

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALZEME TİPİ FARKLI ÜRÜNLERİN EKLEMELİ İMALAT
MAKİNASINDA ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI**

**Hazırlayan
Gülhan TOĞA**

**Danışman
Prof. Dr. M. Duran TOKSARI**

Doktora Tezi

**Haziran 2022
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALZEME TİPİ FARKLI ÜRÜNLERİN EKLEMELİ İMALAT
MAKİNASINDA ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI**

(Doktora Tezi)

**Hazırlayan
Gülhan TOĞA**

**Danışman
Prof. Dr. M. Duran TOKSARI**

**Haziran 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Gülhan TOĞA

“Malzeme Tipi Farklı Ürünlerin Eklemeli İmalat Makinasında Çizelgeleme Problemi için Çözüm Yaklaşımları” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Gülhan TOĞA

Danışman

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

Endüstri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Lale ÖZBAKIR

İmza

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, bana güvenen, yardımlarını esirgemeyen ve kendimi geliştirmemde büyük katkısı olan Sayın hocam Prof. Dr. M. Duran TOKSARI'ya ve desteğini her zaman hissettiğim kıymetli hocam Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca; her zaman beni cesaretlendirerek ilerlememe yardımcı olan sevgili eşim Mehmet TOĞA'ya hoşgörüsü ve desteği için yürekten teşekkür ederim. Varlıkları ile hayatımı anlamlandıran sevgili kızlarım Zeynep Rana, Ayşe Erva ve Fatma Begüm'e, bugünlere gelmemde çok emekleri olan ve her zaman yanımda olan annem Selime PALA'ya ve babam Mevlüt PALA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Dostluklarını, yardımlarını ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili dostlarım Dr. Hatice KAVUNCUOĞLU, Dr. Aslı DURMUŞOĞLU ve Dr. Tuğba DURSUN ÇAPAR'a ve yardımları ile tezime katkısından dolayı Dr. Burak GÜLMEZ'e teşekkür ederim.

Gülhan TOĞA

Kayseri, Haziran 2022

MALZEME TİPİ FARKLI ÜRÜNLERİN EKLEMELİ İMALAT MAKİNASINDA ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Gülhan TOĞA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Haziran 2022
Danışman: Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

ÖZET

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi, yüksek geometrik karmaşıklığa sahip parçaları minimum israfla ekonomik olarak üretebilme özelliği sayesinde üretim dünyasında çığır açan bir devrim olmuştur. Eİ teknolojisi, kullanıcılara üretim aşamasında farklı malzemelerle düşük hacimlerde, üstün kalitede ve benzersiz ürünler üretme fırsatı sunmaktadır. Ancak, farklı malzemelerin aynı Eİ makinasında kullanımı, malzeme değişiminden kaynaklı ilave maliyetlerin oluşması, ilave hazırlık sürelerine ihtiyaç duyulması ya da kontaminasyon problemleri gibi bazı sorunlara neden olmaktadır. Eİ makinalarında, üretim maliyetlerinin yüksekliği nedeni ile etkin kullanım için uygun iş çizelgelerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, farklı malzemelerden oluşan siparişlerin tek Eİ makinasında çizelgenerek, siparişler için en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, problemin çözümü için tam sayılı bir doğrusal programlama (TSDP) modeli önerilmiş ve büyük boyutlu problemlere çözüm sağlamak için Python programlama dili kullanılarak Tavlama Benzetimi (TB) algoritması kodlanmıştır. Geliştirilen algoritma sayesinde büyük boyutlu problemler için daha kısa sürede iş çizelgeleri oluşturulabilmektedir. Performans parametreleri incelendiğinde, geliştirilen algoritmanın matematiksel modele göre çok daha hızlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Matematiksel model ile elde edilen optimum sonuçların tamamı TB algoritması ile de elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat Teknolojisi, Çizelgeleme, Tavlama Benzetimi Algoritması, Tam Sayılı Doğrusal Programlama

SCHEDULING PROBLEM OF PRODUCTS WITH DIFFERENT MATERIAL TYPE IN AN ADDITIVE MANUFACTURING MACHINE

Gülhan TOĞA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, June 2022

Advisor: Prof. Dr. M. Duran TOKSARI

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has been a breakthrough revolution in the manufacturing world due to the ability to economically print parts with high geometric complexity and minimal vast. AM technology offers users the opportunity to produce low volumes, superior quality, and unique products with different materials at the production stage. However, some problems arise with the usage of multi-materials in AM machines. Some of these problems are additional costs due to material replacement, the need for additional set up times or contamination problems. Although AM is a technology that has started to be used widely, production with AM machines is still more costly than other production technologies. Therefore, it is necessary to create an efficient job schedule for the effective use of these machines. In this thesis, it is aimed to minimize the maximum completion time of orders consisting of different materials by scheduling them in a single AM machine. For this purpose, an integer linear programming model that minimizes the maximum completion time is developed. In addition, the Simulated Annealing (SA) algorithm is coded using Python programming language for solving large-scale problems. As a result of the developed algorithm, job schedules can be created quickly for large-scale problems. When the performance parameters are examined, it is seen that the developed algorithm gives very fast results compared to the mathematical model. All the optimum results obtained with the mathematical model are also obtained with the SA algorithm.

Keywords: Additive Manufacturing Technology, Scheduling, Simulated Annealing Algorithm, Integer Linear Programming

İÇİNDEKİLER

MALZEME TİPİ FARKLI ÜRÜNLERİN EKLEMELİ İMALAT MAKİNASINDA ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	viii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI	7
---------------------------	---

2.BÖLÜM

PROBLEM İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

2.1. Farklı Malzemeler İçeren Siparişlerin Tek Eİ Makinasında Çizelgelenmesi için Geliştirilen Matematiksel Model	11
2.2. Test Verileri İçin Sonuçlar	19
2.2.1. $set_i = 0.3$ saat	20
2.2.2 $set_i = 0.9$ saat	22
2.2.3. $set_i = \varphi$ saat.....	24

3.BÖLÜM

PROBLEM İÇİN GELİŞTİRİLEN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI

3.1 Farklı Malzemeler İçeren Siparişlerin Tek Eİ Makinasında Çizelgelenmesi için Geliştirilen TB Algoritması	27
3.1.1. Maliyet fonksiyonu	29
3.1.2. Başlangıç çözümü fonksiyonu.....	30
3.1.3. Komşu çözüm oluşturma fonksiyonu.....	31
3.1.4. Tavlama Benzetimi algoritması	33
3.2. Taguchi deney tasarımı sonuçları.....	36
3.2.2. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları.....	39
3.2.3.2 malzeme- φ hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları	42
3.2.4. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları.....	45
3.2.5. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları.....	48
3.2.6. 3 malzeme- φ hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları	51
3.3.Tavlama Benzetimi Algoritması için Nümerik Örnek.....	57
3.4. TB algoritmasının sonuçlarının istatistiksel analizi.....	60

4.BÖLÜM

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	63
KAYNAKÇA	66
EKLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	112

KISALTMALAR

ASTM F42	American Society for Testing and Materials
AHP	Analitik Hiyerarşı Prosesi
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
DIW	Direct Ink Writing
DLP	Dijital Light Processing
Eİ	Eklemeli İmalat
FDM	Fused Deposition Modelling
GA	Genetik Algoritma
ME	Material Extrusion
PBF	Powder Bed Fusion
SA	Simulated Annealing
SLA	Steorolitografi
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language
TA	Tabu Arama
TB	Tavlama Benzetimi
TSDP	Tam Sayılı Doğrusal Programlama

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Siparişlerin özellikleri.....	18
Tablo 2. Farklı senaryolara ait TSDP modeli sonuçları.....	23
Tablo 3. 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait <i>Cmaks</i> ve hesaplama süreleri için Wilcoxon test sonuçları	26
Tablo 4. L9 Taguchi ortogonal deney seti	35
Tablo 5. Dönüştürülmüş Taguchi deney seti.....	35
Tablo 6. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu	36
Tablo 7. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu.....	37
Tablo 8. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu.....	38
Tablo 9. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu	40
Tablo 10. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu	40
Tablo 11. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu	41
Tablo 12. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu.....	42
Tablo 13. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu.....	43
Tablo 14. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu.....	44
Tablo 15. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu	46
Tablo 16. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu	46
Tablo 17. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart Sapmalar için yanıt tablosu.....	47
Tablo 18. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu	49
Tablo 19. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu.....	49
Tablo 20. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu.....	50
Tablo 21. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait <i>S/N</i> oranı için yanıt tablosu.....	52
Tablo 22. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu.....	52
Tablo 23. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu.....	53
Tablo 24.Taguchi analizine göre parametrelerin önem sıralamaları.....	54
Tablo 25. Taguchi analizine göre parametrelerin optimum seviyeleri	55
Tablo 26. Optimum parametre seviyelerine göre TB algoritmasına ait <i>Cmaks</i> ortalama ve ortalama hesaplama süresi değerleri	56
Tablo 27. Sayısal örneğe ait veri seti	57

