+bx^2+cx+d biçiminde bir polinomdur. Bu polinomun köklerinden pozitif en küçük olanı en uygun stok tutma süresini verecektir. Polinomun köklerinin bulunması için Denklem 4.28.'de verilen bağıntılar hesaplanmalıdır. Bağıntılar polinomdaki x değişkenin katsayıları kullanılarak hesaplanacağından L_c değişkenin katsayıları bağıntılara eklenmiştir.

$$r_1 = \frac{\frac{3c}{a} - \frac{b^2}{a^2}}{3} = \frac{-C_f D^2}{3C_v D^2}, r_2 = \frac{\frac{2b^3}{a^3} - \frac{9bc}{a^2} + \frac{27d}{a}}{27} = \frac{2C_f D^3 - 27L_t C_o}{27(C_v D^3 + C_v D)}, r_3 = \frac{r_2^2}{4} + \frac{r_1^3}{27} \quad (4.28)$$

Denklem 4.28.'de verilen bağıntılardan r_3 değişkeninin değeri denklemin köklerinin durumunun anlaşılmasını sağlamaktadır. Köklerin durumuna göre hesaplamalar farklı biçimlerde yapılmaktadır. Eğer r_3 değişkeninin değeri sıfırdan büyükse sadece bir gerçek kökü vardır. Eğer r_3 sıfıra eşitse denklemin üç kökü de gerçek sayıdır ve eşittir. Eğer r_3 sıfırdan küçükse denklemin üç tane kökü vardır. Eğer denklemin sadece bir gerçek kökü varsa Denklem 4.29.'da verilen bağıntılar hesaplanır.

$$r_4 = \sqrt{r_3} - \frac{r_2}{2}, r_5 = \sqrt[3]{r_4}, r_6 = -\sqrt{r_3} - \frac{r_2}{2}, r_7 = \sqrt[3]{r_6} \quad (4.29)$$

Denklem 4.29.'da verilen bağıntıların değerlerin kullanılarak, Denklem 4.30.'da verildiği gibi, köklerin değerleri hesaplanmaktadır.

$$L_c = x_1 = r_5, +r_7 - \frac{b}{3a}, \quad x_2 = -r_5, -r_7 - \frac{b}{3a} + \frac{(r_5, -r_7)i\sqrt{3}}{2}, \quad x_3 = -r_5, -r_7 - \frac{b}{3a} - \frac{(r_5, -r_7)i\sqrt{3}}{2} \quad (4.30)$$

Eğer denklemin üç kökü eşitse denklemin kökleri iki farklı biçimde hesaplanabilir. Bunlardan biri Denklem 4.31.'de verildiği gibidir. Fakat gerçek zamanlı stok miktarı için verilen tüm değişkenler pozitif olacağı için kökler negatif olarak hesaplanacaktır.

$$L_c = x_1 = x_2 = x_3 = -\sqrt[3]{\left(\frac{d}{a}\right)} = -\sqrt[3]{\left(\frac{L_t C_o}{C_v D}\right)} \quad (4.31)$$

Denklemin kökleri eşit olduğunda Denklem 4.32.'de verilen bağıntıyla eşitliği sağlayacak başka kökler hesaplanabilir.

$$L_c = \sqrt[3]{-\frac{C_f^3}{27C_v^3} + \frac{L_t C_o}{2C_v D} + \sqrt{\left(-\frac{C_f^3}{27C_v^3} + \frac{L_t C_o}{2C_v D}\right)^2 - \left(\frac{C_f^2}{9C_v^2}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{C_f^3}{27C_v^3} + \frac{L_t C_o}{2C_v D} - \sqrt{\left(-\frac{C_f^3}{27C_v^3} + \frac{L_t C_o}{2C_v D}\right)^2 - \left(\frac{C_f^2}{9C_v^2}\right)^3} - \frac{C_f}{3C_v}} \quad (4.32)$$

Eğer denklemin üç ayrı kökü varsa, önce Denklem 4.33.'te verilen bağıntıların değerleri hesaplanmalıdır.

$$r_4 = \sqrt{\frac{r_2^2}{2}} - r_3, \quad r_5 = \sqrt[3]{r_4}, \quad r_6 = \arccos\left(-\frac{r_2}{2r_4}\right), \quad r_7 = \cos\left(\frac{r_6}{3}\right), \quad r_8 = \sqrt{3}\sin\left(\frac{r_6}{3}\right), \quad r_9 = \frac{-b}{3a} = \frac{-C_f D}{3C_v D} \quad (4.33)$$

Denklem 4.33.'te verilen bağıntılar kullanılarak denklemin kökleri Denklem 4.34.'te verildiği gibi hesaplanmaktadır. Polinomun üç kökü olduğunda kökler arasından pozitif en küçük olanı optimal stok tutma süresi olarak seçilir.

$$x_1 = -2r_5^2 + r_{10}, \quad x_2 = -r_5(r_7 + r_8) + r_9, \quad x_3 = -r_5(r_7 - r_8) + r_9 \quad (4.34)$$

Literatürdeki çalışmalarda genellikle ekonomik sipariş modelinde olduğu gibi stok tutma maliyeti sadece değişken olarak ele alınmamaktadır. Bu durumda, C_f 0 kabul edilirse, optimal stok tutma süresi Denklem 4.35.'te verildiği gibi hesaplanır.

$$L_c = \sqrt[3]{\frac{C_o L_t}{C_v D}} \quad (4.35)$$

Gerçek zamanlı stok modelinde siparişin verileceği an belirlendikten sonra, en iyi sipariş miktarı belirlenirken gerçek zamanlı ekonomik sipariş miktarı kullanılmalıdır. Bu yöntem zaman temelli olduğu için talepteki değişkenlikten bağımsız bir sonuç üretmektedir. Bu sayede, hiç emniyet stoğu tutmadan optimal dönem uzunluğundaki talebi karşılayacak miktarda sipariş verilmesi sağlanır. Bu süre içindeki talep ise talep tahmini veya dönem uzunluğu ile ortalama talebin çarpımıyla belirlenebilir. Talep normal dağılıma uyacağı ve ROT normal dağılıma göre hesaplanacağı için gerçek zamanlı ekonomik sipariş miktarı model ile uyumlu çalışacaktır.

4.1.4. Uygulama ve sistem testi

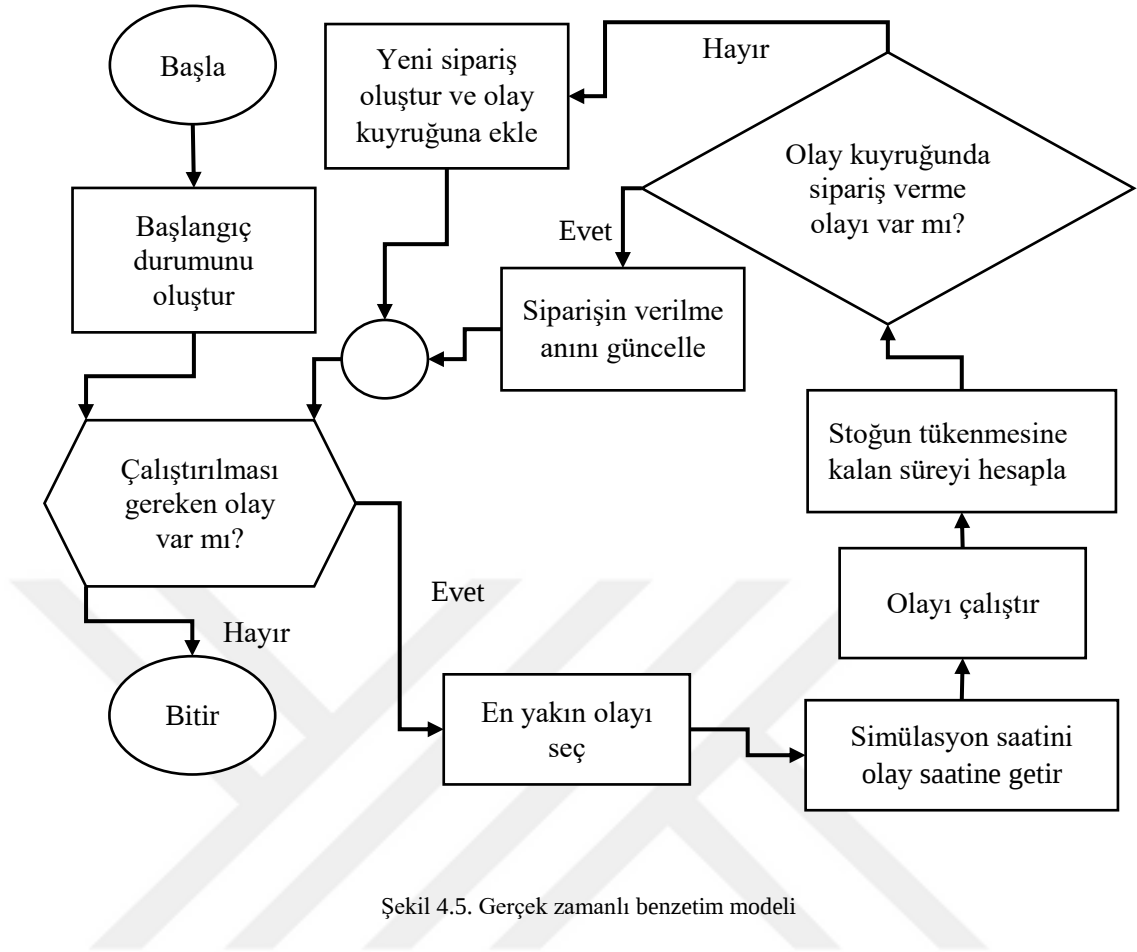
ROT modelinin ve REOQ yönteminin farklı talep ve maliyet unsurları altında verdiği tepkinin ve üretim sektöründen hizmet sektörüne kadar geniş bir aralıkta performansının anlaşılabilmesi için bir benzetim çalışması yapılmıştır. Bu amaçla tek ürün için bir perakendeci benzetimi geliştirilmiştir. Stok yönetimi ele alınacağı için üretim düşünülmemiş sadece tek ürün alınıp satılmıştır. Simülasyon modelinin mevcut sektörleri kapsayabilmesi için ihtiyaç duyulan parametreler ve bu parametrelerin değer aralıkları literatürden incelenmiştir. İnceleme sonucunda birim üretim maliyeti, birim stok tutma maliyeti, birim taşıma maliyeti, birim üretim süresi, talep, sabit maliyetler, tekrar üretim maliyeti, geri dönen parça sayısı, planlama ufku ve ürün çeşitliliği gibi parametrelerin ele alındığı görülmüştür. (Carvalho & Nascimento, 2016; Cunha & Melo, 2016; Sifaleras, et al., 2015) Ele alınan parametreler içerisinde her siparişteki ortalama ürün miktarı ve sapması, ortalama tedarik süresi, siparişler arası ortalama

süre, sipariş maliyeti, deponun sabit ve değişken maliyetlerinin parametre olarak kullanıldığı bir kıyaslama çalışması yapılmıştır. Kullanılan parametrelerin değer aralıkları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Benzetim çalışması parametrelerinin aralıkları

PARAMETRE	ARALIK	ARTIŞ
HER SİPARİŞ İÇİN ORTALAMA TALEP MİKTARI (ADET)	2-5	1
TALEBİN STANDART SAPMASI	0,5-2	0,1
ORTALAMA TEDARİK SÜRESİ (GÜN)	1; 2; 3; 4; 5; 7; 9; 11; 13; 15; 18; 21; 24; 27; 30; 35; 40; 45; 55; 75	-
ORTALAMA SİPARİŞLER ARASI SÜRE (DAKİKA)	2-5	0.5
SİPARİŞ MALİYETİ	100,00-1.000,00	100,00
DEPONUN SABİT MALİYETİ (YILLIK)	30.000,00-150.000,00	30.000,00
STOK TUTMA (DEĞİŞKEN) MALİYETİ	0,50-2,00	0,50

Mevcut kıyaslama çalışmalarına karşın bu benzetim modelinin geliştirilmesinin sebebi, modelin gerçek zamanlı ortamda çalışması zorunluluğudur. Bu durum benzetim içindeki taleplerin, diğer kıyaslama çalışmalarında olduğu gibi haftalık değil sipariş anında işlenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Gerçek zamanlı çalışan bu model, performans açısından da olay artırımı olarak tasarlanmıştır. Modelin gerçek zamanlı olmasını sağlamak için, stoğun tükenmesine kalan süre her olayda hesaplanarak sipariş verme anı güncellenmektedir. Çalışma akışı Şekil 4.5.'te verilen gerçek benzetim modeli kullanılarak 1.792.000 senaryo test edilmiştir. Her senaryo bir yıl sürecektir biçimde çalıştırılmıştır. Çalışma esnasında, Tablo 4.1.'de verilen parametrelere göre üretilen taleplerin normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile test edilmiş ve p değerleri 0,768 ile 0,918 arasında değiştiğinden verilerin normal dağılıma uygun olduğu anlaşılmıştır. Farklı senaryolarda eşit şartlar altında üretilen talepler için ANOVA testi uygulanmış ve "P" değerleri $5,31 \times 10^{-7}$ ile 0,00611 arasında olduğu için aynı talep dağılımına sahip olması gereken benzetim senaryolarının özdeş şartlar altında çalıştırıldığı anlaşılmıştır.