Tablo 28. 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait C_{maks_ort} ve hesaplama süresi için Wilcoxon test sonuçları.....	61
Tablo 29. 25 ve 46 iş için 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait C_{maks_ort} ve ortalama hesaplama süreleri.....	62
Tablo 30. TB ile TSDP modelinin en büyük tamamlanma zamanları açısından kıyaslanması.....	64
Tablo 31.TB ile TSDP modelinin hesaplama süreleri açısından kıyaslanması	64



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Eİ'nin ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması	2
Şekil 2. Tek eklemeli imalat makinası için geliştirilen model	13
Şekil 3. Gantt şeması	19
Şekil 4. j_n için üst sınır belirlemenin hesaplama süresi üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 5. $seti = 0.3$ (sa.) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.)	21
Şekil 6. $seti = 0.3$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlama zamanları (sa.).....	21
Şekil 7. $seti = 0.9$ (sa.) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.)	22
Şekil 8. $seti = 0.9$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlanma zamanları (sa.).....	22
Şekil 9. $seti = \varphi$ (sa) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.).....	25
Şekil 10. $seti = \varphi$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlanma zamanları (sa).....	26
Şekil 11. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	37
Şekil 12. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği	38
Şekil 13. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği.....	39
Şekil 14. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	40
Şekil 15. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği	41
Şekil 16. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği	42
Şekil 17. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	43
Şekil 18. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki diyagramı.....	44
Şekil 19. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki diyagramı	45
Şekil 20. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	46
Şekil 21. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği	47
Şekil 22. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği	48
Şekil 23. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	49
Şekil 24. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği	50
Şekil 25. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart Sapmalar için ana etki grafiği.....	51

<i>Şekil 26.</i> 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği	52
<i>Şekil 27.</i> 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği.....	53
<i>Şekil 28.</i> 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği.....	54

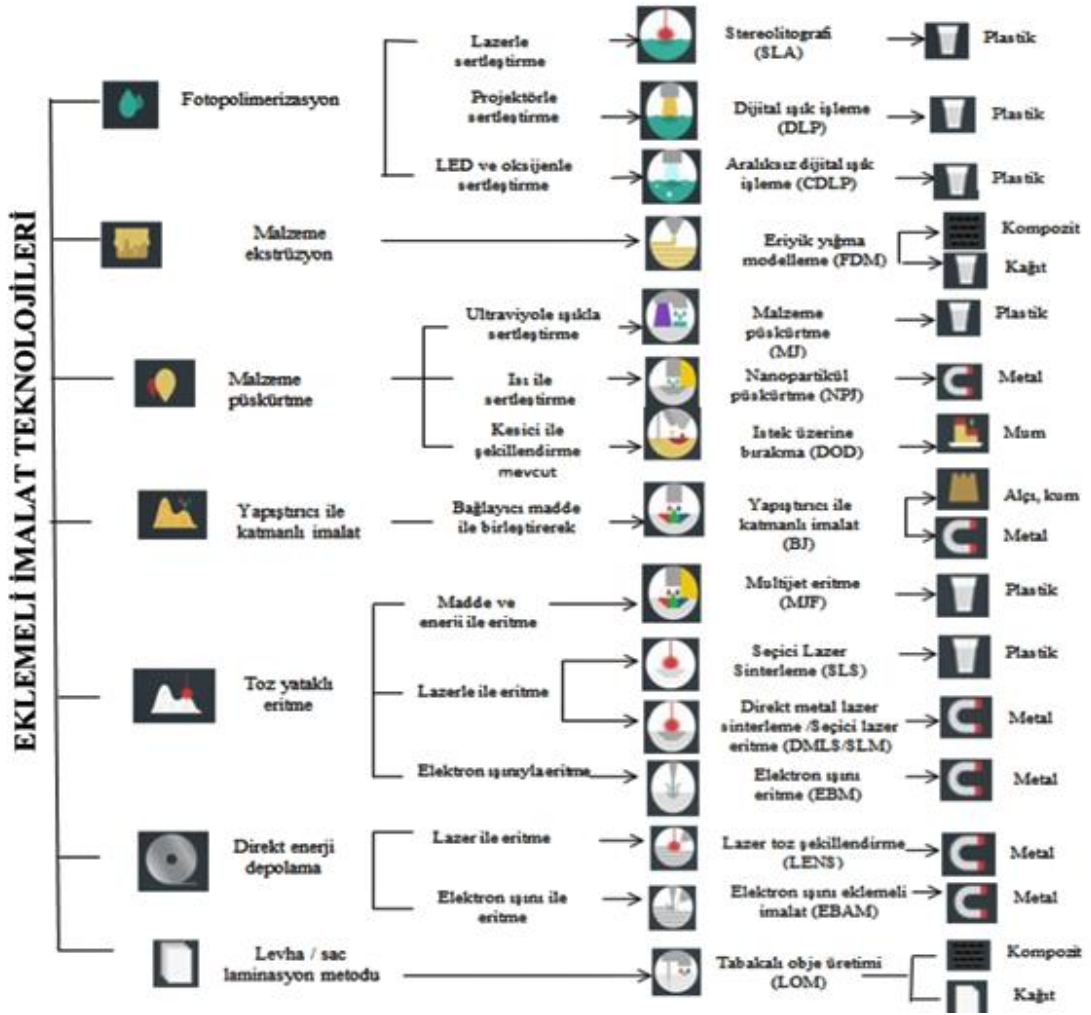


GİRİŞ

Eklemeli İmalat (Eİ) veya 3 boyutlu baskı teknolojisi, geleneksel imalat yöntemlerinin aksine üretilmek istenen parçaların ham maddelerinin kullanılan teknolojiye bağlı olarak üst üste eklenmesi ve birleştirilmesi koşulu ile oluşturulduğu yönetime denilmektedir [1]. Bu teknoloji sayesinde kullanıcılar, oldukça düşük hacimli karmaşık geometrik tasarıma sahip parçaları, plastikten metale kadar çok çeşitli hammaddelerle, nerede ise sıfıra yakın malzeme israfı ile kolaylıkla üretebilmektedir. Eİ'nin gelişimsel süreci incelenecek olursa, 1980'li yıllarda ortaya çıkan hızlı prototipleme (rapid prototyping) teknolojisi, bilgisayar destekli tasarımlar (BDT) aracılığı ile 3 boyutlu nesnelere katman katman yazdırılarak üretilme olanağı sunmuş ve Eİ teknolojisinin başlangıcı olmuştur [2]. Sonraki yıllarda bu teknolojiye beklenmeyen çok büyük gelişmeler görülmüştür. Günümüzde ise 3 boyutlu yazıcıların kullanımının yaygınlaşması ile Eİ sadece imalatta değil son kullanıcılara uygun parça ve ürün üretebilme avantajı ile hayatın her alanında kendine yer bulmaktadır. Eİ teknolojisi havacılık [3], otomotiv [4], gıda [5], imalat [6] ve biyomedikal [7] gibi alanlarda oldukça yaygın kullanıma sahiptir. NASA tarafından uzaya gönderilen 3 boyutlu yazıcı ile, astronotların ihtiyaç duyabileceği uzay mekiğine ait parçaların basımının sağlanması insanlık tarihi açısından Eİ teknolojisinin kullanımının en sıra dışı örneklerindedir [8]. Wohler Raporu'nda düzenli olarak her yıl tüm dünyada Eİ pazarının büyüme oranı ve mali değeri paylaşılmaktadır. Buna göre, sektör 2021 yılında 12.8 milyar dolarlık mali değer ile %7.5'lik bir büyüme gerçekleştirmiştir [9].

1980'lerden sonra yıllar içinde Eİ pazarına yeni teknolojiler girmiştir. Eİ teknolojilerinin sınıflandırılması çeşitli şekillerde yapılabilir. ASTM F42 komitesinin sınıflandırması en yaygın kabul gören sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre Eİ teknolojisi 7 kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar, fotopolimerizasyon (photopolimerization), malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), malzeme ekstrüzyon (material

extrusion), toz yataklı eritme (powder bed fusion), levha/sac laminasyon metodu (sheet lamination process) ve direkt enerji depolama (directed energy deposition) olarak ifade edilmektedir [1]. Öte yandan, bu makinaları kullanılan malzeme açısından da sınıflandıracak olursak: sıvı, toz, katı levha ve filament/macun ile üretim yapılabilen makinalar olarak dört grupta toplayabiliriz [10]. Şekil 1’de Eİ teknolojilerin ASTM F42’ye göre sınıflandırılması ve bu sınıflara ait ticari Eİ teknolojilerinin isimleri görülmektedir.



Şekil 1. Eİ'nin ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması [11]

Tüm bu farklı teknolojilerde ürün baskı sürecinin ortak adımları şu şekildedir:

1. İmal edilecek parçaya ait 3 boyutlu tasarımın yapılması,

2. Parçanın dış yüzey geometrisinin ve katmanlarının ölçülerinin belirlendiği 3 boyutlu tasarıma ait STL (Standard Triangle Language) formatının hazırlanması,
3. STL formatındaki parça verisinin Eİ makinasına yollanması,
4. Eİ makinasının parametre ayarlarının yapılması (lazer gücü, baskı hızı ve yönü, kullanılan malzeme sıcaklığı vb.),
5. Parçanın katman katman birbiri üzerine eklenerek yazılması,
6. Son işlemler (çapak alma gibi),
7. Gerekli ise montaj yapılması.

Eİ sürecinde gelişen her teknoloji, kullanılan malzeme, güç kaynağı, teknik özellikler gibi farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Bu nedenle bu teknolojilerin kendine has güçlü ve zayıf olduğu yönleri vardır. Genel olarak Eİ makinaları için baskı kalitesini etkileyen faktörler makina seçimi, malzeme seçimi, üretilecek parçanın yazma tablası üzerinde oryantasyonu ve geometrik olarak yerleşimi ve son işlemler olarak belirlenebilir [12]. Bir parçanın yazma tablası üzerinde üretilebilmesi için gerekli süre, Eİ makinasının baskı hızına, parçanın boyutlarına, katman kalınlığına ve yapının oryantasyonuna bağlıdır. Esasen baskı sürecinden bağımsız olarak bir parçanın üretimi için gerekli olan süre, tablaya yerleştirilmiş parçaların yüksekliğinin en büyüğü ile doğru orantılıdır [12].

Eİ makinalarında ürün imal edilirken, yazma tablası üzerinde tablanın büyüklüğüne sadık kalınarak uygun yerleşim sağlandığında bir seferde birden çok ürünün üretilmesi mümkün olabilmektedir. Bu durumda gelen siparişler aynı tablaya boyutları dikkate alınarak yerleştirilmekte ve makinanın gerekli ayarları bir kez yapılarak birden fazla ürün imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle hazırlık işlemlerinin bu şekilde gruplandırılmış ürünler için yapılması ile üretim çizelgesinin etkinliği artırılabilir. Gruplandırılmış ve bir hazırlık işlemi ile üretilebilecek ürün topluluğuna yığın adı verilmektedir. Farklı müşterilerden gelmiş ürünlerin gruplandırılarak yığınlarda üretilmesi Eİ makinaları için mümkündür. Aynı tip malzemeden veya renkten oluşan siparişler için yığın oluştururken ortaya çıkmayan sorunlar ile, farklı tip malzemeler veya renkler içeren ürünler aynı yığında gruplandırıldığında karşılaşılacaktır. Farklı tip malzemelerin aynı yığında bulunması, Eİ makinasının teknik özellikleri izin veriyorsa, ilave bazı işlemler gerektirmektedir. Bu ilave

işlemler üretim çizelgesinin bitiş süresini uzatmakta ve Eİ makinasının kullanım etkinliğini düşürmektedir. Günümüzde birçok Eİ makinası farklı malzemelerle baskı yapabilme yeteneğine sahiptir, ancak bunun gelecekte daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Bu durum, farklı malzemelerin arka arkaya kullanımından kaynaklanabilecek bazı sorunları da beraberinde getirecektir. Eİ makinaları kendilerine has teknolojilerine göre farklı malzeme değişim sürecine sahiptirler. Örneğin Direk Mürekkep Yazma (Direct Ink Writing- DIW) makinasında bu makinalardaki farklı malzeme kullanımı sorununu çözmek için çoklu baskı kafası geliştirilmiştir. Fakat baskı kafalarının ayarlanması ve hassas malzeme akışının kontrol zorluğu nedeni ile bu tip makinalarda çoklu baskı kafası uygulamasından vazgeçilmiştir [13]. SLA tip Eİ makinalarında malzeme sıvı halde reçine haznesinde bulunmaktadır ve bu durum malzeme değiştirmek istenildiğinde oldukça uzun zaman alan ve zahmetli bir süreç olan reçine haznesinden malzemeyi temizleyip yenisini koyma işlemine neden olmaktadır [14]. Bu durumla başa çıkmak için dönebilen, platform montajlı ve otomatik yükseklik ayarlama sistemine sahip çoklu bir reçine haznesi sistemi tasarımı yapılmıştır [15]. Öte yandan FDM teknolojisini kullanan Eİ makinalarında ve malzeme püskürtme özellikli makinalarda farklı filamentler kullanarak üretim yapmak ikili baskı kafası ve çoklu baskı kafası sayesinde diğer Eİ makinalarına göre daha kolaydır [13]. DLP tipi makinalar da farklı malzemeleri kullanabilmek için dönen baskı platformlarının kullanıldığı Eİ makinalarıdır [16]. Ancak bu metot temizleme işleminden dolayı oldukça zahmetlidir. Farklı malzemeler içeren ürünleri paralel ya da çoklu Eİ makinaları ile üretebilmek nispeten daha sorunsuz ve kolay bir süreçtir. Ancak özellikle tek Eİ makinası olduğunda malzeme değişim süreci daha zor ve sıkıntılı bir hal almaktadır. Üstesinden gelinememiş tüm bu problemler ve bunların yol açtığı imalat maliyeti ve imalat süresi artışı gibi nedenlerden dolayı Eİ makinalarında farklı malzemelerin kullanımı, üzerinde durulması gereken önemli bir konudur.

Eİ makinalarında en önemli kısıtlamalardan biri maliyet unsurudur. Bu makinalar kullanımının yaygınlaşmasına rağmen henüz yeterince ucuz değildir. Bu nedenle, bu makinaların etkin kullanımı üreticiler için oldukça önemli bir noktadır. Farklı müşterilerden gelen dağıtık siparişlerin Eİ makinasında üretimini çizelgelemek etkin bir üretim planının oluşturulmasını sağlar, böylelikle toplam üretim zamanı ve toplam maliyet düşer. Üretim

çizelgesinin uzamasına neden olan ve maliyetleri de doğal olarak artıran ana unsurlardan bir tanesi hazırlık süreleridir. Bu hazırlık sürelerine STL dosyasının yüklenmesi, malzeme dolumu, baskı kafasının ayarlanması, gerekli olan makinalar için baskı odasına durağan gazın doldurulması gibi işlemler dahil edilebilir. Bu işlemlerin hepsinin uygun ve etkin bir çizelge için dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte üretilecek ürünlerde farklı malzeme veya renk içeren ürünler olduğunda oluşturulan yığınlarda makinanın teknik özelliklerine bağlı olarak malzeme değişimi için ilave işlemler gerekmekte ve bu işlemler de üretim süresinde ve maliyetlerinde artışlara neden olmaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında etkin bir üretim planı için malzeme değişimlerini göz önünde bulunduran bir üretim çizelgesi oluşturmak oldukça önemlidir.