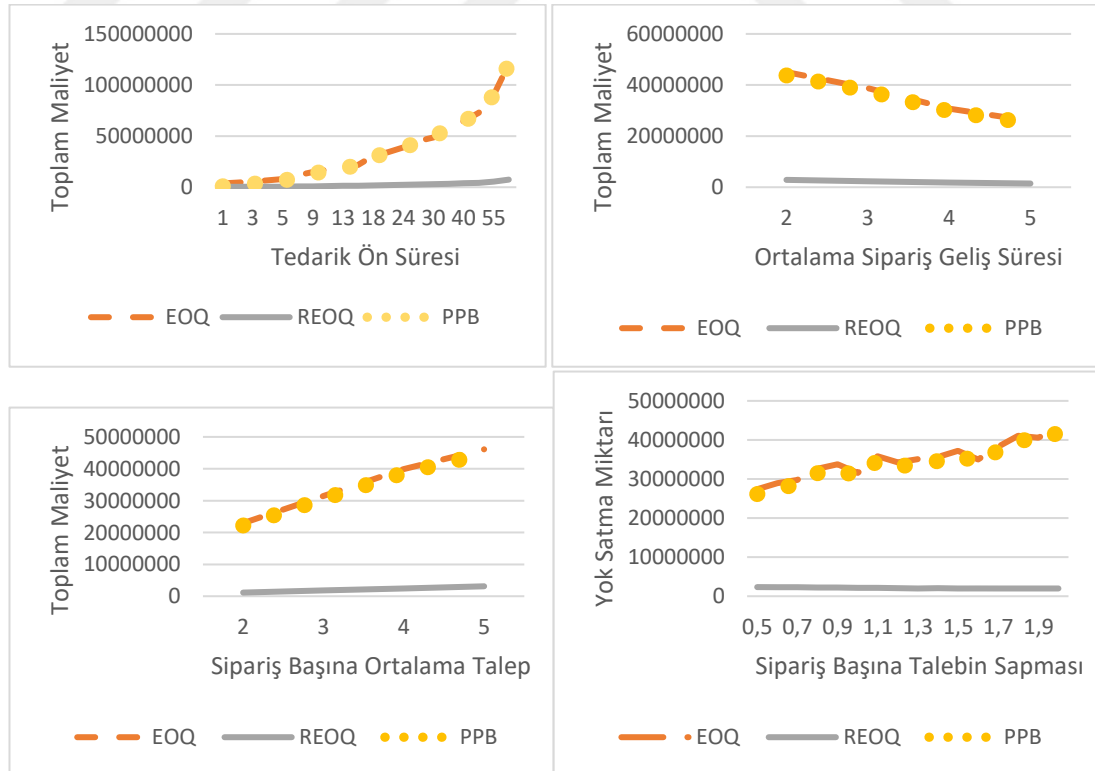
Şekil 4.5. Gerçek zamanlı benzetim modeli

Benzetim çalışmasında gerçek zamanlı stok modeli ve REOQ kuralı ile yeniden sipariş noktası modeli ve EOQ kuralı karşılaştırılmıştır. Mevcut stok modelinde yeniden sipariş noktası ortalama talep ve tedarik ön süresine göre, ekonomik sipariş miktarı sipariş maliyeti ve stok tutma maliyetine göre her benzetim senaryosunun başında bir kez hesaplanmıştır. Gerçek zamanlı stok modelinde ise yeniden sipariş verme anı ve optimal stok tutma süresi her stok hareketinde hesaplanmıştır. Stok miktarı ise optimal stok tutma süresi ile ortalama talep çarpılarak belirlenmiştir. Simülasyon senaryolarının sonuçları toplam maliyet, yok satma ve sipariş verme sayısı açısından üç başlık altında incelenmiştir.

4.1.4.1. Toplam maliyet

Gerçek zamanlı sipariş modeli emniyet stoğunu ortadan kaldırıp, tüketim davranışına göre sipariş verdiği için stok tutma maliyetini düşürmektedir. Modelin bu avantajlı yönünün toplam maliyet üzerinde de görülebilmesi için miktar belirleme kuralı olarak

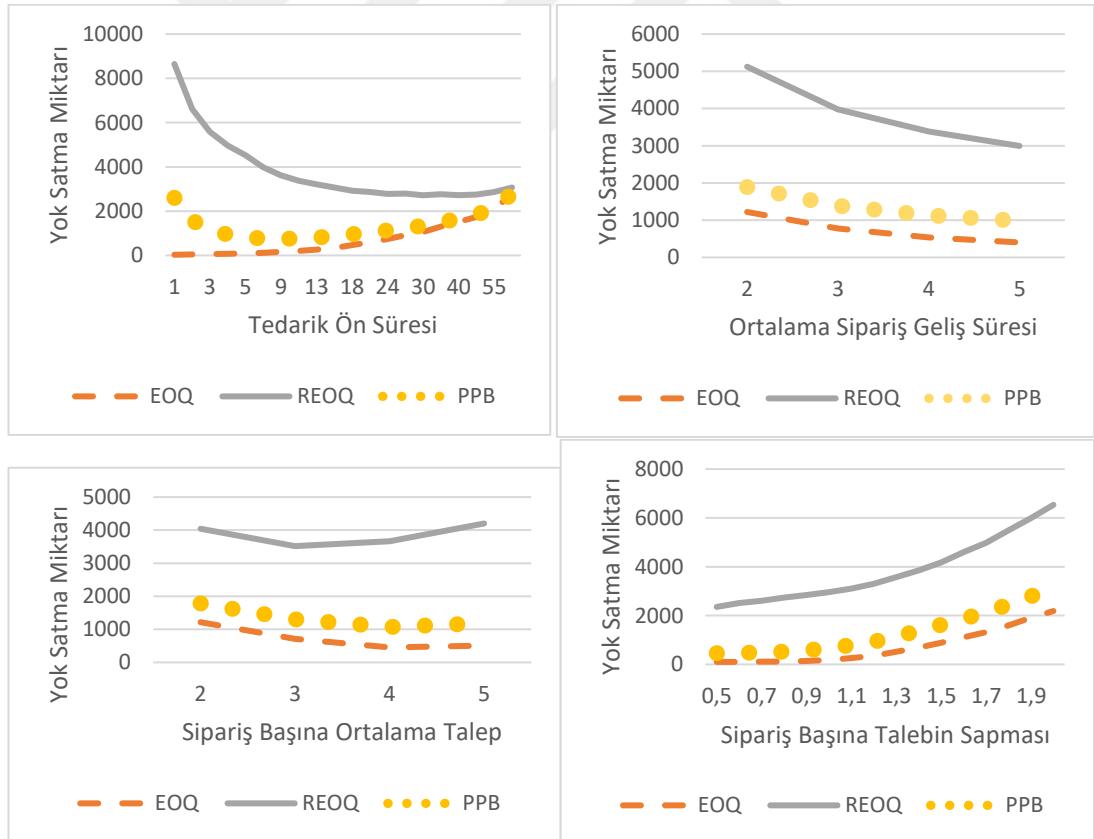
REOQ geliştirilmiştir. REOQ kuralı ile oluşan stok tutma ve sipariş maliyetine yok satma eklenmiş ve toplam maliyet hesaplanmıştır. İki model Şekil 4.6.'da maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre tedarik ön süresi arttığında, tutulması gereken stok miktarı artacağından, EOQ ve PPB (parça periyot dengeleme) metodlarının toplam maliyeti üstel artarken, gerçek zamanlı modelde çok az ve doğrusala yakın bir artış gözlenmiştir. Sipariş sıklığı azaldığında ise miktar tabanlı modelde logaritmik bir düşüş gözlenirken gerçek zamanlı modelde yine çok az doğrusal bir azalma görülmüştür. Talebin artması ise her iki modeli de doğrusal olarak etkilerken gerçek zamanlı modelinin artış eğilimi ve toplam maliyeti çok daha düşük olarak gerçekleşmiştir. Talebin sapması ise miktar tabanlı modelin toplam maliyetini etkilerken, gerçek zamanlı modeli etkilenmemiştir. Bu sayede, 1.792.000 senaryoda gerçek zamanlı modelin maliyeti EOQ modelinin ortalama %6,2'si kadar olmuştur. Benzetim sonuçları bağımlı örneklem T-Testinde “küçüktür” alternatif hipotezi ile test edilmiştir. Test sonucunda “P” değeri 0 ve “T” değeri -179 olduğu için gerçek zamanlı modelin maliyetinin daha düşük olduğu anlaşılmıştır. PPB kuralında ise EOQ maliyetinin ortalama %96,89'u kadar maliyet oluşmuştur.



Şekil 4.6. Toplam maliyetin karşılaştırılması

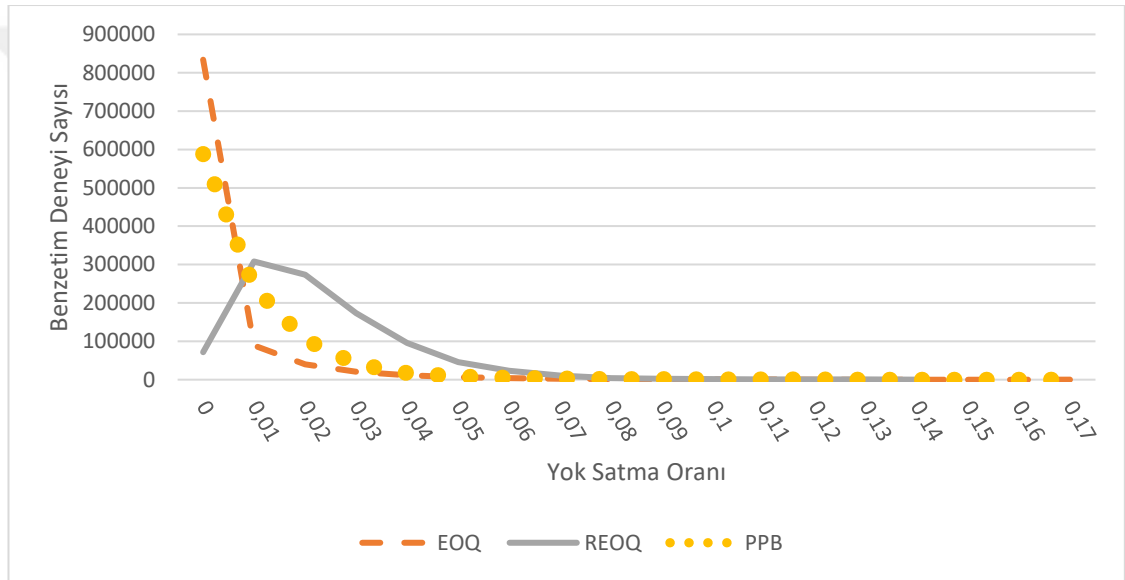
4.1.4.2. Yok satma

Miktar tabanlı modelde servis seviyesi %1 olacak şekilde emniyet stoğu tutulmuştur. Simülasyon senaryolarının %75'inde de hizmet seviyesi %99 ve üstünde gerçekleşmiştir. Emniyet stoğuna rağmen senaryoların %25'inde istenen performans elde edilememiştir. Fakat hizmet düzeyi açısından EOQ kuralının performansı daha iyidir. EOQ kuralında ortalama hizmet düzeyi %99,4 iken, PPB kuralında %99,1 REOQ kuralında ise %98 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi gerçek zamanlı modelde yok satma miktarı daha yüksek ve trendi miktar tabanlı model ile yakındır. Sadece tedarik ön süresinin artması gerçek zamanlı modelinin performansını iyileştirmiş, tedarik ön süresi 75 gün olduğunda iki modelin ortalama hizmet düzeyleri birbirine oldukça yaklaşmıştır. Gerçek zamanlı modelde yok satma miktarının sürekli düşmesinin nedeni, tutulan stok miktarının artmasıdır.



Şekil 4.7. Yok satma miktarının karşılaştırılması

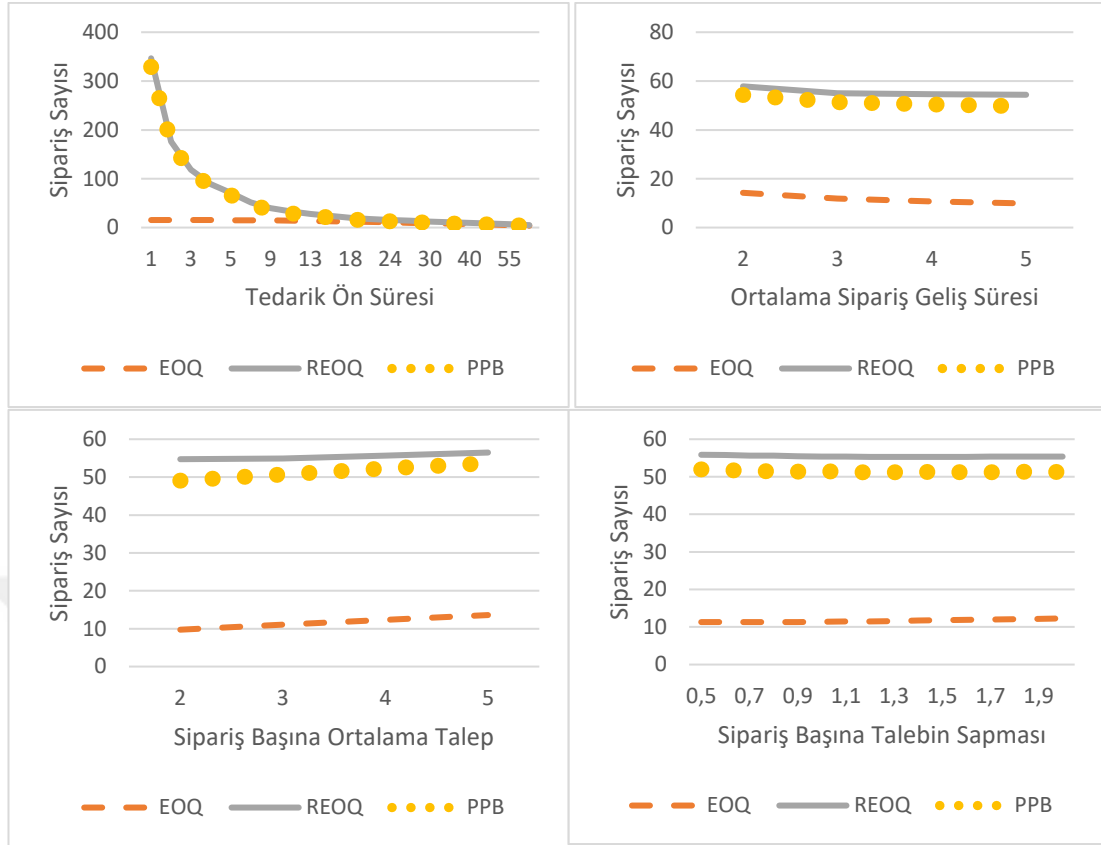
İki modelin davranışlarının daha iyi anlaşılması için hizmet düzeylerinin sıklığı Şekil 4.8.'de verilmiştir. Hiç yok satmanın olmadığı senaryo sayısı miktar tabanlı modelde çok fazlayken, gerçek zamanlı modelde oldukça azdır. Bununla birlikte her iki modelde de yüksek yok satma oranı çok az sayıda senaryoda gözlemlenmiştir. Yüksek oranların gözlemlendiği senaryolar tedarik ön süresinin çok yüksek olduğu senaryolardır. Simülasyon testinin geneline bakıldığında ise miktar tabanlı modelde %3'ün üzerinde, gerçek zamanlı modelde ise %5'in üzerinde yok satma kayda değer miktarda görülmemiştir. EOQ ve PPB kurallarında %18'e kadar yok satma gözlenirken, gerçek zamanlı modelde %14'e kadar gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Hizmet Düzeyinin Sıklığı