Çizelgeleme belirli bir zaman aralığında eldeki işlerin belirlenen amaç veya amaçlar doğrultusunda tamamlanmasını sağlayacak bir karar verme sürecidir. Çizelgeleme sürecinde eldeki kaynakların etkin kullanımını sağlamak, müşteri taleplerini siparişleri geciktirmeden tam zamanında teslim etmek, üretim maliyetlerini en küçüklemek gibi amaçlar hedeflenebilir. Çizelgelenecek işler kendine özgü öncelik seviyesi, hazırlık süresi ve teslim zamanı gibi farklı karakteristiklere sahip olabilir.

Bu tez çalışması ile farklı müşterilerden gelen dağıtık siparişlerin malzeme çeşidini göz önünde bulundurarak tek Eİ makinasında çizelgenmesini sağlayabilecek TSDP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model malzeme değişim süreci farklı zorluk seviyelerine sahip 3 farklı durum için uyarlanmıştır. Ayrıca büyük boyutlu problemlerde de çözüm sağlayabilmek adına TB algoritması geliştirilmiş ve ilgili algoritma Python programlama dili ile kodlanmıştır.

Tez çalışmasının giriş bölümünde Eİ hakkında genel bilgiler sunulmuş ve birinci bölümde ise literatürde Eİ makinaları için yapılan çizelgeleme çalışmaları incelenmiştir. İkinci bölümde tek bir Eİ makinası ortamında farklı malzeme içeren ürünlerden oluşan siparişlerin çizelgeleme problemi için önerilen matematiksel model detaylı olarak sunulmuş ve modelin literatürdeki veriler için elde edilen sonuçları incelenmiştir. Üçüncü bölümde, geliştirilen TB algoritmasının detayları açıklanmış ve bir önceki bölümde kullanılan veri seti üzerinden

elde edilen algoritma sonuçları irdelenmiştir. Son bölümde ise iki yöntemin kıyaslamaları ile ilgili bulgular paylaşılmış, ardından gelecek çalışmalara yer verilmiştir.



1.BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Eİ teknolojilerinde yaşanan gelişmeler doğrultusunda, ilgili alanda literatür hızla genişlemektedir. Ancak çalışmaların büyük çoğunluğu son yıllara kadar teknolojik üretim proseslerine ve bunların farklı endüstrilerdeki uygulamalarına odaklanmıştır. Eİ teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşması ile ortaya çıkan planlama problemleri nedeni ile Eİ makinalarında çizelgeleme problemlerine duyulan ilgi de artmaktadır ve bu alanda halen üzerinde çalışılması gereken çok fazla problem mevcuttur.

Rickenbacher ve ark. [17], SLM tipi makinalar için aynı anda birden fazla işin yığın oluşturmak suretiyle bir arada üretilmesini sağlayacak entegre bir maliyet modeli önermişlerdir. Bu model üretim süresinin yanı sıra kurulum süresinin (ve dolayısıyla parça başına toplam maliyetin) de en küçüklenebildiği bir modeldir. Eİ makinalarının üretim planlama problemi ile ilgili ilk sistematik çalışma, dağıtık müşterilerden gelen siparişler için malzeme hacmi başına ortalama üretim maliyetini en aza indiren bir matematiksel modeli içermektedir [18]. Bu çalışmada aynı amaç için iki farklı sezgisel yöntem de geliştirilmiştir. Cherqui ve ark. [19], dağıtık müşterilerden gelen siparişleri son teslim tarihlerine kadar karşılamayı sağlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu modelde özdeş paralel Eİ makinalarında üretim planlama, yerleştirme (nesting) ve çizelgeleme problemine çözüm sunulmuş ve bir de sezgisel algoritma ile aynı amaçlar için çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Dvorak ve ark. [20], teslim tarihi belli olan ve farklı özelliklere sahip bir dizi iş için, teslim tarihi geciken işlerin sayısını en aza indirmek adına çoklu Eİ makinalarında çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmadaki yaklaşım kutu paketleme, yerleştirme (iki boyutlu kutu paketleme), atölye çizelgeleme problemlerinin bir kombinasyonunu içermektedir. Önerilen modelin çözümü için ayrıca sezgisel bir yaklaşım da geliştirilmiştir. Fera ve ark. [21], tek bir SLM makinasında çok amaçlı bir çizelgeleme

problemini ele almışlardır. Sunulan matematiksel model, erken/geç tamamlanmalar ve üretim maliyetlerini en küçüklemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, problemin NP-Zor yapısı nedeniyle çözüm için Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir meta-sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. Oh ve ark. [22] çoklu Eİ makinaları için farklı şekil ve geometrilere sahip parçaların üretim planlaması ile ilgili yaptıkları çalışmada üç farklı amacı çözmek için sezgisel bir yaklaşım önermişlerdir. Hedeflenen amaçlar: ürün oryantasyonu, 2 boyutlu paketleme problemi ve çizelgeleme problemleridir. Küçükkoç [23] tarafından tek, paralel özdeş ve paralel özdeş olmayan Eİ makinaları için tamamlanma zamanını en küçüklemek amacı ile önerilen matematiksel model eşit olmayan işlem sürelerine sahip parçaların çizelgelenmesi için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma, SLM tipi Eİ makinaları için kapsamlı deneyler içermektedir. Sonuç olarak çalışmada, problem boyutu büyüdükçe çizelgeleme problemlerini çözmeye zorluk yaşandığı vurgulanmıştır. Li ve ark. [24], birden fazla PBF tipi Eİ makinasında sipariş kabulü ve çizelgeleme problemlerinin çözümü için simülasyon tabanlı bir karar verme süreci geliştirmişlerdir. Bu karar verme süreci sayesinde dinamik gelen siparişler çizelgenerek tüm üretim süresi boyunca birim zaman başına ortalama kar maksimize edilmiştir. Fera ve ark. [25] Eİ literatüründe 2001'den beri en az ele alınan problem tipinin tek bir Eİ makinasında çizelgeleme problemi olduğunu belirtmiş ve ardından tek bir Eİ makinası için tamamlanma süresini ve toplam sipariş maliyetini optimize etmek için Tabu Arama (TA) ve GA tabanlı çözümler önermişlerdir. Metal Eİ makinaları için gerçek zamanlı sipariş kabulü ve çizelgeleme sorunları Li ve ark. [26] tarafından ele alınmıştır. Planlama ufku içinde birim zaman başına karı maksimize etmek için bir matematiksel model geliştirilmiş ve problemin NP-Zor yapısını çözmek için bazı meta-sezgisel yaklaşımlar uygulanarak bir çizelge oluşturulmaya çalışılmıştır. Metal Eİ makinaları bir çeşit yığın işleme makinalarıdır (batch processing machine) ve bu makinalarda çizelgeleme için yığın çizelgeleme kullanılabilir [26]. Tek bir Eİ makinasında çizelgeleme literatürü üzerine en kapsamlı çalışma Oh ve ark. [27] tarafından yapılmış, çalışmada Eİ literatüründeki yerleştirme ve çizelgeleme problemleriyle ilgili tüm çalışmalar parça tipine, yapı tipine ve makina tipine bağlı olarak kategorize edilmiştir. Ayrıca Oh ve ark. [27] Eİ yerleştirme ve çizelgeleme literatüründen birçok teknik makaleyi, Eİ süreç türleri, yerleştirmenin amacı, çizelgeleme problemi ve çözüm teknikleri açısından incelemişler, Eİ makinaları için yerleştirme odaklı problemlerin çizelgeleme odaklı