4.1.4.3. Sipariş verme sayısı

Gerçek zamanlı modelde stoğun tükeneneceği süre tahmin edilerek sipariş verildiği ve fazladan stok tutulmadığı için bu modelde sipariş verme sayısı miktar tabanlı modele göre daha yüksektir. Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi gerçek zamanlı modelinin sipariş verme sayısı yüksek olsa da, zaman temelli çalıştığı için, talebin dalgalanmasından etkilenmemektedir. Fakat miktar temelli modelde, talep arttıkça sipariş sayısı da artmaktadır. Sadece tedarik ön süresinin artışı tedarik zamanına bağlı olarak tutulması gereken stok miktarını artırdığı için iki modeli de benzer biçimde etkilemiştir.



Şekil 4.9. Sipariş verme sayısı

4.2. Gerçek Zamanlı Üretim Modeli

Gerçek zamanlı üretim modeli, gerçek zamanlı sistem karakteristiğine uygun olarak zaman temelinde üretimin planlanmasını gerçekleştirmektedir. Çizelgeleme işleminin sonucu zaman olsa da, bir üretim sisteminin gerçek zamanlı olması için, işlerin termini geçmeden tamamlanacak biçimde planlaması gerekmektedir. Bu durumun sağlanabilmesi için en az gevşek süreye sahip olan işin öncelikle üretilmesi gerekmektedir. En az gevşek süre hesaplanırken termin tarihi ile mevcut an arasındaki farktan üretimin tamamlanmasına kalan süre çıkarılmalıdır.

Üretimin tamamlanmasına kalan süre makine hızı, kalitesizlik, arıza duruşlar ve yeniden işleme alma (re-work) gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Değişimin miktarının ölçülebilmesi için ortalama işlem süresi ($\bar{T}_e$), işlemin standart zamanı ($T_o(w, o, i)$), parti içindeki üretim süresinin sapması (σ_c), kalan miktarın üretim

süresinin sapması (σ_o) kullanılarak Denklem 4.36.'da verilen ortalama işlem süresi ($\bar{T}_r$) her bir ürün için (i) hesaplanmaktadır.

$$\frac{\bar{T}_e - T_o(w,i)}{\sigma_c} = \frac{\bar{T}_r - T_o(w,i)}{\sigma_o} \quad (4.36)$$

Denklem 4.36.'da verilen bağıntıda σ_o bilinmemektedir. σ_o 'nun tahmin edilmesi için partide üretilen miktarın bir eksiği ($m_i - 1$) ve kalan miktarın bir eksiği ($n_i - m_i - 1$) kullanılarak Denklem 4.37.'de verilen bağıntı elde edilmiştir.

$$\sigma_o = \frac{\sigma_c \sqrt{m_i - 1}}{\sqrt{n_i - m_i - 1}} \quad (4.37)$$

Denklem 4.37.'de verilen bağıntı, Denklem 4.36.'daki da kullanılarak $\bar{T}_r$ yalnız bırakıldığında Denklem 4.38.'de verilen bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntı partinin kalan miktarı ile çarpıldığında işlemin tamamlanmasına kalan süre (T_r) elde edilmektedir.

$$(\bar{T}_e - T_o(w,i)) \frac{\sqrt{m_i - 1}}{\sqrt{n_i - m_i - 1}} + T_o(w,i) = \bar{T}_r, \quad T_r = \bar{T}_r(n_i - m_i) \quad (4.38)$$

Başlangıç anında m_i 'nin değeri sıfır olacağından herhangi bir sapma oluşmayacaktır. Eğer işlemle alakalı geçmiş veri mevcutsa, başlangıç anındaki kalan süre hesabının ana kitle sapmasıyla hesaplanması gerekmektedir. Ana kitle verileri kullanıldığında kalan miktar yerine parti miktarı (n_i) ve parti miktarı yerine gerçekleştirilen toplam işlem sayısı (N_i) Denklem 4.39.'da verildiği gibi kullanılmaktadır.

$$(\bar{T}_e - T_o(w,i)) \frac{\sqrt{n_i}}{\sqrt{N_i - n_i}} + T_o(w,i) = \bar{T}_r, \quad T_r = \bar{T}_r n_i \quad (4.39)$$

Geçmiş verilerin başlangıçta kullanılması gereklidir. Çünkü akış tipi üretimde yığın olmayacağı için parti miktarı bir olacaktır. Böyle bir durumda üretimdeki kalitesizlik ve yeniden işlem gibi verimsizliklerin üretim süresine ve çevrim süresine etkisinin anlaşılabilmesi için, başlangıç anında da üretimin tamamlanmasına kalan süre tahmin

edilmelidir. Tamamlanma süresi tahmin edilecek işlemle alakalı herhangi bir geçmiş verinin olmaması durumunda ise işlemin tamamlanmasına kalan süre işlem süresi ile parti miktarının çarpımıdır. İmalat ön süresi hesaplamada kullanılan, Denklem 3.2., Denklem 3.3. ve Denklem 3.4.'te verilen, bağıntılarda işlem süresi ($T_o(w, i)$) yerine işlemin tamamlanmasına kalan süre (T_r) kullanılarak üretimin tamamlanmasına kalan süre hesaplanabilir.

4.2.1. Gerçek zamanlı iş sıralama

Gerçek zamanlı üretim modelinde işlerin termine uygun olarak tamamlanması ön görüldüğünden, işler önceliklendirilirken termine kalan toplam süreye dikkat edilmelidir. Bu süre içerisinde üretimde geçecek olan zamandan kaçınmanın imkânı yoktur. Fakat üretimdeki bekleme ve verimsizliklerden kaynaklanan gecikmelerin de üretiminin tamamlanma anı ile termin tarihi arasındaki farkı aşmaması gerekmektedir. Üretimin tamamlanmasına kalan süre termin tarihinden (T_d) çıkarıldığında gevşek zaman (T_s) elde edilmiş olacaktır. Üretimin beklenen zamana en yakın sürede tamamlanması için işlemlerin gevşek zamana göre önceliklendirilmesi (gecikmenin ortadan kaldırılmak istenmesi) önemlidir, fakat tek başına yeterli değildir. İşlemlerin öncelikleri belirlenirken üretim sürecinin bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Çünkü işlerin önceliklerinin değişmesi istasyon verimliliklerini değiştirecek ve üretim süresini etkileyecektir. Üretim süresi Denklem 3.5.'te verilen bağıntıda belirtildiği gibi ilk ürünün üretilme süresi ile kalan ürünlerin çevrim sürelerinin toplamına eşittir. Çevrim süresi boş geçen zaman, hazırlık zamanı ve işlem zamanına bağlı olarak değiştiği için çizelgeye bağlı olarak değişim göstermesi beklenmektedir. Bu değişimin her bir ürün (i) için gevşek zamana etkisinin, Denklem 4.40.'ta verildiği gibi, en aza indirilmesi üretim sistemindeki gecikmeleri ortadan kaldırmaya yardımcı olacaktır.

$$f_{\max}(T_s) = f_{\max_i} (T_d - (n_i - 1)T_c(i) - T_{rlt}(i, 1)) \quad (4.40)$$

Termin tarihi sabit bir değer olduğu için en iyileme işleminin dışına alınabilir. Bu durumda bağıntı Denklem 4.41.'de verildiği biçimde olacaktır. Her bir ürünün toplam

gecikme süresinin en aza indirilmesi için, ürünün imalat ön süresinin en aza indirilmesi gerekmektedir.

$$f_{\max}(T_s) = T_d - f_{\min_i} \left((n_i - 1)T_c(i) + T_{rlt}(i, 1) \right) \quad (4.41)$$

İmalat ön süresinin en aza indirilmesi için Denklem 4.41.'de verilen bağıntı açılmıştır. Bağıntıdaki $(n_i - 1)$ ifadesi pozitif sabit bir katsayı olduğu için bir çeşit ürünün üretiminde en küçükleme işlemine etkisi yoktur. Bundan dolayı Denklem 4.42.'de verilen bağıntıda bu katsayı kullanılmamıştır.

$$f_{\min}(T_{mlt}) = f_{\min_i} \left(\max(j, w \in ix(i): \text{ceil}\left(\frac{a_j}{n_w}\right) T_r(w, j) + \frac{\sigma_i STV_{w,o,j}}{a_j} + T_{idlej}) + \max\left(\forall j \in \beta_{i,l}, w, o \in \beta_{i,l} : \left(T_r(w, i) + \sigma_i ST_{w,o,i} + T_m(w)\right) + (T_{rlt}(j, l + 1) \mid (\beta_{j,l+1} \neq \emptyset))\right) \right) \quad (4.42)$$

Denklem 4.42.'de verilen rota ön süresi $(T_{rlt}(j, l + 1))$ öz yinelemeli olarak devam eden bir bağıntıdır. Rota ön süresi ürün ağacının her seviyesindeki en uzun sürede üretilen bileşenin üretim sürelerinin toplamı olduğu için, en iyileme işlemi yapılırken ürün ağacının her seviyesindeki bileşenlerin üretimlerinin tamamlanma süresi hesaplanarak sistem akışa dönüştürülmelidir. Akış biçimindeki sistemin ürün ağacının tüm seviyelerinin tamamlanma sürelerinin toplamı rota ön süresini yani bir ürünün üretim süresini verecektir. İmalat ön süresinin en aza indirilmesi için üretimin tamamlanmasına kalan süreyi de (T_r) içeren $\max\left(\forall j \in \beta_{i,l}, w, o \in \beta_{i,l} : \left(T_r(w, i) + \sigma_i ST_{w,o,i}\right)\right)$ ifadesinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Planlı bakım süresi ise $(T_m(w))$ etkisi giderilemeyecek bir parametredir.

Bağıntıda ele alınan diğer bir parametre de çevrim zamanıdır. Çevrim zamanının en aza indirilmesi en uzun işlemin tamamlanmasına kalan süreye, işlem içerisindeki ek hazırlık süresine $(STV_{w,o,j})$ ve işin istasyondaki bekleme süresine bağlıdır. Ek hazırlık süresi ve T_r diğer istasyondaki işlerden bağımsız parametrelerdir. İşin bekleme süresi

(T_{idle_j}) ise, istasyondaki diğer işlerin önceliklerine bağlı olduğundan, işin istasyona atanması esnasında kontrol edilmesi gereken bir parametredir. Verilen bağıntılar kullanılarak k sayıda farklı üründen n_i adet üretildiğinde, gecikmenin en aza indirilebilmesi için Denklem 4.43.'te verilen bağıntının çözülmesi gerekmektedir.

$$f_{\max}(T_s) = f_{\max_i} \left(\sum_{i=1}^k T_{di} - f_{\min_i} \left((n_i - 1)T_c(i) + T_{rlt}(i, 1) \right) \right) \quad (4.43)$$

Bağıntıda yer alan çevrim süresinin en düşük seviyede tutulması için işin bekleme süresinin (T_{idle_j}) ve ek hazırlık süresinin sıfıra indirilmesi gerekmektedir. Bekleme süresinin sıfıra indirilmesi için verilen işlerden darboğaz istasyonda işlenecek olanlar bekletilmeden üretime dâhil edilmelidir. Eğer bir ürünün darboğaz istasyondan önce montaj işlemiyle birleştirilecek bileşenleri varsa, gecikmeyi engellemek için, bu bileşenler de önceliklendirmeye dâhil edilmelidir. Önceliklendirme işlemi ise termin tarihi ve imalat ön süresi arasındaki farkı artırmak için en küçük gevşek zamana sahip olandan başlanarak yapılmalıdır. Önceliklendirme işlemine dâhil edilmeyen bileşenlerin uğradığı istasyonlardan en fazla iş yüküne sahip olanı yerel darboğaz olarak belirlenmeli ve aynı önceliklendirme işlemi tüm parçalara öncelik değeri atanana kadar yapılmalıdır.

Önceliklendirme işleminin benzetim yardımıyla işin istasyona geliş anındaki şartlarda yapılması gerekmektedir. İşler ilk istasyonlarda işlenip rotadaki diğer istasyonlara iletildiklerinde, iletilmiş oldukları istasyonun ara stoğunda bulunan ve işlenmekte olan tüm stokların mevcut durumları karşılaştırılıp yeniden önceliklendirme yapılması gerekmektedir. Eğer işlenmekte olan parçanın önceliği düşerse, ilgili parça işlenmemiş kabul edilip yeni gelen öncelikli parça işlenmeye başlanmalıdır. Bu sayede bekleme süresi ve üretim süresi termini yaklaşan veya gecikecek parçalar için en aza indirilecektir. Bu algorithmada tüm işlerin termini sıfıra veya sabit bir sayıya eşitlendiğinde ise sistem toplam üretim süresini en aza indirmeye çalışacaktır.