problemlere göre çok daha fazla ilgi gördüğü sonucuna varmışlardır. SLS, SLA ve ME tipi makinalar için üretim ve dağıtım problemini eş zamanlı çözebilecek bir karar destek sistemi Ransikarbun ve ark. [28] tarafından önerilmiştir. Çalışmada birbiri ile çelişen farklı amaçlar arasında denge sağlanması için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)'nden yararlanılmıştır. Çoklu Eİ makinalarında çizelgeleme problemlerinin NP-Zor doğası nedeni ile çözüm bulunmasının zor olması araştırmacıları farklı yöntemler kullanmaya yönlendirmektedir. Alicastro ve ark. [29] bu problem tipi için Q-Learning Değişken Komşuluk Araması uygulamasına dayanan Pekiştirmeli Öğrenme Yinelenen Yerel Arama (reinforcement learning iterated local search) meta-sezgiseli kullanmışlardır. Aloui ve Hadj-Hamou [30] teknolojik kısıtlar altında Eİ makinalarında üretim çizelgelemeyi ve yerleştirme sorununu ele almışlardır. Amaç, üretilecek parçaların toplam gecikmesini en aza indirmek ve Eİ makinalarının kullanım etkinliğini en üst düzeye çıkarmak olarak belirlenmiştir. Arık [31] çalışmasında tek bir Eİ makinası için yığınlarda çoklu montaj gerektiren parçaları üretebilecek bir matematiksel model önermiş ve bu modelin çözümü için sezgisel bir yaklaşım da geliştirmiştir. İşleri yığınlara atarken hem tek boyutlu hem de 2 boyutlu atama üzerinde durmuştur. Çalışmada parçaların montaj sırası dikkate alınmış, deneysel sonuçlar önerilen sezgisel yöntemin matematiksel modele göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [31]. Özdeş olmayan paralel Eİ makinalarında sipariş kabulü ve çizelgeleme için GA tabanlı bir çözüm öneren Kapadia ve ark. [32] yığınların tamamlanma zamanlarını bulurken yüzey temizleme gibi son işlemleri de dikkate almışlardır. Farklı kısıtlar altında çizelgeleme problemlerine örnek verilecek olursa, Karimi ve ark. [33] FDM tipi Eİ makinası için enerji odaklı bir çizelgeleme yaklaşımı geliştirmeye çalışmışlardır. Geliştirilen karma TSDP modeli, zamanla değişen elektrik fiyatları ve güç talebine bağlı olarak enerji maliyetini en aza indirmek için en uygun üretim çizelgesini bulan bir modeldir. Bir başka çalışmada, çoklu Eİ makinalarında bir yığına konulabilecek en büyük iş sayısını bulabilmek için işler yığınlanarak çizelgeleme yapılmıştır [34].

Eİ makinalarının çizelgeleme sorunları üzerine yayınlanmış birçok araştırmaya rağmen, çok az araştırmacı farklı malzemelerden oluşan siparişlerin çizelgelenmesi konusunu ele almıştır. Farklı malzemelerden oluşan parçaların çizelgelenmesine ilişkin ilk araştırma, tek bir SLA makinasında çok malzemeli siparişlerin üretiminde malzeme değişimlerini en aza

indirmek için önerilen bir çizelgeleme ve süreç planlama yazılımının geliştirilmesidir [35]. Bu çalışmada, birden fazla malzeme türü (düşük viskoziteli reçineler) içerebilen parçalar için katmanlar arasında malzeme geçişlerinde dikkat edilmesi gereken kurallar geliştirilmiştir. Çok malzemeli SLA makinalarında malzeme değiştirilirken yıkama işlemi gerekir ve bu işlem çizelgenin tamamlanma süresini artıran ek bir adımdır. Ayrıca, özdeş olmayan paralel Eİ makinalarında sıra bağımlı kurulum zamanını ele alan ilk çalışmalardan biri Kim ve Kim [36] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen matematiksel model ile yığınların homojen malzemedен oluşması garanti altına alınmış ve ardından önerilen 3 farklı meta sezgisel yaklaşımla bu problem için elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Yine özdeş olmayan paralel SLM tipi Eİ makinaları için çizelgeleme problemini ele alan Rohaninejad ve ark. [37] tamamlanma zamanını ve toplam gecikmeyi en küçükleyen iki amaçlı bir matematiksel model önermişlerdir. Bu çalışmada da makina özellikleri nedeni ile her işin homojen malzemelerden oluşmasını sağlayan teknik bir kısıt probleme dahil edilmiştir. Eİ makinaları için çizelgeleme literatürü farklı açılardan incelendiğinde, bu tez çalışmasında literatürde oldukça az çalışılan bir problem olan tek bir Eİ makinası için farklı malzeme türlerinden oluşan siparişlerin çizelgenmesi probleminin incelenmesine karar verilmiştir.

2.BÖLÜM

PROBLEM İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

2.1. Farklı Malzemeler İçeren Siparişlerin Tek Eİ Makinasında Çizelgelenmesi için Geliştirilen Matematiksel Model

Bu bölümde, farklı malzemeleri aynı yazma tablasında kullanarak baskı yapabilmek yeteneğine sahip tek Eİ makinası ortamında çizelgeleme problemi için geliştirilen tam sayılı doğrusal programlama modeline yer verilmiştir.

Eİ makinalarının en önemli özelliği, oldukça hassas ölçülere sahip, kişiye özel tasarımların üretimine olanak sağlamasıdır. Bir Eİ makinasında, makina tepsisinin yükseklik ve alan gibi özelliklerine sadık kalınarak farklı özelliklere sahip birden fazla parça üretebilmek mümkündür. Farklı müşterilerden gelen farklı özelliklere sahip siparişler, tek bir yığında gerekli kısıtlar göz önüne alınarak birlikte üretilebilir. Ayrıca, son teknolojik gelişmelerle birlikte Eİ makinaları, makinanın kapasitesine göre farklı malzeme içeren birden fazla parçayı platformlarında aynı anda üretebilme imkânı sunmaktadır. Ancak bu durum, üretilecek ürünlerin boyutsal doğruluğu, kontaminasyon sorunu, farklı malzeme kombinasyonlarının aynı ortamda aynı anda işlenememesi, baskı sonrası son işlem ihtiyacı, çoklu malzeme ile üretim esnasında viskozite değişiklikleri gibi gerçek dünya uygulamalarına yönelik bazı sorunları da beraberinde getirmektedir [13, 14]. Eİ makinalarının maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle firmalar bu tür makinaları etkin bir şekilde kullanmak zorundadır. Bu nedenle bir Eİ makinasının verimli kullanımı için bu makinaların çizelgeleme problemlerine çözümler sunmak önemli hale gelmiştir. Bir Eİ firması, dağıtık müşterilerden farklı özelliklere sahip siparişler aldığı anda, bunu tek bir Eİ makinasında siparişlerin teslim zamanında gecikmeler olmaksızın üretebilmek için etkin bir

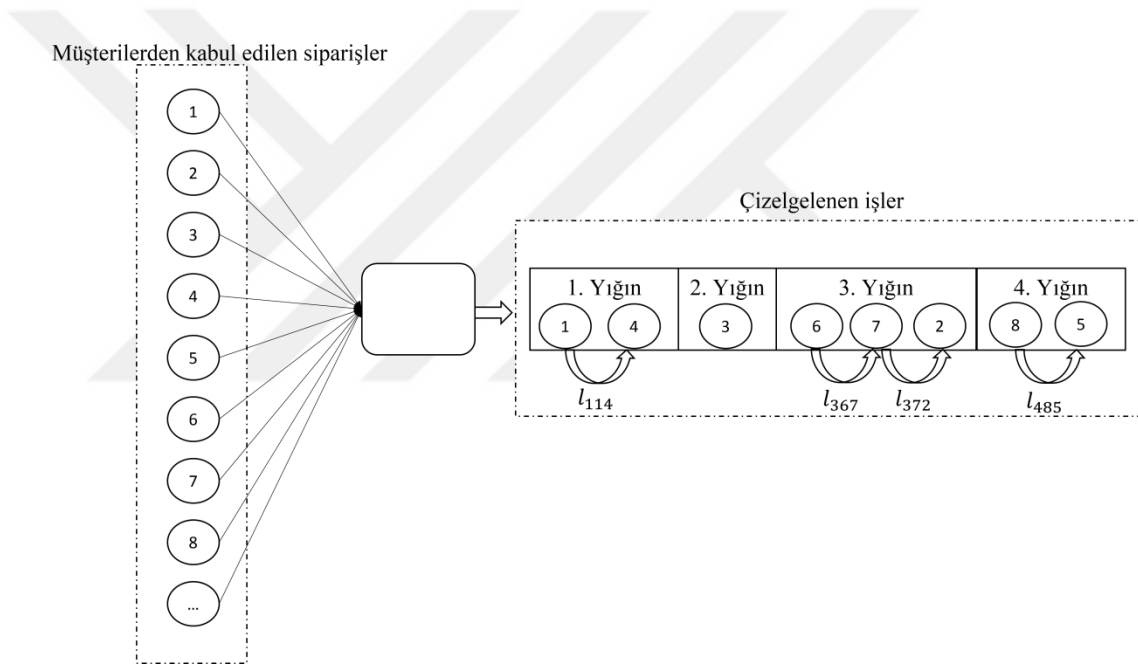
çizelge oluşturmak durumundadır. Eğer ki siparişler farklı malzemeler içeren işlerden oluşuyorsa, her bir üretim yığnında tamamlanma zamanını en küçükleyecek en iyi iş kombinasyonunu bilmek üreticiye avantaj sağlayacaktır.