İstasyondaki işlerin önceliklendirilmesi esnasında önce darboğaz ve yerel darboğazlar tespit edilip yeni gelen işin, ara stoktaki işlerin ve işlenmekte olan işin darboğaza bağlı

öncelikleri belirlenir. Aynı darboğaz istasyonda olan işler kendi aralarında gevşek zamana göre sıralanacaktır. Gevşek zaman termin ile imalat ön süresinin arasındaki fark olduğundan, en küçükleme işleminde, her iş için $T_{rlt}(i, 1)$ kullanılarak sıralama yapılması yeterli olacaktır. Toplam üretim zamanının en aza indirilmesi düşünülmendiğinde ise gevşek zaman doğrudan hesaplanarak kullanılmalıdır. En iyileme işlemi sonucunda Denklem 4.43.'te verilen bağıntı en aza indirileceği için, bağıntı Denklem 4.42.'de verilen bağıntıya benzer biçimde açılarak Denklem 4.44.'te verilen bağıntı elde edilmiştir.

$$f_{\min}(T_{mlt}) = \sum_{i=1}^k T_{di} - f_{\min_i} \left((n_i - 1) \max(j, w \in ix(i): \text{ceil}\left(\frac{a_j}{n_w}\right) T_r(w, j) + \frac{\sigma_i STV_{w,o,j}}{a_j} + T_{idle_j}) + \max\left(\forall j \in \beta_{i,l}, w, o \in \beta_{i,l} : (T_r(w, i) + \sigma_i ST_{w,o,i} + T_m(w)) + (T_{rlt}(j, l + 1) \mid (\beta_{j,l+1} \neq \emptyset))\right) \right) \quad (4.44)$$

Denklem 4.44.'te üretilecek ürün sayısının bir eksiği ($n_i - 1$) kullanılmıştır, çünkü bir adet ürün üretilmesiyle, aynı üründen birden fazla üretilmesi arasında fark olacaktır. Bu durumda, üretilecek her ürünün üretim miktarı önem kazanacaktır.

4.2.2. Gerçek zamanlı iş sıralama prosedürü

Gerçek zamanlı iş sıralama işleminin sonucunda 4.44'te verilen bağıntının sağlanması hedeflenmektedir. Bağıntıda yer alan T_{idle_j} , $\sigma_i STV_{w,o,j}$, $\sigma_i ST_{w,o,i}$ ve $T_m(w)$ parametrelerinin değerleri çizelgeye bağlı olarak belirleneceği ve doğrusal ya da doğrusal olmayan modellerle ifade edilemeyeceği için iş sıralama protokolünün yinelemeleri olarak çalıştırılması gerekmektedir. Çözüm sürecinin her adımında mevcut duruma göre işlerin yeniden önceliklendirilmesi gerekmektedir. Prosedürün çalışma aşamaları aşağıda verilmiştir.

1. Her işin rotası üzerindeki en fazla iş yükü olan istasyonun iş yükünü darboğaz istasyon yükü olarak ata.

2. İşleri rotalarındaki istasyonlara dağıt
3. İstasyona yeni gelen işi, ara stok ve işlem gören işler de dâhil olmak üzere tüm işleri darboğaz istasyon yüküne göre sırala.
4. Aynı darboğaz istasyon yüküne sahip olan işleri gevşek zamana göre sırala
5. 4. Adımda sıralan işlerden eşit gevşek zamana sahip olanları darboğaz istasyondaki işlem süresine göre küçükten büyüğe doğru sırala.
6. 5. adımda sıralanan işlerden eşit işlem süresine sahip olanları darboğaz sonrası istasyonlardaki toplam iş yüküne göre küçükten büyüğe doğru sırala.
7. Eğer yeni gelen işin önceliği işlem görmekte olan işin önceliğinden fazlaysa yeni parça işleme alındığında oluşacak toplam gevşek zaman ile mevcut durumda oluşan toplam gerçek zamanı karşılaştır.
8. Eğer mevcut gevşek zaman daha düşükse veya eşitse yeni işi kuyruğa al, değilse yeni işi işleme al.

Verilen bağıntılardan yapılan çıkarımlarla elde edilen gerçek zamanlı iş sıralama prosedürü işlerin en az gecikmeyle bitirilmesini amaçlamaktadır. Prosedür uygulanırken termin tarihi tüm işler için sıfır veya sabit bir değer olursa işler en kısa sürede tamamlanacak biçimde sıralanacaktır. Prosedürde işin boş bekleme zamanı ve hazırlık zamanı gibi parametreler doğrusal olarak modellenemediği için optimallik garantisi yoktur. Fakat gerçek zamanlı üretim stratejisi kalitesizlik, yeniden işlem ve arızı duruşlar gibi nedenlerden dolayı üretim süresinde oluşabilecek sapmalara rağmen toplam gecikmeyi en aza yaklaştıracaktır.

Prosedürün uygulaması için Tablo 4.2.'de verilen işler gerçek zamanlı üretim modeli kullanılarak sıralanmıştır. Sıralama işlemi esnasında ilk andan ($t=0$) başlayarak, işlerin rotalarında yer alan istasyonlara uğradıkları her anda gevşek zaman ve darboğaz istasyon yükleri yeniden hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları gerçek zamanlı iş sıralama prosedüründe kullanılarak istasyonda bulunan işler sıralanmıştır. Sıralama için her işin termin tarihi sıfır verilerek en iyi çizelgenin bulunması hedeflenmiştir. En iyi çizelge 170 saniyede tamamlanırken, gerçek zamanlı iş sıralama ile oluşturulan çizelge 175 saniyede tamamlanmıştır.

Tablo 4.2. Rota verileri

İş	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
İ1	10 sn.	15 sn.		20 sn.		10 sn.	
İ2	40 sn.	30 sn.	30 sn.				10 sn.
İ3		15 sn.	20 sn.	25 sn.	35 sn.	15 sn.	
İ4	10 sn.		30 sn.		50 sn.		30 sn.
İ5		10 sn.		20 sn.	40 sn.		10 sn.
İ6	15 sn.	20 sn.		10 sn.		90 sn.	

İlk adımda işler M1 ve M2 istasyonlarına uğrayacaktır. Termin tarihi sıfır olarak atandığı için, M1 ve M2 istasyonuna uğrayacak işlerin gevşek zamanları ve darboğaz istasyon yükleri Tablo 4.3.'te verildiği gibi olacaktır.

Tablo 4.3. İlk adımda işlerin durumu

İş	Hedef İstasyon	Mevcut İstasyon	İşlemdeki Parça	Gevşek Zaman (sn.)	Kalan Süre (sn.)	Darboğaz İstasyon	Darboğaz İstasyon Yüğü
İ1	M1	-	-	-55	55	M6	115
İ2	M1	-	-	-110	110	M3	100
İ3	M2	-	-	-110	110	M5	125
İ4	M1	-	-	-120	120	M5	125
İ5	M2	-	-	-80	80	M5	125
İ6	M1	-	-	-135	135	M6	115

M1'de gerçekleştirilecek işlerden darboğaz istasyon yükü en fazla olan İ4 olduğu için M1'e İ4 atanır. M2'deki iki işin de darboğaz istasyonları aynı olduğundan en az gevşek zamana sahip olan İ3 işleme alınır. Bir sonraki adım İ4'ün M1'deki işleminin tamamlanmasıyla 10. Saniyede gerçekleşir. Bu adımda İ3 M2'de işlem görmektedir. Tablo 4.4.'te görüldüğü gibi, işlem gören işlerin gevşek süreleri sabit kalmış diğer parçaların gevşek süreleri atılmıştır. En iyilemede gevşek süre yerine kalan süre de kullanılabileceğinden kalan süreler göz önünde bulundurulduğunda sadece işlem gören işlerin kalan süreleri azalmış diğerleri sabit kalmıştır. En iyileme probleminde nicelik karşılaştırırken her iki parametrenin de aynı sıralamayı sağlayacak biçimde değiştiği görülmektedir. Bu parametreler dikkate alındığında ise M1'e atanması gereken iş İ6'dır. İ4 ise M3'te işlem görecektir.

Tablo 4.4. İkinci adımda işlerin durumu

İş	Hedef İstasyon	Mevcut İstasyon	İşlemdeki Parça	Gevşek Zaman (sn.)	Kalan Süre (sn.)	Darboğaz İstasyon	Darboğaz İstasyon Yüğü
İ1	M1	-	-	-65	55	M6	115
İ2	M1	-	-	-120	110	M3	100
İ3	-	M2	-	-110	100	M5	125
İ4	M3	M1	-	-120	110	M5	125
İ5	M2	-	İ3	-90	80	M5	125
İ6	M1	-	-	-145	135	M6	115

Üçüncü adım ise 15. saniyede gerçekleşmiştir. Bu adımda İ2'nin darboğaz istasyon yükü 5 sn düşmüştür. Çünkü M3'te 5 sn işlem gerçekleşmiştir. İ3'ün M2 istasyonundaki işlemi bitmiştir ve M3 istasyonuna sevk edilmiştir. M3'te İ4 işlenmekte olduğundan İ4 ile İ3 karşılaştırılacaktır. İ3'ün öncelikli olması durumunda İ4'ün İ3'ü beklemesiyle, İ4'ün işlenmeye devam etmesi durumları karşılaştırılacak en az toplam gevşek zamana sahip olan strateji uygulanacaktır. İ3 ve İ4'ün darboğaz istasyon yükleri eşit olduğundan, kalan süreler karşılaştırılarak İ4'ün işlemine devam edilmesi gerektiğine karar verilmiştir.

Tablo 4.5. Üçüncü adımda işlerin durumu

İş	Hedef İstasyon	İşlemdeki Parça	Mevcut İstasyon	Gevşek Zaman	Kalan Süre	Darboğaz İstasyon	Darboğaz İstasyon Yüğü
İ1	M1	-	-	-70	55	M6	115
İ2	M1	-	-	-125	110	M3	95
İ3	M3	İ4	-	-110	95	M5	125
İ4	-	-	M3	-120	105	M5	125
İ5	M2	-	-	-95	80	M5	125
İ6	-	-	M1	-145	130	M6	115

Tüm adımlar tamamlandığında ortaya çıkan çizelge Tablo 4.6.'da verilmiştir. Çizelge oluşturulurken belirlenen iş sıralaması M1 istasyonu için İ4, İ6, İ2 ve İ1 olmuştur. M2 istasyonundaki iş sıralaması İ3, İ5, İ2 ve İ1 şeklinde olmuştur. İ6 M2'ye geldiğinde istasyon boş olduğundan İ6'ya bu istasyonda herhangi bir öncelik atamaya gerek kalmamıştır. M3 istasyonunda ise sıralama İ4, İ3, İ2 ve İ1 şeklinde olmuştur. M4 istasyonunda hiç kuyrukta bekleyen iş olmadığından sıralamaya gerek olmamıştır. M5

istasyonundaki sıralama İ4, İ3 ve İ6 şeklinde gerçekleşmiştir. M5 istasyonu darboğaz istasyonken 50. saniyeden sonra M6 darboğaz istasyon olmuştur. M6'daki sıralama ise İ6, İ3 ve İ1 şeklinde olmuştur. M7'de de M4 gibi iş sıralamaya gerek kalmamıştır.

Tablo 4.6. Gerçek zamanlı iş sıralama kuralı ile elde edilen çizelge

İş	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
İ1	65-75	95-110	125-145			160-170	
İ2	25-65	65-95	95-125				125-135
İ3		0-15	40-60	60-85	90-125	145-160	
İ4	0-10		10-40		40-90		90-120
İ5		15-25		25-45	125-165		165-175
İ6	10-25	25-45		45-55		55-145	

Tablo 4.7.'de verilen en iyi çizelgenin gerçek zamanlı çizelgeden farkı İ1'in ikinci sırada öncelikli olması ve İ5'in önceliğinin İ3'ten fazla olmasıdır. Bu sayede darboğaz istasyonda işlerin tamamlanma süresi on saniye kısalmış, üretimin tamamlanma süresi ise toplamda beş saniye kısalmıştır.

Tablo 4.7. En iyi çizelge

İş	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
İ1	10-20	20-35	35-55			55-65	
İ2	35-75	75-105	105-135				150-160
İ3		55-70	70-90	90-115	120-155	155-170	
İ4	0-10		10-40		70-120		120-150
İ5		0-10		10-30	30-70		70-80
İ6	20-35	35-55		55-65		65-155	

4.2.3. Masa ve sehpa örneğinin gerçek zamanlı çözümü

Masa ve sehpa üretiminde darboğaz istasyonlar 420 saniye iş yükü ile delme ve montaj istasyonlarıdır. Her iki ürünün tüm parçaları bu istasyonlara uğradığından darboğaz istasyon yükünün belirlenmesi için diğer istasyonlara bakmaya gerek yoktur. Tüm parçaların darboğaz istasyon yükü eşit olduğundan gevşek zaman işlerin sıralanmasında en önemli etken olacaktır. Çizelgenin en kısa üretim süresini sağlaması

için termin sıfır olarak kabul edilmiş ve her parçanın gevşek zamanı ona göre hesaplanmıştır. Gevşek zaman göz önünde bulundurulduğunda şerit testerede masa ayak kompleleri ilk iki sırada, sehpanın ayak kompleleri ise üçüncü ve dördüncü sırada işlem görecektir. Ebatlama ve bantlama istasyonlarında ise önce masa üst tablası, sonra masanın perdesi ve son olarak da sehpanın üst tablası işlem görecektir. Delmede önce masa ayak kompleleri, sonra masanın üst tablası ve perdesi, daha sonra sehpa ayak kompleleri ve son olarak da sehpanın üst tablası işlem görecektir. Ayak montajında iş sıralamaya gerek yoktur. Montaj istasyonunda önce masa montajı sonra da sehpa montajı yapılacaktır. Gerçek zamanlı iş sıralaması yapılarak oluşturulan çizelge Tablo 4.8.'de verilmiştir. Masa ve sehpa örneğinde gerçek zamanlı üretim stratejisi ile en iyi çizelge elde edilmiştir.