Farklı özelliklere sahip dağıtık siparişlerin tek bir Eİ makinasında yazdırılması problemi, literatürde daha önce tanımlanan rastgele iş boyutuna sahip yığın çizelgeleme sorununa oldukça benzemektedir [38]. Bu çizelgeleme problemi terminolojisine ait “iş” ve “parti” kavramının karşılığı bu çalışmada sırası ile, farklı müşterilerden gelen farklı özelliklere sahip “işler” ve bu işlerin kombinasyonlarından oluşan yazma tablasının alabileceği ürün grubunu temsil eden “yığın” (batch) kavramıdır.

Ele alınan problemde eğer tüm işlerin işlem süreleri aynı olsaydı, bu tür bir problem, ele aldığımız problemin daha basit şekli olan ve iyi bilinen “kutu paketleme problemine (bin-packing problem)” eş değer olurdu [39]. Literatüre göre, çalışmada ele alınan problemin basit versiyonu olan kutu paketleme problemi NP-Zor bir problem tipidir.

Eİ makinalarında baskı yaparken her bir yığın öncesi, malzeme dolumu veya değişimi, makina başlangıç ayarlarının yapılması, üretilecek parçalara ait verilerin özel dosya formatında makinaya yüklenmesi, gerekli ise yazma alanına ait koruyucu atmosferin doldurulması ve yüzey temizliği gibi bazı işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu işlemler hazırlık süresi olarak tek bir başlık altında toplanabilir. Öte yandan bir yığının içerdiği parçalar farklı malzemelerden oluşuyorsa, yığın içinde malzeme değişiminden kaynaklı hazırlık süresine ilave bir süre oluşmaktadır. Yığın içi malzeme değişiminin tespiti ele alınan problem için önemli bir noktadır, çünkü bu işlem hem maliyet hem de tamamlanma zamanında artışa neden olmaktadır. Bu çalışmada her ne kadar işlerin sıralanması odak noktası olmasa da malzeme değişimlerinden kaynaklı hazırlık süresini tespit edebilmek için problemi aynı zamanda bir sıralama problemi olarak da ele almak gerekmektedir. Bu sayede aynı yığnında basılan ardışık ürünler arasındaki malzeme değişimi tespit edilir. Tüm bu koşullar göz önüne alındığında, ele alınan problem sıra bağımlı hazırlık zamanlı tek makina yığın çizelgeleme problemi olarak irdelenebilir. Çalışmada ele alınan problem $1|yığın\{FMEİ\}|C_{maks}$ olarak ifade edilmiştir. FMEİ burada farklı malzeme basabilen Eİ makinalarını ifade etmektedir.

Eğer düğümler alınan siparişleri (işleri) ve l_{jik} bir yığının ardışık işleri arasındaki bağlantıları temsil ederse ele alınan probleme ilişkin şematik görüntü Şekil 2'deki gibi sunulabilir. 6, 7 ve 2 numaralı işler aynı yığında üretilebilir ve bu yığındaki 7 ve 2 numaralı işler farklı malzemelerden oluşan parçalardan oluşabilir. Bu nedenle, 7 numaralı iş üretildikten sonra bu yığında 2 numaralı işin baskısından önce malzeme değişimi yapılması gerekmektedir.



Şekil 2. Tek eklemeli imalat makinası için geliştirilen model

Geliştirilen TSDP modelinin aşağıdaki varsayımlar altında çalıştığı kabul edilmektedir:

- Tek nozula sahip tek bir Eİ makinası ele alınmıştır,
- Eİ makinası farklı malzeme basma özelliğine sahiptir,
- Tüm ürünler bütüncül olarak basılmalıdır,
- Bir yığında, farklı malzemeler içeren işler bulunabilir,
- Tüm yığın tamamlanana kadar hiçbir iş makina teptisinden çıkarılamaz,
- Her yeni yığın için bir dizi ön işlem gerçekleştirilmelidir (Hazırlık işlemleri),

- Bir yığının içinde malzeme değişimi meydana gelirse, kullanılan Eİ makinasının teknolojisine bağlı olarak kazan temizleme, malzeme doldurma vb. başlatma işlemlerinden bazıları yeniden yapılmalıdır,
- Bir işin yüksekliği, makinanın maksimum yüksekliğine eşit veya daha küçük olmalıdır.

Aşağıdaki gösterimler $1|yığın\{FMEİ\}|C_{maks}$ problemi için kullanılmıştır;

İndisler:

i : İş indisi ($i = 1, \dots, \leq I$).

j : Yığın indisi ($j = 1, \dots, \leq J$).

s : Sıra indisi ($s = 1, \dots, \leq I$).

I , İş ve sıra sayısı için üst sınır

J , Olası yığın sayısı için üst sınır

Parametreler:

Parçalarla ilgili parametreler:

h_i : i işinin yüksekliği,

a_i : i işinin alanı,

v_i : i işinin hacmi,

m_i : i işinin malzeme tipi.

Makina ile İlgili Parametreler:

VT : Eİ makinasında işin birim hacmini oluşturmak için harcanan süre,

HT : İlgili yığında üretilen en yüksek iş baz alınarak işlerin her katmanında malzemeyi yazmak için harcanan zaman,

MA : Eİ makina tepsisinin baskı alanı,

set_b : Bir yığının temizlenmesi ve başlatılması için harcanan hazırlık süresi (1.2 saate sabitlenmiştir),

set_i : Bir yığın içinde malzeme değişimi için gereken ilave hazırlık süresi (0.3 saat, 0.9 saat ve φ saat olarak alınmıştır).

Karar değişkenleri:

$$x_{jis} \begin{cases} 1; & \text{Eğer } i \text{ işi } s' \text{inci sırada } j \text{ yığımına atanırsa} \\ 0; & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$$z_j: \begin{cases} 1; & \text{Eğer } \sum_{i \in I} x_{jis} \geq 1 \quad \forall j \in J \\ 0; & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$$l_{jik}: \begin{cases} 1; & \text{Eğer } j \text{ yığımındaki } i \text{ işi } k \text{ işinden hemen önce basılıyorsa} \quad \forall j \in J \\ 0; & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$$d_{ji}: \begin{cases} 1; & \text{Eğer } m_i l_{jik} \neq m_k l_{jik} \quad \forall j \in J \\ 0; & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

SET_j : Bir yığın için harcanan toplam hazırlık süresi

PT_j : Bir yığının işlem süresi

C_j : Bir yığının tamamlanma süresi

φ : Çok büyük bir sayı

TSDP modeli

Yukarıda verilen tüm bu notasyonlara göre, ele alınan problem aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\min Z = \max_{j \in J} \{C_j\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{jis} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{jis} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{(j+1)is} \leq \varphi \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{jis} \quad \forall j \in 1, 2, \dots, j_{n-1} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ji(s+1)} \leq \varphi \sum_{i \in I} x_{jis} \quad \forall j \in J, s \in 1, 2, \dots, s_{n-1} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} a_i x_{jis} \leq MA \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$C_{j-1} + PT_j + SET_j \leq C_j \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$C_0 = 0 \quad (8)$$

$$PT_j = VT \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} V_i x_{jis} + HT \max_{(i \in I, s \in S)} \{h_i x_{jis}\} \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$SET_j = set_b Z_j + set_i \sum_{i \in I} d_{ji} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$x_{jis} + x_{jk(s+1)} \leq 1 + l_{jik|i \neq k} \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$x_{jis}, Z_j, l_{jik}, d_{ji} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (12)$$

Ayrıca, $\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{jis} \geq 1$; $\forall j \in J$ olduğu durumda $z_j = 1$ 'dir. Öte yandan $m_i l_{jik} \neq m_k l_{jik}$; $\forall j \in J$ olduğunda ilgili yığında ardışık işlerde malzeme değişimi yapılacak demektir ve bu durumda $d_{ji} = 1$ olur.