Tablo 4.8. Gerçek zamanlı iş sıralama kuralı ile elde edilen çizelge

Ürün	Ebatlama	Şerit Testere	Bantlama	Delme	Ayak Montajı	Montaj
Üst Tabla (S)	190-220		410 – 470	700 – 790		
Ayak Komitesi (S)		260 – 300		520 – 610	700 - 800	
Ayak Komitesi (S)		300 – 340		610 – 700	700 - 800	
Sehpa						820 - 940
Üst Tabla (M)	0 – 100		100 - 220	400 - 460		
Perde (M)	100 – 190		220 - 290	460 - 520		
Ayak Komitesi (M)		0 -140		140 – 260	400 - 520	
Ayak Komitesi (M)		140 - 280		280 - 400	400 - 520	
Masa						520 -820

4.2.4. Gerçek zamanlı modelde makine/istasyon seçimi

Çizelgeleme esnasında bir işlem birden fazla istasyonda gerçekleştirilebiliyorsa alternatiflerden hangisinin seçileceği en iyi çözümü etkileyen önemli bir problemdir. Çünkü alternatifler olması durumunda işin hangi istasyona atanacağı bilinmediğinden darboğaz doğru belirlenemeyebilir. İstasyonların üretim hızlarının farklı olması

durumunda da çevrim süresine kadar üretim parametreleri değişebileceğinden en iyi çözüm koşullarını bozmadan atama yapılması gerekmektedir. Bunun için en iyi çözüm koşullarının başlangıçta belirlenip, işlerin alternatif istasyonlarından hangilerine atanacağı belirlenmese de, en iyi çözüm koşullarında hangi istasyona ne kadar iş atanmış olacağı hesaplanmalıdır.

En iyi çizelge koşulunda istasyonların iş yüklerini hesaplarken istasyonun çalışma hızı (S_w) ve istasyona atanan işlemlerin toplam süresi $T_r(w,i)$ kullanılarak Denklem 4.45.'teki gibi belirlenir. Bağintıda verilen istasyonun üretim hızının toplam işlem süresine oranı üretim oranını, yani birim zamanda üretilen ürün miktarını verir. Her istasyonun üretim oranlarının toplamı (k) belirli bir değer olmasına karşın, en iyi istasyon seçimine etkisi yoktur.

$$\sum_{w=1}^m \frac{S_w}{\sum_{i=1}^n T_r(w,i)} = k \quad (4.45)$$

Denklem 4.45.'te verilen bağıntının açılmış hali Denklem 4.46.'da görülmektedir. Elde edilen bağıntı kullanılarak işlerin en kısa sürede tamamlanmasını sağlayacak istasyon atamasının belirlenmesi için istasyondaki toplam işlem süresine göre türev alınması gerekmektedir.

$$\sum_{w=1}^m S_w \prod_{ws=1}^{m|ws \neq w} \sum_{i=1}^n T_r(ws, i) = k \prod_{w=1}^m \sum_{i=1}^n T_r(w, i) \quad (4.46)$$

İstasyondaki toplam işlem süresini $\sum_{i=1}^n T_r(w,i)$ ifadesi yerine ($T_{wlt}(w)$) ifadesi yazılıp T_{wlt} 'ye göre türev alınırsa Denklem 4.47.'de verilen bağıntı elde edilir.

$$\forall_{w'=1}^m \sum_{w=1}^m S_w \prod_{ws=1}^{m \setminus w} T_{wlt}(ws) \frac{\partial}{\partial T_{wlt}(w')} = k \prod_{w=1}^m T_{wlt}(w) \frac{\partial}{\partial T_{wlt}(w)} \quad (4.47)$$

Türev alma işleminin sonucunda elde edilen bağıntılar Denklem 4.48.'de verilmiştir. Elde edilen denklemlerde tüm istasyonlara ait istasyon hızlarının türevi alınan indisli değişken dışındaki istasyonların toplam süreleriyle çarpımlarının toplamı, toplam

üretim oranı ile türevi alınan indisli değişken haricindeki toplam istasyon sürelerinin çarpımına eşittir.

$$\forall_{w'=1}^m \sum_{w=1}^m S_w \prod_{ws=1}^{m \setminus (w \cup w')} T_{wlt}(ws) = k \prod_{w=1}^{m \setminus w'} T_{wlt}(w) \quad (4.48)$$

Denklem 4.48.'de k sabiti yalnız bırakıldığında, Denklem 4.49.'da verilen hale gelmektedir. Verilen denklem setinde matrisin her satırında türevi alınan indisli değişken dışındaki her indisteki üretim oranlarının toplamı k sabitine eşittir. Buna bağlı olarak, tüm satırlar birbirine eşitlendiğinde elde edilen sonuç tüm istasyon sürelerinin birbirine eşit olması gerekliliğidir.

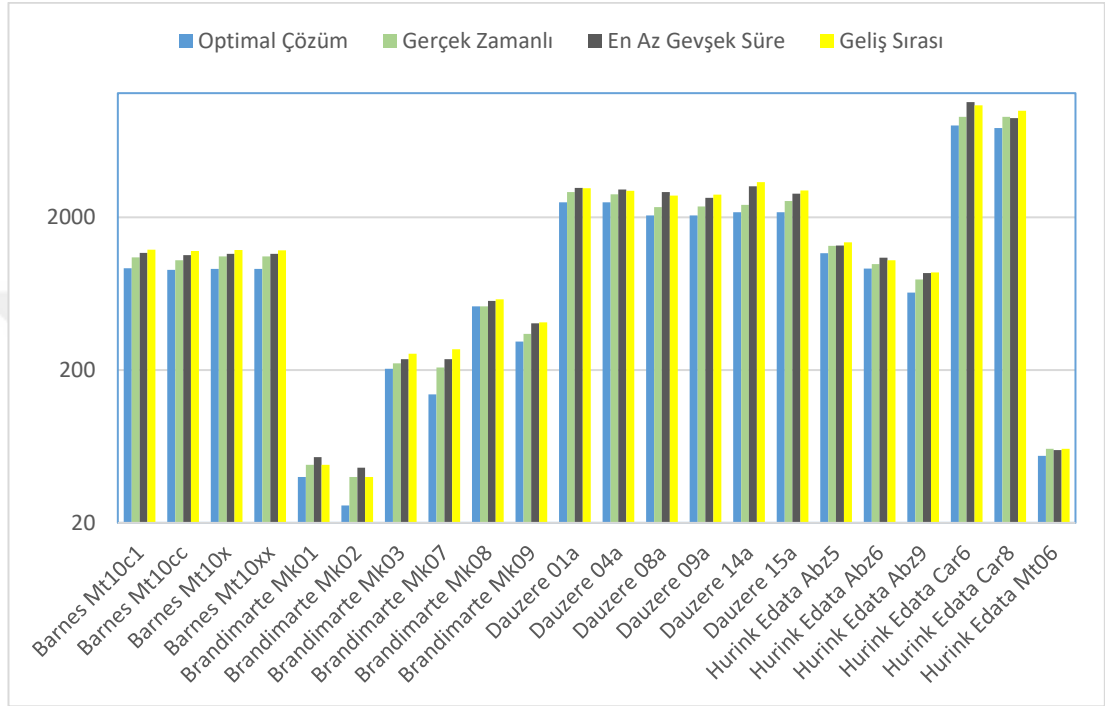
$$\forall_{w'=1}^m \sum_{w=1}^{m \setminus w'} \frac{S_w}{T_{wlt}(w)} = k \quad (4.49)$$

İstasyonların işlemleri aynı anda bitirmesi için istasyonlara hızları oranında iş atanması gerekmektedir. Bunun için istasyonların toplam iş yüklerinin en küçük ortak katları, iş yüklerine oranlanarak her istasyonun ortalama hızı belirlenir. Herhangi bir istasyondaki iş yükü istasyon hızının, istasyon hızlarının toplamına oranı ile çarpıldığında her bir istasyona atanması gereken işlerin toplam süresi elde edilir. Bu sayede en iyi çözüm şartlarında istasyonların iş yükleri bulunmuş olur. İstasyonlara hangi işlerin atanacağı ise gerçek zamanlı seçim stratejisi uygulanırken belirlenmelidir.

4.2.5. Kıyaslama çalışması

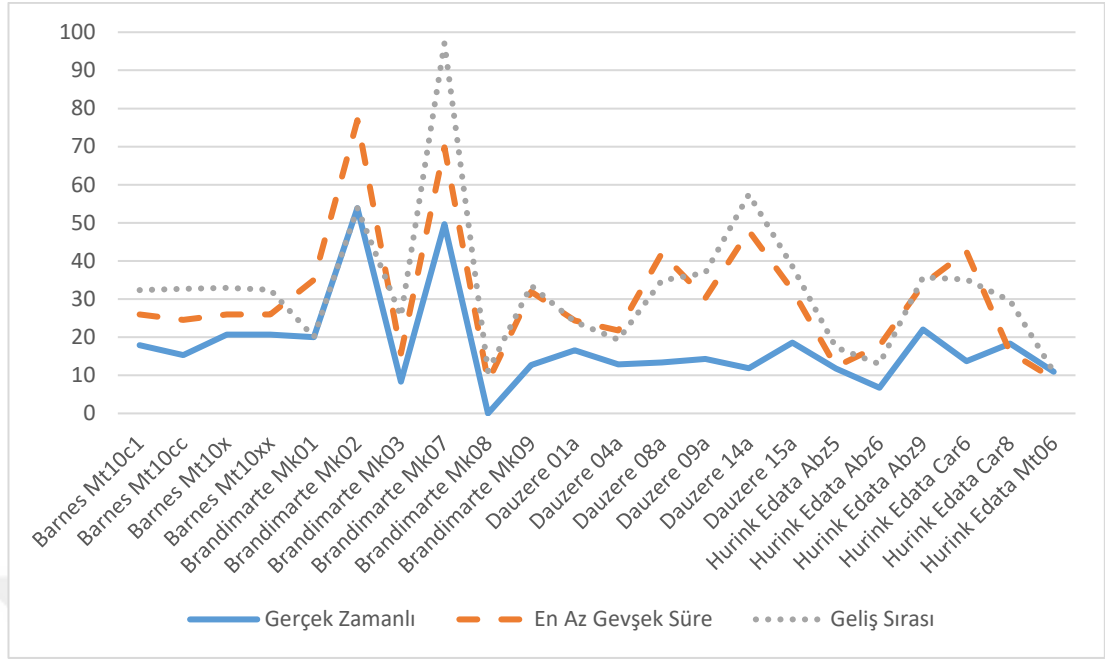
Gerçek zamanlı iş sıralama kuralının çalışma performansının ölçülmesi için Brandimarte, Barnes, Dauzere ve Hurink'in hazırladıkları veri setleri kullanılmıştır (Quintiq, 2018). Brandimarte'ın veri setinde işlerin alternatif tezgâhlarda yapılabileceği değerlendirilmiştir, fakat alternatif tezgâhlar özdeş kabul edilmiştir. Barnes ve Dauzere ise alternatif tezgâhların özdeş olmadığı, işleri farklı sürelerde tamamladıkları, ön görüşüyle veri setlerini hazırlamışlardır. Hurink veri setinde ise farklı sayılarda alternatif tezgâh değerlendirilmiştir (Geiger, 2012). Kullanılan veri

setlerinin her biri için hesaplanan üretim süresi optimal (Quintiq, 2018) üretim süresi, geliş sırasına göre üretim kuralı ile hesaplanan üretim süresi ve en az gevşek zaman kuralı ile elde edilen üretim süresi, Şekil 4.10.'da verildiği gibi, karşılaştırılarak gerçek zamanlı iş sıralama prosedürünün performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 4.10. Üretim Süreleri

Gerçek zamanlı sıralama prosedürü ile Brandimarte MK08 veri setinde optimal çözüm bulunurken tüm veri setleri incelendiğinde çizelgenin optimal çözüme göre gecikme miktarı optimal üretim süresinin ortalama %15,33'ü kadar olmuştur. Gerçek zamanlı iş sıralama kuralının optimal çözüme göre gecikme miktarı, en az gevşek zaman ve geliş sırasına göre üretim prosedürlerine göre daha az olmuştur. En az gevşek zaman kuralına göre gerçekleştirilen iş sıralamada toplam gecikme gerçek zamanlı iş sıralama kuralında oluşan gecikmenin ortalama 1,71 katıdır. Geliş sırasına göre üretim kuralında meydana gelen gecikme ise gerçek zamanlı iş sıralama kuralının ortalama 1,91 katıdır. Tüm veri setlerinde üç iş sıralama kuralı ile oluşan gecikme oranları Şekil 4.11.'de görülmektedir.



Şekil 4.11. İş Sıralama Kurallarının Optimal Çözümüne Göre Gecikme Oranları

4.3. Sonuç

Üretim çok sayıda etkenden etkilenen değişken bir süreçtir. Süreçteki değişimler planlardan sapmaya neden olmaktadır. Oluşan sapmalar temelde maliyet ve gecikme olarak sonuçlanmaktadır. Üretim sürecinin etkin yürütülebilmesi için değişkenliklere uyum sağlayabilen bir planlama yaklaşımına ihtiyaç vardır. Çünkü Endüstri 4.0'ın temel taşlarından birisi olan kitlesel özelleştirme üretimdeki çeşitliliği artıracak ve belirsizliklerin planlamadaki sapmaya olan etkisini artıracaktır. Bu etkinin kontrol edilebilmesi için planlamadaki bağımsız değişkenlerin sapmadan en az etkilenecek ya da etkilenmeyecek parametreler içinden seçilmesi gerekmektedir.

Üretim ortamındaki değişimlerin olumsuz etkisini en aza indirebilmek için üretim planlama miktar yerine zaman parametresi üzerinde kurgulanmıştır. Miktar parametresi taleplerdeki dalgalanmadan, kalitesizlik vb. nedenlerden doğrudan etkilenmektedir. Fakat zaman taleplerdeki değişimlerden veya birim üretim süresi üretim miktarından etkilenmemektedir. Bundan dolayı, zaman ekseninde kurgulanan bir üretim sistemi değişkenliklerden miktar tabanlı planlama sistemleri gibi etkilenmeyecektir.

Zaman parametresi kullanılarak planlanan ve zaman hedefiyle çalışan sistemler gerçek zamanlı sistemlerdir. Önerilen model, zaman temelinde kurgulandığı için gerçek zamanlı bir üretim planlama sistemidir. Gerçek zamanlı planlama sistemi stok ve üretim yönetimi olmak üzere iki kısım halinde geliştirilmiştir. Stok modelinde, stok yönetiminin taleplerdeki dalgalanmadan etkilenmeden ve emniyet stoğu tutmadan yapılması amaçlanmaktadır. Bunun için belirli bir sipariş noktası (ROP) yerine stoğun tükenmesine kalan süre hesaplanarak, kalan süre tedarik ön süresine eşit olduğunda sipariş verilmektedir. ROP modelinde talepteki dalgalanmalar emniyet stoğu ile yönetilmeye çalışılırken, gerçek zamanlı modelde stoğun tükenmesine kalan süre her stok hareketinde güncellenmektedir. Stok tüketimi hızlandığında tükenmeye kalan süre kısalmakta, yavaşladığında ise tükenmeye kalan süre uzamaktadır.

Sipariş verme anının sürekli değişmesi en uygun stok politikasının belirlenmesi için yeterli değildir. Çünkü sipariş verme anında verilecek siparişin büyüklüğü de önemlidir. Siparişin büyüklüğünün belirlenmesi için deponun sabit ve değişken maliyetlerinin göz önünde bulunduran bir gerçek zamanlı ekonomik sipariş miktarı (REOQ) hesaplanmıştır. Bu miktar belirleme modeli sonuç olarak miktar değil, optimal stok tutma süresini vermektedir. Sipariş miktarının belirlenmesi için modelden elde edilen sonucun ortalama tüketim miktarıyla çarpılması ya da belirlenen dönem için talep tahmini yapılması gerekmektedir. Bu durumun sonucu olarak, talebin yüksek olduğu dönemlerde daha yüksek miktarlarda sipariş verilecektir. Geliştirilen gerçek zamanlı REOQ modelinin ekonomik sipariş miktarından farkı sadece siparişin değil, deponun da sabit maliyetlerini göz önünde bulundurması ve sonuç olarak sabit bir sipariş miktarı değil, talebin karakteristiğine göre miktarın belirlenmesini sağlayan optimal bir sabit dönem uzunluğu vermesidir.

Geliştirilen miktar belirleme kuralının ve stok modelinin performansının anlaşılabilmesi için bir benzetim çalışması ile kıyaslama yapılmıştır. Kıyaslamada literatürdeki veri setleri yerine benzetim çalışmasının tercih edilmesinin nedeni gerçek zamanlı stok modelinde veri olarak sipariş verilme anına ve sipariş miktarına ihtiyaç duyulmasıdır. Veri setlerinde sadece dönemlik sipariş miktarları yer aldığı için benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışması için öncelikle literatürde farklı

stok çalışmalarında yer alan parametreler ve değer aralıkları derlenmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak Tablo 4.11.'de verilen parametrelerin kombinasyonundan oluşan 1.792.000 senaryo test edilmiştir. Bu senaryoların sonucuna göre gerçek zamanlı stok modelinde stok tutma maliyeti ROP modelinden çok daha az gerçekleşmiştir. ROP modelinde tedarik ön süresi, talepteki sapma ve ortalama sipariş miktarı arttıkça stok tutma maliyeti artarken gerçek zamanlı model bu parametrelerin artışından etkilenmemektedir. Model, parametrelerin değişmesine rağmen stok tutma maliyetini belirli bir seviyede tutmayı başarmıştır. Buna karşın miktar tabanlı olan EOQ modelinde yok satma miktarı ortalama %0,6 olarak gerçekleşmişken, gerçek zamanlı modelde ortalama %2'dir. Fakat gerçek zamanlı stok modelinin maliyeti miktar tabanlı modelin %6,2'si kadar olmuştur.

Üretim modelinde ise beklenmeyen arızalar ve kalitesizlik gibi nedenlerden oluşan yeniden üretim süreçlerinin üretim süresi üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Üretimde meydana gelen değişimlerin hem miktara hem de zamana etkisi olduğu için zaman temelinde bir planlama ile bu etkilerden kaçmak kolay değildir. Bu nedenle, çalışmada önerilen üretimin matematik modeli üretimin tamamlanmasına kalan süreyi tahmin edecek şekilde güncellenmiştir. Her ürünün üretiminin tamamlanmasına kalan süreye göre önceliklendirme yaparak oluşacak gecikmemelerin en aza indirilmesini hedefleyen bir iş sıralama kuralı geliştirilmiştir.

Üretimdeki öncelik kısıtları üretimin sürekli çözümünü engellemekte ve modeli ayrık hale getirmektedir. Önerilen matematik modelin en iyilenebilmesi için bu etkiden kaçınmak gerekmektedir. Çünkü ayrık modelin çözümü için $O(n^2)$ zaman karmaşıklığına sahip, çalışma süresi uzun algoritmalar gerekmektedir. Mevcut çalışmada, önerilen matematik modeldeki gecikme ve bekleme gibi parametreler göz ardı edilerek model sürekli hale getirilmiştir. Model en iyilendiğinde $O(n)$ zaman karmaşıklığına sahip gerçek zamanlı iş sıralama kuralı elde edilmiştir. İş sıralama kuralı geliştirilirken göz ardı edilen kısıtlar nedeniyle optimallik garantisi yoktur. Fakat yapılan kıyaslamada bir veri setinde optimal sonuç bulunmuş, diğer veri setlerinde geliş sırasına göre üretim ve en az gevşek zamana göre üretim kurallarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Üretim sistemleri karmaşık ve değişken sistemlerdir. Üretimin karmaşık yapısı, sistemin teknolojik özelliklerine, lojistiğine, üretilen ürünün ya da hizmetin yapısına ve kapsamına bağlı olarak şekillenmektedir. Sistemin yapısındaki bu karmaşıklık planlamada oluşan kısıtlardan sistemin verimliliğine, siparişlerin termin süresinden ürünün maliyetine kadar çok sayıda parametreyi etkilemektedir. Üretim planlamanın ana fonksiyonu etkilenen bu parametreleri yöneterek en uygun çözümü üretmektir. Fakat beklenmeyen değişkenlikler (talep değişkenlikleri, yeniden işlemler vb.) planlamanın hedeflediği optimal durumdan sapmaya neden olmaktadır.

Teknolojik gelişimler üretim sistemlerinin daha esnek ve çevik olmasını sağlarken rekabeti de artırmakta ve üretim sistemlerinin daha fazla değişkenlikle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Çünkü teknolojik gelişmeler üretim esnekliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Dijital teknolojilerdeki gelişmelerle başlatılan dördüncü endüstriyel dönüşümün de kitlesel özelleştirmeyi (kişiye özgü ürün) hedeflemesi bu durumun en açık göstergesidir. Artan değişkenlik karmaşık olan üretim sisteminin yönetimini zorlaştırmaktadır. Değişkenliğin yönetimi için uygulanan emniyet stoğu, ara stok veya zaman toleransları belirleme gibi çözümler maliyet ve verimlilik açısından olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

3 boyutlu yazıcılar gibi sürecin esnekliğini artıracak ve üretimin öncelik kısıtlarını azaltacak teknolojiler geliştirilmekte, gelecekte belki de öncelik kısıtı olmadan üretim işlemleri tamamlanabilecektir. Mevcut üretim sistemlerinde de, üretim teknolojilerinin üretimi tek aşamada tamamlayacak biçimde gelişmesiyle de sadece kısıtlar değişecek ve azalacaktır. Amaç fonksiyonu ise zaman, maliyet ve enerji gibi parametrelerle sürdürülecektir. Sistem teknolojik olarak gelişse de rekabet ortadan kalkmayacaktır. Bundan dolayı, değişkenliği klasik sistemlerin neden olduğu maliyet ve verimsizlikler

olmaksızın yönetecek; hem mevcut üretim sistemlerine uygulanabilecek, hem de gelecekteki üretim sistemlerine adapte olabilecek bir planlama sistemine ihtiyaç vardır.

5.1. Gerçek Zamanlı Üretim Planlama ve Kontrol

Mevcut üretim sistemlerinde beklenmeyen durumlardan kaynaklanan değişkenlikler emniyet stoğu, ara stok veya zaman toleransları belirlenerek yönetilmeye çalışılmaktadır. Bu durum maliyete ve verimsizliğe neden olarak üretim sistemini olumsuz etkilemektedir. Üretim sisteminin değişkenliğin olumsuz etkilerinden kurtulabilmesi için değişkenlikten etkilenmeyen bir planlama sistemine ihtiyaç vardır. Çalışmada ihtiyaç duyulan planlama sisteminin tasarımı için değişken olan miktar parametresi yerine, üretim sistemindeki değişkenliklerden daha az etkilenecek zaman parametresi kullanılarak yeni bir üretim planlama ve kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem stok yönetimini stok miktarına bakmaksızın, stoğun tükenmesine kalan süreyi tahmin ederek yapmaktadır. Stok tükene kadar verilen siparişin geleceği kabul edilerek emniyet stoğu tutulmamaktadır. Üretimde ise termin tarihi yaklaşan ürünler önceliklendirilmekte ve termin tarihine yetiştirilmeye çalışılmaktadır.

Üretim planlama sistemi zamanı temel alarak çalışmakta ve belirlenen süre içinde işin tamamlanmasını hedef alarak çalıştığı için gerçek zamanlı bir sistemdir. Sistem depodaki her stok hareketinde stoğun tükenmesine kalan süreyi hesaplayarak çalışmaktadır. Üretimde ise üretimin tamamlanmasına kalan süreyi ve darboğazı sürekli güncelleyip termin tarihine göre önceliklendirme yaparak çizelgeleme işlemini gerçekleştirmektedir. Gerçek zamanlı üretim planlama sistemi dinamik bir sistem gibi çalışsa da dinamik planlama sistemleriyle gerçek zamanlı planlama sistemi arasındaki fark, gerçek zamanlı planlama sisteminin zaman hedeflerini belirleyerek bu hedeflere uyacak biçimde çalışmasıdır. Dinamik sistemlerde ise miktar, enerji ve maliyet gibi farklı parametreler sürekli hesaplanarak planlar güncellenmektedir.

5.1.1. Mevcut planlama sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

Üretim sistemleri itme ve çekme sistemleri olmak üzere iki temel yaklaşım üzerine kurgulanmıştır. İtme sistemi değişkenliği yönetmek için miktara bağlı çözümlere ihtiyaç duyar. Bu sistemde, taleplerdeki değişkenlik emniyet stoğuyla kontrol edilirken, üretimde oluşabilecek kalitesizlik, yeniden işlem ve arıza duruşlar yeniden çizelgeleme ve zaman toleranslarıyla çizelgeleme gibi yöntemlerle aşılmaya çalışılmaktadır. İtme sistemi her üretim yerleşimi ve yaklaşımına uygulanabilen bir sistem olmasına karşın oluşturduğu ek maliyet ve verimsizlikler itme sistemindeki bu unsurlardan arındırılmış bir sistem ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Kısıtlı alan ve kaynak ihtiyacına karşı geliştirilen çekme sistemleri ise stok tutmadan, sadece üretim ihtiyaçları kadar malzemenin üretim sistemine sürekli tedarikini ve akış hatlarıyla yüksek verimlilikte üretim yapmayı hedeflemektedir. Çekme sistemleri hedeflerine ulaşmalarına karşın her işletme koşullarında uygulanabilir sistemler değildir. Çünkü mali yapılabirlik açısından parti sipariş miktarı ile ekonomik sipariş miktarı eşit olmalıdır. Uygulanabilirliğin sağlanması için taşıma maliyetlerinin ve tedarik edilecek ürünün imalat ön süresinin düşük olması gerekmektedir. Taşıma maliyetini her zaman düşürmek mümkün olmamaktadır. Çünkü tüm tedarikçilerin yakın ve tedarik edilecek malzemenin kolay taşınabilen bir malzeme olması gerekmektedir. Fakat taşıma maliyetinin tüm işletmeler için uygun olacağı varsayılırsa malzemenin imalat ön süresinin düşürülmesi bu sistemi uygulanabilir hale getirecektir. Bunun için de tedarikçi firmalarda da çevrim süresi düşük olan akış hatlarının bulunması gerekmektedir. Akış hattı oluşturmak hem yüksek yatırım maliyeti hem de üretim hacmi (pazar büyüklüğü) açısından uygulanabilir olmadığında çekme sistemi makuliyetini kaybetmektedir. Çekme sistemini başarıyla uygulayan firmalar üretim hacmi büyük, zaman ve mali açıdan sistemin uygulanabilir olduğu firmalardır. Son yıllarda Seru üretimi ile çekme sistemlerinde hücreli imalat uygulanmaya başlandı. Fakat Seru küçük ürünler üzerinde uygulanmasına karşın yüksek üretim hacimlerinde uygulandığından, çekme sistemlerinde uygulanabilirlik açısından yakınlık ve yüksek üretim hacminin gerekliliğinin aksine bir durum görülememektedir.