Modelde amaç fonksiyonu, Eşitlik 1'de formüle edildiği gibi çizelgenin maksimum tamamlanma süresini en aza indirir; Eşitlik (2) her işin yalnızca bir yığında yalnızca bir pozisyona atanması gerektiği anlamına gelir; Eşitlik (3) ile her yığında her pozisyonda sadece 1 iş olması sağlanır. Eşitlik (4) yığınların sırasının artan sırada olmasını sağlayan kısıttır. Örneğin, yığın 3'e atanmış hiçbir iş yoksa yığın 4 kullanılamaz. Eşitlik (5) her bir yığında işlerin artan sırayla atanmasını garanti altına alır. Örneğin, ilgili yığında 2. sıraya atanmış bir iş yoksa herhangi bir iş 3. sıraya atanamaz. Eşitlik (6), bir yığının tüm sıralarına atanan ilgili işlerin toplam alanının, makina tepsisinin üretim alanından daha büyük olamayacağı anlamına gelen alan kapasite kısıtlamasını temsil eder. Bu kısıtlama, bir yığındaki işler makinanın tepsi kapasitesini aştığında yeni bir yığın oluşturulmasını sağlar. Eşitlik (7) ve Eşitlik (8) tamamlanma zamanı kısıtlamalarıdır. Eşitlik (7) bir yığının tamamlanma zamanının, o yığının hazırlık süresi, üretim zamanı ve başlama zamanının (makinada bir önceki yığının tamamlanma zamanına eşittir) toplamı olduğunu belirtir. Öte yandan, Eşitlik (8) makinanın programın başında kullanıma hazır olduğunu ifade eder. Eşitlik (9) ile yığınların işlem süreleri hesaplanır. Ayrıca bir yığında basılabilecek tüm işlerin yüksekliklerinin Eİ makinasında yazılabilecek maksimum yükseklikten daha küçük veya buna eşit olduğu varsayılmaktadır. Her bir yığının işlem süresi, yığında bulunan

işlerin maksimum yüksekliğine ve toplam hacmine bağlı olarak değişir. Eşitlik (10) bir yığının başlaması için gerekli olan hazırlık süresine ve ardışık işler arasındaki malzeme değişimlerine bağlı olarak ilgili yığının toplam hazırlık süresini hesaplar. Bu eşitlikte parametre set_i çok büyük bir sayı olarak belirlendiğinde, benzer malzemeli işlerden oluşan homojen yığınlar elde edilir.

Malzeme değişimlerinden kaynaklanan hazırlık sürelerini hesaplamak için parçaları sıralamak gerekir. Bu nedenle, ardışık işler arasındaki bağlantı l_{jik} kullanılarak sağlanır. Eşitlik (11)'de gösterildiği gibi j yığının s pozisyonuna i işi ve $s + 1$ pozisyonuna k işi atandığında değişken $l_{jik} = l$ 'dir. Son olarak, Eşitlik (12) ikili değişkenleri tanımlayan işaret kısıtıdır.

Z_j 'nin optimal değeri aranırken, j_n için bir üst sınır belirlemek modelin hesaplama süresini kısaltabilir. Küçük boyutlu veriler için bu durum ihmal edilebilir düzeyde olabilir ancak sipariş sayısı arttığında (çizelgelenecek iş sayısı arttığında), $j_n = i_n$ olarak ayarlanırsa hesaplama süresi önemli ölçüde uzayabilir ve bu da makul bir sürede bir çözüm bulunamamasına neden olabilir. Aşağıda bir örnekle önerilen matematiksel modele belirlenen üst sınırın etkisi ve önerilen modelin malzeme değişimine etkisi açıklanmıştır. Önerilen TSDP modeli IBM ILOG Optimization Studio'nun (v12.10) CPLEX programı ile kodlanmıştır. Bu modele ait CPLEX kodları Ek 1'de sunulmuştur.

Üst sınırın probleme etkisi üzerine bir örnek:

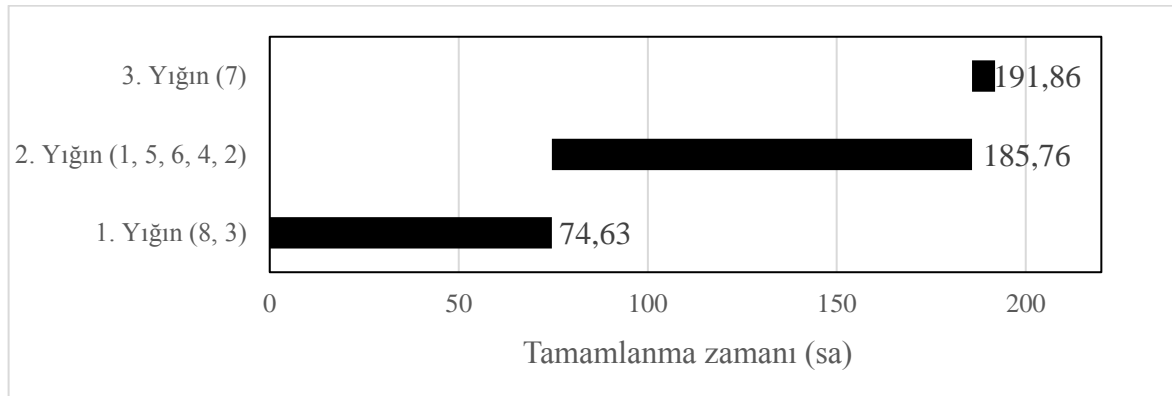
Küçük bir örnek olarak, bir firmanın dağıtık müşterilerden 8 sipariş aldığını kabul edelim. Firmanın elinde farklı ABS filamentleri kullanabilme yeteneğine sahip; parametre değerleri $VT = 0.030864 \text{ sa/cm}^3$, $HT = 0.7 \text{ sa/cm}$, $Set_b = 1.2 \text{ sa}$, $Set_i = 0.9 \text{ sa}$ ve $MA = 625 \text{ cm}^2$ olan tek nozullu bir FDM makinası olsun. İşler Tablo 1'de verilen sipariş özelliklerine göre tek bir Eİ makinasında çizelgelenecektir. Siparişler iki farklı malzeme içermektedir: tip 1 ve tip 2. J için üst sınır 5 olarak seçildiğinde elde edilen çizelge aşağıdaki gibidir.

Tablo 1. Siparişlerin özellikleri

Parçalar (i)	Alan (a_i) cm ²	Hacim (v_i) cm ³	Yükseklik (h_i) cm	Malzeme Türü (m_i)
1	48.27	315	17.13	Tip 1
2	84.97	121.82	2.67	Tip 2
3	269.75	1928.6	10.77	Tip 1
4	258.54	1375.9	26.67	Tip 2
5	114.56	989.53	14.38	Tip 1
6	50.02	125.7	17.38	Tip 2
7	248.92	131.44	1.2	Tip 1
8	326.13	206.13	3.1	Tip 1

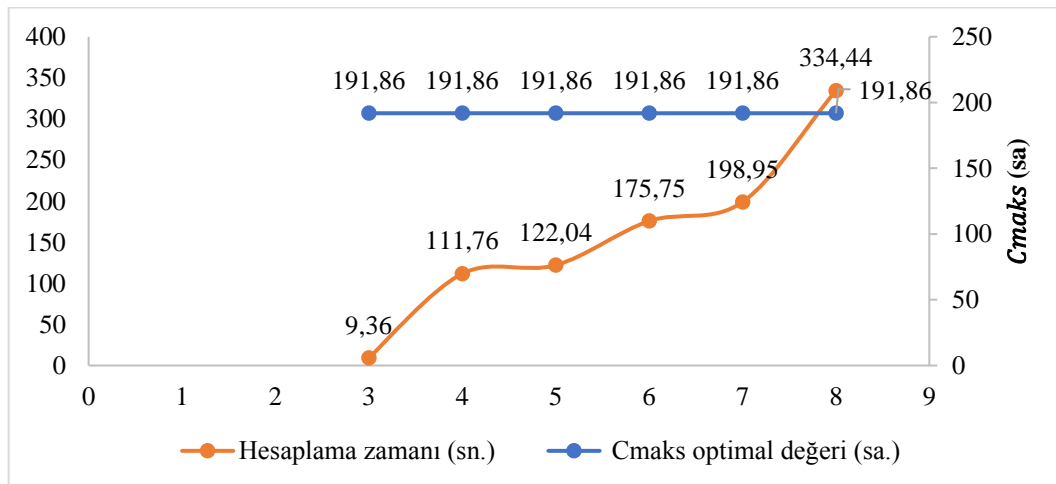
İlgili problem geliştirilen matematiksel model kullanılarak, 8 GB RAM'li Intel Core i7-6700 CPU @3.40 GHz bilgisayarda IBM ILOG Optimization Studio'nun (v12.10) CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. 122.04 saniyede 191.86 saatlik optimal amaç fonksiyonu $Z_j = 3$ iken elde edilmiştir. Şekil 3'te bu çizelgeye ait Gantt şeması verilmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi 1. yığın (8. iş-tip 1; 3. iş-tip 1) ve 3. yığın (7. iş-tip 1) benzer malzemelerden yapılmış parçalardan oluşurken, 2. yığında (1. iş-tip 1; 5. iş-tip 1; 6. iş- tip 2; 4. iş- tip 2; 2. iş- tip 2) 5. işten sonra 6. işi yazdırmak için filament değişimi yapılmalıdır.