5.1.2. Gerçek zamanlı sistemin avantaj ve dezavantajları

Zaman parametresi değişkenliklerden, miktara göre, daha az etkilenen bir parametre olduğu için gerçek zamanlı sistem değişkenliği itme sisteminden çok daha iyi yönetmektedir. Çekme sistemi sipariş verilmesiyle tedarik ve üretim sürecini başlattığı için değişkenliklerden etkilenmemektedir. Fakat bu sistemi her işletme için mali açıdan veya zaman açısından uygulanabilir değildir. Gerçek zamanlı planlama sistemi ise sadece belirli koşullarda verimli olan bir sistem değildir. Bundan dolayı gerçek zamanlı planlama sistemi tüm üretim sistemlerinde uygulanabilen ve sistemde değişkenliklerden ve belirsizliklerden kaynaklanan maliyeti ve verimsizliği en aza indiren bir sistemdir.

Gerçek zamanlı planlama sisteminin özelliği üzerine kurgulandığı zaman parametresi sayesinde dinamik çalışması ve çekme sistemi şartlarında üretim sistemini çekme sistemi olarak çalıştırması, itme sistemi şartlarında da üretim sistemini çekme sistemine benzerlik gösterecek biçimde çalıştırmasıdır. Çünkü gerçek zamanlı sistem dinamik çalışarak emniyet stoğu veya ekstra zaman toleransları kullanmamaktadır. Bu sayede itme sistemlerindeki verimsizlik ve maliyete katlanmamaktadır.

5.2. Gerçek Zamanlı Sistemin Performansı

Gerçek zamanlı üretim planlama sistemi emniyet stoğu tutmadan, tüketim hızı, tedarik süresi ve sipariş maliyetini dikkate alarak stok yönetimi yaptığı için itme sisteminden daha düşük maliyetle sürecin tamamlanmasını sağlamaktadır. Yapılan benzetim çalışmasında gerçek zamanlı üretim sisteminde oluşan toplam maliyet itme sisteminde oluşan maliyetin sadece %6'sı kadardır. Şekil 4.6.'da görülen toplam maliyet sipariş miktarı, talebin sapması, ortalama sipariş geliş süresi gibi toplam sipariş miktarını değiştiren etkenlerden etkilenmemiştir. Tedarik ön süresinin artması daha uzun sürede stok tutmayı gerektireceğinden, sipariş maliyeti ile stok tutma maliyeti arasındaki denge korunarak toplam maliyette bir miktar artış olmuştur. Fakat Şekil 4.6.'da görünen dört grafikte de gerçek zamanlı sistemin toplam maliyeti sıfıra yakın bir eğimle değişmektedir.

Üretim yönetiminde zaman hedefleri gecikmeyi engellemeye yönelik konulduğundan, gecikecek olan işler önceliklendirilerek tamamlanmaya çalışılmaktadır. Bundan dolayı, işleri termin tarihine yakın zamanlarda bitirmek için önceliklendirme yapan bir gerçek zamanlı iş sıralama kuralı geliştirilmiştir. Tüm işlerin termin tarihleri sıfır olarak ayarlandığında işlerin bitişi sıfıra yaklaştırılmaya çalışılacağından, model en iyileme yapmaya çalışmaktadır. Modelin çizelgeleme performansının anlaşılması için, model Şekil 4.11.'de görülen veri setleriyle çalıştırılmıştır. Model en kısa gevşek zaman ve geliş sırasına göre üretim stratejilerinin neredeyse yarısı kadar bir sürede işleri tamamlamış, optimal çözümlerden ise ortalama %15 daha kötü performans sergilemiştir. Bir veri setinde ise optimal sonucu bulmuştur. Model hem üretim yönetiminde hem de stok yönetiminde iyileştirme yaparken $O(n)$ zaman karmaşıklığındaki algoritmalarla, kısa sürede sonuca ulaşılmasını sağlamaktadır. Buna karşın çizelgelemede optimallik garantisi verememektedir.

5.3. Önerilen Modelin Katkısı Ve Gelecek Çalışma

Gerçek zamanlı planlama sistemi zamanı temel aldığı için dönem içerisindeki maliyet ve üretimin tamamlanma süresi gibi parametreleri iyileştirmeye çalışmaktadır. Gerçek zamanlı sistem dönem içerisindeki değişkenliklerden ve belirsizliklerden etkilenmeden en uygun kararların verilmesinde ve tüm üretim sistemlerini çekme sistemi karakterine uygun olarak çalıştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bundan dolayı itme ve çekme sisteminin bir alternatifi olarak her iki sistem gibi davranabilen gerçek zamanlı planlama modeli geliştirilmiş ve bilimsel literatüre sunulmuştur.

Modelde stok yönetimi ve üretim yönetimi ele alınmış, fakat lojistiğe değinilmemiştir. Bundan dolayı, gerçek zamanlı lojistik yönetimi modele eklenmesi düşünülen bir unsurdur. Modelde ele alınan stoğun tükenmesine kalan süre ve üretimin tamamlanmasına kalan süre normal dağılıma uygun olarak hesaplanmıştır. Sistemin başka dağılımlara uymasına karşın, elde edilen denklemler Weibull dağılımına uygun olarak yeniden düzenlenecektir.

KAYNAKLAR

- Adamson, R. vd. (2017) “Integrated real-time production scheduling of a multiple cryogenic air separation unit and compressor plant”, *Computers and Chemical Engineering*, 104, ss. 25–37. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.04.001.
- Akbalik, A. ve Rapine, C. (2013) “The single item uncapacitated lot-sizing problem with time-dependent batch sizes: NP-hard and polynomial cases”, *European Journal of Operational Research*, 229(2), ss. 353–363. doi: 10.1016/j.ejor.2013.02.052.
- Almeder, C. vd. (2015) “Lead time considerations for the multi-level capacitated lot-sizing problem”, *European Journal of Operational Research*, 241(3), ss. 727–738. doi: 10.1016/j.ejor.2014.09.030.
- Bastani, K., Rao, P. K. ve Kong, Z. (2016) “An online sparse estimation-based classification approach for real-time monitoring in advanced manufacturing processes from heterogeneous sensor data”, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 48(7), ss. 579–598. doi: 10.1080/0740817X.2015.1122254.
- Başak, Ö. ve Albayrak, Y. E. (2014) “Petri net based decision system modeling in real-time scheduling and control of flexible automotive manufacturing systems”, *Computers & Industrial Engineering*, 86, ss. 116–126. doi: 10.1016/j.cie.2014.09.024.
- Beullens, P. (2014) “Revisiting foundations in lot sizing—Connections between Harris, Crowther, Monahan, and Clark”, *International Journal of Production Economics*, 155, ss. 68–81. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.04.010.
- Brown, H. M. vd. (2011) “Development of the ElarmS methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2), ss. 188–200. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.03.008.
- Brown, S. ve Vondráček, P. (2013) “Implementing time-based manufacturing practices in pharmaceutical preparation manufacturers”, *Production Planning and Control*, ss. 28–46. doi: 10.1080/09537287.2011.598267.

- Brundage, M. P. vd. (2016) “Implementing a Real-Time, Energy-Efficient Control Methodology to Maximize Manufacturing Profits”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 46(6), ss. 855–866. doi: 10.1109/TSMC.2015.2450679.
- Buttazzo, G., Velasco, M. ve Martí, P. (2007) “Quality-of-control management in overloaded real-time systems”, *IEEE Transactions on Computers*, 56(2), ss. 253–266. doi: 10.1109/TC.2007.34.
- Cárdenas-Barrón, L. E., González-Velarde, J. L. ve Treviño-Garza, G. (2015) “A new approach to solve the multi-product multi-period inventory lot sizing with supplier selection problem”, *Computers & Operations Research*, 64, ss. 225–232. doi: 10.1016/j.cor.2015.06.008.
- Carlson, J. G. H. ve Yao, A. C. (2008) “Simulating an agile, synchronized manufacturing system”, *International Journal of Production Economics*, 112(2), ss. 714–722. doi: 10.1016/j.ijpe.2007.06.008.
- Chatfield, D. C. ve Pritchard, A. M. (2013) “Returns and the bullwhip effect”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), ss. 159–175. doi: 10.1016/j.tre.2012.08.004.
- Choudhary, D. ve Shankar, R. (2011) “Modeling and analysis of single item multi-period procurement lot-sizing problem considering rejections and late deliveries”, *Computers & Industrial Engineering*, 61(4), ss. 1318–1323. doi: 10.1016/j.cie.2011.08.005.
- Collart-Dutilleul, S. vd. (2013) “Active robustness of a milk manufacturing workshop with time constraints”, *International Journal of Production Research*, 51(1), ss. 9–25. doi: 10.1080/00207543.2011.640713.
- Dai, Q., * G. Q. H. ve , Ting Qu, T. Z. and T. Y. L. (2012) “Radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system: a case study in an automative part manufacturer.pdf”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(1), ss. 51–65. doi: 10.1080/0951192X.2011.562546.
- Deng, Y., Wang, J. ve Zhou, M. (2004) “Consistency verification in modeling of real-time systems”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(1), ss. 136–142. doi: 10.1109/TRA.2003.819737.
- Dotoli, M. ve Fanti, M. P. (2004) “Coloured timed Petri net model for real-time control of automated guided vehicle systems”, *International Journal of Production Research*, 42(9), ss. 1787–1814. doi: 10.1080/00207540410001661364.

- Emde, S. ve Boysen, N. (2012) “Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines”, *European Journal of Operational Research*, 217(2), ss. 287–299. doi: 10.1016/j.ejor.2011.09.013.
- Esmacilian, B., Behdad, S. ve Wang, B. (2016) “The evolution and future of manufacturing: A review”, *Journal of Manufacturing Systems*, ss. 79–100. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.03.001.
- Fan, M., Han, Q. ve Yang, X. (2017) “Energy minimization for on-line real-time scheduling with reliability awareness”, *Journal of Systems and Software*, 127, ss. 168–176. doi: 10.1016/j.jss.2017.02.004.
- Filho, M. G. ve Uzsoy, R. (2013) “The impact of simultaneous continuous improvement in setup time and repair time on manufacturing cycle times under uncertain conditions”, *International Journal of Production Research*, 51(2), ss. 447–464. doi: 10.1080/00207543.2011.652261.
- Framinan, J. M. ve Perez-Gonzalez, P. (2017) “The 2-stage assembly flowshop scheduling problem with total completion time: Efficient constructive heuristic and metaheuristic”, *Computers and Operations Research*, 88, ss. 237–246. doi: 10.1016/j.cor.2017.07.012.
- Geiger, M. J. (2012) “Test Instances for the Flexible Job Shop Scheduling Problem with Work Centers”, *Helmut-Schmidt-Universität*, ISSN: 2192-0826.
- Ghimire, S. vd. (2016) “IoT based situational awareness framework for real-time project management”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 3052(June), ss. 1–10. doi: 10.1080/0951192X.2015.1130242.
- Gong, J., Prabhu, V. V. ve Liu, W. (2011) “Simulation-based performance comparison between assembly lines and assembly cells with real-time distributed arrival time control system”, *International Journal of Production Research*, 49(5), ss. 1241–1253. doi: 10.1080/00207543.2010.518733.
- Groover, M. P., (2008) “Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing”, New Jersey: Pearson Education Inc., ISBN: 0-13-239321-2
- Ham, M., Lee, Y. H. ve Kim, S. H. (2011) “Real-time scheduling of multi-stage flexible job shop floor”, *International Journal of Production Research*, 49(12), ss. 3715–3730. doi: 10.1080/00207543.2010.492797.
- Hong, J., Prabhu, V. ve Wisk, R. (2001) “Real-time batch sequencing using arrival time control algorithm”, *International Journal of Production Research*, 39(17), ss. 3863–3880. doi: 10.1080/00207540110071778.

- Huang, G. Q. vd. (2009) “Agent-based workflow management for RFID-enabled real-time reconfigurable manufacturing”, içinde Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing, ss. 341–364. doi: 10.1007/978-1-84882-287-0_14.
- Hung, Y. F., Huang, C. C. ve Yeh, Y. (2013) “Real-time capacity requirement planning for make-to-order manufacturing with variable time-window orders”, Computers and Industrial Engineering, 64(2), ss. 641–652. doi: 10.1016/j.cie.2012.11.003.
- Iwamura, K. vd. (2006) “Real-time scheduling for holonic manufacturing systems based on estimation of future status”, içinde International Journal of Production Research, ss. 3657–3675. doi: 10.1080/00207540600847129.
- Jeong, Y. S. vd. (2010) “Performance evaluation with DEVS formalism and implementation of active emergency call system for realtime location and monitoring”, Simulation Modelling Practice and Theory, 18(4), ss. 416–430. doi: 10.1016/j.simpat.2009.09.006.
- Ji, M. vd. (2014) “Group scheduling and job-dependent due window assignment based on a common flow allowance”, Computers and Industrial Engineering, 68(1), ss. 35–41. doi: 10.1016/j.cie.2013.11.017.
- Khodke, P. M. ve Bhongade, A. S. (2013) “Real-time scheduling in manufacturing system with machining and assembly operations: A state of art”, International Journal of Production Research, 51(16), ss. 4966–4978. doi: 10.1080/00207543.2013.784414.
- Kim, S., Meng, C. ve Son, Y. J. (2017) “Simulation-based machine shop operations scheduling system for energy cost reduction”, Simulation Modelling Practice and Theory, 77, ss. 68–83. doi: 10.1016/j.simpat.2017.05.007.
- Kuhn, H. ve Liske, T. (2014) “An exact algorithm for solving the economic lot and supply scheduling problem using a power-of-two policy”, Computers & Operations Research, 51, ss. 30–40. doi: 10.1016/j.cor.2014.04.012.
- Kusiak, A. (2017) “Smart manufacturing”, International Journal of Production Research, ss. 1–10. doi: 10.1080/00207543.2017.1351644.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V. ve Whang, S. (1997) “Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect”, Management Science, 43(4), ss. 546–558. doi: 10.1287/mnsc.43.4.546.
- Lee, H. L., So, K. C. ve Tang, C. S. (2000) “The Value of Information Sharing in a Two-Level Supply Chain”, Management Science, 46(5), ss. 626–643. doi: 10.1287/mnsc.46.5.626.12047.

- Lee, J.-H. ve Kim, C.-O. (2008) “Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: a review paper”, *International Journal of Production Research*, 46(1), ss. 233–265. doi: 10.1080/00207540701441921.
- Lee, Y. F., Jiang, Z. B. ve Liu, H. R. (2009) “Multiple-objective scheduling and real-time dispatching for the semiconductor manufacturing system”, *Computers and Operations Research*, 36(3), ss. 866–884. doi: 10.1016/j.cor.2007.11.006.
- Li, L. vd. (2009) “Real time production improvement through bottleneck control”, *International Journal of Production Research*, 47(21), ss. 6145–6158. doi: 10.1080/00207540802244240.
- Li, Y. C. ve Hong, S. H. (2017) “Real-Time Demand Bidding for Energy Management in Discrete Manufacturing Facilities”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), ss. 739–749. doi: 10.1109/TIE.2016.2599479.
- Lim, S. Y. vd. (2014) “A real-time scheduling method for the cluster tool with wafer transfer delay”, *International Journal of Production Research*, 52(4), ss. 934–946. doi: 10.1080/00207543.2013.808774.
- Liu, H., Jiang, Z. ve Fung, R. Y. K. (2007) “The infrastructure of the timed EOPNs-based multiple-objective real-time scheduling system for 300 mm wafer fab”, *International Journal of Production Research*, 45(21), ss. 5017–5056. doi: 10.1080/00207540600595793.
- Liu, W. N. vd. (2012) “RFID-enabled real-time production management system for Loncin motorcycle assembly line”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(1), ss. 86–99. doi: 10.1080/0951192X.2010.523846.
- Lu, Y. Y., Wang, J. J. ve Wang, J. B. (2014) “Single machine group scheduling with decreasing time-dependent processing times subject to release dates”, *Applied Mathematics and Computation*, 234, ss. 286–292. doi: 10.1016/j.amc.2014.01.168.
- Luo, H., Fang, J. ve Huang, G. Q. (2015) “Real-time scheduling for hybrid flowshop in ubiquitous manufacturing environment”, *Computers and Industrial Engineering*, 84, ss. 12–23. doi: 10.1016/j.cie.2014.09.019.
- Mani, M. vd. (2017) “A review on measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes”, *International Journal of Production Research*, ss. 1400–1418. doi: 10.1080/00207543.2016.1223378.

- Mazdeh, M. M., Emadikhiav, M. ve Parsa, I. (2015) “A heuristic to solve the dynamic lot sizing problem with supplier selection and quantity discounts”, *Computers and Industrial Engineering*, 85, ss. 33–43. doi: 10.1016/j.cie.2015.02.027.
- Meyyappan, L. vd. (2008) “A wasp-based control model for real-time routing of parts in a flexible manufacturing system”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(3), ss. 259–268. doi: 10.1080/09511920701268874.
- Monostori, L. vd. (2009) “Real-time, cooperative enterprises for customised mass production”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(1), ss. 55–68. doi: 10.1080/09511920802369324.
- Mousavi, A. ve Siervo, H. R. A. (2017) “Automatic translation of plant data into management performance metrics: a case for real-time and predictive production control”, *International Journal of Production Research*, 55(17), ss. 4862–4877. doi: 10.1080/00207543.2016.1265682.
- Niu, L. ve Zhu, D. (2017) “Reliability-aware scheduling for reducing system-wide energy consumption for weakly hard real-time systems”, *Journal of Systems Architecture*, 78, ss. 30–54. doi: 10.1016/j.sysarc.2017.06.004.
- Nyström, R. H. vd. (2005) “Production campaign planning including grade transition sequencing and dynamic optimization”, *Computers and Chemical Engineering*, 29(10), ss. 2163–2179. doi: 10.1016/j.compchemeng.2005.07.006.
- Önal, M., van den Heuvel, W. ve Liu, T. (2012) A note on “The economic lot sizing problem with inventory bounds”, *European Journal of Operational Research*. doi: 10.1016/j.ejor.2012.05.019.
- Pach, C. vd. (2015) “Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling: A Potential Fields model”, *Control Engineering Practice*, 44, ss. 193–208. doi: 10.1016/j.conengprac.2015.08.003.
- Park, S., Kim, J.-H. ve Fox, G. (2014) “Effective real-time scheduling algorithm for cyber physical systems society”, *Future Generation Computer Systems*, 32, ss. 253–259. doi: 10.1016/j.future.2013.10.003.
- Parsopoulos, K. E., Konstantaras, I. ve Skouri, K. (2015) “Metaheuristic optimization for the Single-Item Dynamic Lot Sizing problem with returns and remanufacturing”, *Computers and Industrial Engineering*, 83, ss. 307–315. doi: 10.1016/j.cie.2015.02.014.

- Pentico, D. W. ve Drake, M. J. (2011) “A survey of deterministic models for the EOQ and EPQ with partial backordering”, *European Journal of Operational Research*, 214(2), ss. 179–198. doi: 10.1016/j.ejor.2011.01.048.
- Prabhu, V. V. (2000) “Performance of real-time distributed arrival time control in heterarchical manufacturing systems”, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 32(4), ss. 323–331. doi: 10.1080/07408170008963910.
- Prince, J. ve Kay, J. M. (2003) “Combining lean and agile characteristics: Creation of virtual groups by enhanced production flow analysis”, içinde *International Journal of Production Economics*, ss. 305–318. doi: 10.1016/S0925-5273(03)00118-X.
- Qiao, Y., Wu, N. Q. ve Zhou, M. C. (2012) “Petri net-based real-time scheduling of time-constrained single-arm cluster tools with activity time variation”, içinde *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ss. 5056–5061. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225022.
- Qiu, R. G. (2003) “E-manufacturing: The keystone of a plant-wide real time information system”, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 20(3), ss. 266–274. doi: 10.1080/10170660309509235.
- Quintiq. (2018) “FJSSP World Records”, *Flexible Jobshop Scheduling Problem*: <https://www.quintiq.com/optimization/flexible-job-shop-scheduling-problem-results.html>
- Rabin, S. (2003) “The real-time enterprise, the real-time supply chain”, *Information Systems Management*, 20(2), ss. 58–62. doi: 10.1201/1078/43204.20.2.20030301/41471.9.
- Raman, N. ve Shaw, M. J. (1997) “Adaptive scheduling in dynamic flexible manufacturing systems: a dynamic rule selection approach”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(4), ss. 486–502. doi: 10.1109/70.611301.
- Roychowdhury, S., Allen, T. T. ve Allen, N. B. (2017) “A genetic algorithm with an earliest due date encoding for scheduling automotive stamping operations”, *Computers and Industrial Engineering*, 105, ss. 201–209. doi: 10.1016/j.cie.2017.01.007.
- Shiue, Y. R., Guh, R. S. ve Lee, K. C. (2011) “Study of SOM-based intelligent multi-controller for real-time scheduling”, *Applied Soft Computing Journal*, 11(8), ss. 4569–4580. doi: 10.1016/j.asoc.2011.07.022.

- Sifaleras, A. ve Konstantaras, I. (2017) “Variable neighborhood descent heuristic for solving reverse logistics multi-item dynamic lot-sizing problems”, *Computers and Operations Research*, 78, ss. 385–392. doi: 10.1016/j.cor.2015.10.004.
- Sodhi, M. S., Sodhi, N. S. ve Tang, C. S. (2014) “An EOQ model for MRO customers under stochastic price to quantify bullwhip effect for the manufacturer”, *International Journal of Production Economics*, 155, ss. 132–142. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.12.020.
- Sunny, S. M. N. Al, Liu, X. F. ve Shahriar, M. R. (2017) “Communication method for manufacturing services in a cyber–physical manufacturing cloud”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, ss. 1–17. doi: 10.1080/0951192X.2017.1407446.
- Tai, T. ve Boucher, T. O. (2002) “An Architecture for Scheduling and Control in Flexible Manufacturing Systems Using Distributed Objects.”, *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 18(4), s. 452. Available at: <http://w3.bgu.ac.il/lib/customproxy.php?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=8593334&site=eds-live&authtype=ip,uid&custid=s4309548&groupid=main&profile=eds>.
- Tempelmeier, H. ve Hilger, T. (2015) “Linear programming models for a stochastic dynamic capacitated lot sizing problem”, *Computers & Operations Research*, 59, ss. 119–125. doi: 10.1016/j.cor.2015.01.007.
- Torkul, O., Yılmaz, R., Selvi, İ.H., Cesur, M.R. (2016) “A real-time inventory model to manage variance of demand for decreasing inventory holding cost”, *Computers & Industrial Engineering*, 102, ss. 435–439, ISSN: 0360-8352, doi: 10.1016/j.cie.2016.04.020
- Tunc, H. vd. (2016) “The stochastic lot sizing problem with piecewise linear concave ordering costs”, *Computers & Operations Research*, 65, ss. 104–110. doi: 10.1016/j.cor.2015.07.004.
- Villa, A., Taurino, T. (2013), “From JIT to Seru, for a Production as Lean as Possible”, *Procedia Engineering*, 63, ss. 956–965, ISSN: 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2013.08.172.
- Wang, M. L. vd. (2012) “A radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system for one-of-a-kind production manufacturing: A case study in mould industry”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(1), ss. 20–34. doi: 10.1080/0951192X.2011.575183.
- Wang, W. vd. (2018) “IoT-enabled real-time energy efficiency optimisation method for energy-intensive manufacturing enterprises”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(4–5), ss. 362–379. doi: 10.1080/0951192X.2017.1337929.

- Watson, H. J. vd. (2006) "Real-Time business intelligence: Best practices at continental airlines", *Information Systems Management*, 23(1), ss. 7–18. doi: 10.1201/1078.10580530/45769.23.1.20061201/91768.2.
- Weng, W., Wei, X. ve Fujimura, S. (2012) "Dynamic routing strategies for JIT production in hybrid flow shops", *Computers & Operations Research*, 39(12), ss. 3316–3324. doi: 10.1016/j.cor.2012.04.022.
- Wiklund, H. (1999) "A statistical approach to real-time quality control", *International Journal of Production Research*, 37(18), ss. 4141–4155. doi: 10.1080/002075499189709.
- Wu, N. Q. ve Zhou, M. (2012) "Modeling, analysis and control of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation based on Petri nets", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(2), ss. 446–454. doi: 10.1109/TASE.2011.2178023.
- Wu, N. Q. ve Zhou, M. C. (2012) "Schedulability analysis and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(1), ss. 203–209. doi: 10.1109/TASE.2011.2160452.
- Xu, W. vd. (2016) "Perception data-driven optimization of manufacturing equipment service scheduling in sustainable manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, 41, ss. 86–101. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.08.001.
- Zhang, Y., Qu, T., Ho, O. K., vd. (2011) "Agent-based Smart Gateway for RFID-enabled real-time wireless manufacturing", *International Journal of Production Research*, 49(5), ss. 1337–1352. doi: 10.1080/00207543.2010.518743.
- Zhang, Y., Qu, T., Ho, O., vd. (2011) "Real-time work-in-progress management for smart object-enabled ubiquitous shop-floor environment", içinde *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, ss. 431–445. doi: 10.1080/0951192X.2010.527374.
- Zhang, Y. vd. (2014) "Multi-agent based real-time production scheduling method for radio frequency identification enabled ubiquitous shopfloor environment", *Computers and Industrial Engineering*, 76(1), ss. 89–97. doi: 10.1016/j.cie.2014.07.011.
- Zhang, Y. vd. (2015) "Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(8), ss. 811–822. doi: 10.1080/0951192X.2014.900874.

- Zhong, R. Y. vd. (2013) “RFID-enabled real-time advanced planning and scheduling shell for production decision making”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(7), ss. 649–662. doi: 10.1080/0951192X.2012.749532.
- Zhong, R. Y. vd. (2015) “A two-level advanced production planning and scheduling model for RFID-enabled ubiquitous manufacturing”, *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), ss. 799–812. doi: 10.1016/j.aei.2015.01.002.
- Zhou, J. vd. (2016) “A real-time computer vision-based platform for fabric inspection part 2: platform design and real-time implementation”, *The Journal of The Textile Institute. Taylor & Francis*, 107(2), ss. 264–272. doi: 10.1080/00405000.2015.1025559.
- Zhuming Bi, Li Da Xu ve Chengen Wang (2014) “Internet of Things for Enterprise Systems of Modern Manufacturing”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), ss. 1537–1546. doi: 10.1109/TII.2014.2300338.
- Zuo, K. ve Wu, W. T. (2000) “Semi-realtime optimization and control of a fed-batch fermentation system”, *Computers and Chemical Engineering*, 24(2–7), ss. 1105–1109. doi: 10.1016/S0098-1354(00)00490-7.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Raşit Cesur, 04.09.1987’de İzmir’de doğdu. İlköğrenimini Banaz Atatürk İlkokulu’nda ve Banaz Şehitler İlköğretim okullarında aldı. Ortaöğrenimi Uşak Şehit Abdülkadir Kılavuz Anadolu Öğretmen Lisesi’nde 2005 yılında tamamladı. 2005 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünü 2010 yılında bitirdi. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisansı Ocak 2013’te bitirdi ve aynı bölümde doktora başladı. 2010 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Aynı zamanda 2014 yılında kurucu ortağı olduğu Arvavis Bilişim A.Ş.’de Genel Müdür Yardımcısı olarak görev yapmaya başlamıştır.