Öte yandan, eğer malzeme değişimi dikkate alınmadan bir çizelge oluşturulursa yığın içerikleri şu şekilde olur: 1. yığın (8. İş- tip 1; 3. İş-tip 1), 3. yığın (7. İş- tip 1) ve 2.yığın (6. iş- tip 2; 5. iş-tip 1; 2. iş- tip 2; 4. iş- tip 2; 1. İş- tip 1). 2. yığındaki işlerin sıralamasından anlaşıldığı üzere bu yığını tamamlamak için üç defa malzeme değişimi gereklidir. Geliştirilen model, örnekte gösterildiği gibi çizelgedeki malzeme değişimini de en aza indirmektedir.



Şekil 3. Gantt şeması

Yığın sayısı (j_n) için seçilen üst sınırların çizelgenin hesaplama süresi ve tamamlanma zamanı üzerindeki etkisini görmek için, yukarıda verilen veri seti farklı üst sınırlar için test edildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'te görüldüğü üzere, üst sınır için verilen değer arttıkça optimum C_{maks} değeri değişmezken hesaplama süresi artar.



Şekil 4. j_n için üst sınır belirlemenin hesaplama süresi üzerindeki etkisi

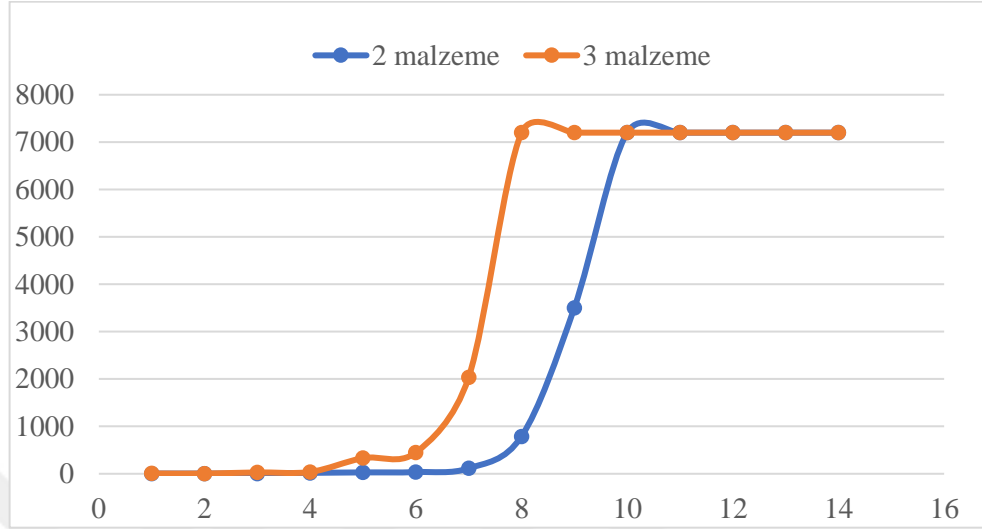
2.2. Test Verileri İçin Sonuçlar

Bu bölümde, literatürde tek bir Eİ makinası için verilen 14 farklı veri seti [23] kullanarak geliştirilen modelden elde edilen sonuçlara değinilmiştir. Literatürde verilen veri setlerine işlerin malzeme tipini belirten yeni bir özellik eklenmiştir. Ayrıca, farklı malzeme sayısının tamamlanma zamanı üzerindeki etkisini görmek için iki alternatif (2 farklı malzeme ve 3

farklı malzeme) denenmiştir. Malzeme türleri, 2 malzeme türü için $U [1, 2]$ ve 3 malzeme türü için $U [1, 3]$ üniform kesikli dağılıma göre rastgele oluşturulmuştur. Eİ makinasında malzeme değişim zorluğunun çizelgeye etkisini karşılaştırmak için farklı zorluk seviyelerine (set_i) sahip makinalar denenmiştir. set_i değeri uzman görüşü alınarak 0.3 saat, 0.9 saat ve φ saat şeklinde belirlenmiştir. 0.3 saat set_i değeri malzeme değiştirme işlemi daha kolay olan Eİ makina türlerini temsil ederken, 0.9 saat daha karmaşık malzeme değişim sürecine sahip Eİ makinalarını temsil eder. Öte yandan φ saat, aynı yazdırma tablasında çok malzemeli parçaları basamayan Eİ makina türlerini veya biyomedikal ürünler gibi kontamine olmayan bitmiş ürünlere ihtiyaç duyulan özel siparişleri temsil etmektedir [40]. set_b değeri 1.2 saat olarak sabitlenmiştir ve bu değer her bir yığın yazdırılmaya başlamadan önce gerekli olan hazırlık süresini ifade etmektedir. Ek olarak, bu çalışmada ele alınan tek Eİ makinasının özelliklerinin yukarıdaki örnekte verilenlerle aynı olduğu kabul edilmiş ve j_n için üst sınırlar Küçükkoç [23] tarafından belirlenenlerle aynı seçilmiştir. Problemleri çözmek için 7200 saniye zaman sınırı belirlenmiş ve bu süreçte elde edilen optimum veya uygun çözümler kaydedilmiştir. Tüm sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de görüldüğü üzere bazı veri setleri için, belirlenen sürede optimum çözüm elde edilememiştir. 7200 saniyede elde edilen çözümler Tablo 2'de “*” ile işaretlenmiştir.

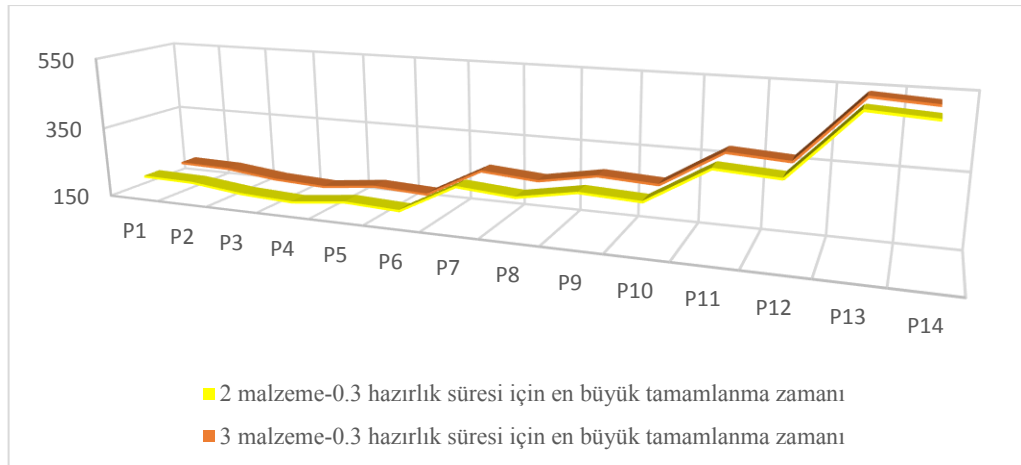
2.2.1. $set_i = 0.3$ saat

Bu senaryo, FDM gibi daha kolay malzeme değiştirme prosedürlerine sahip olan Eİ makinaları için uygundur ve set_i değeri 0.3 saate ayarlanmıştır. Bu senaryonun hesaplama süresine ve tamamlanma zamanına ait grafikler sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 5. $set_i = 0.3$ (sa.) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.)

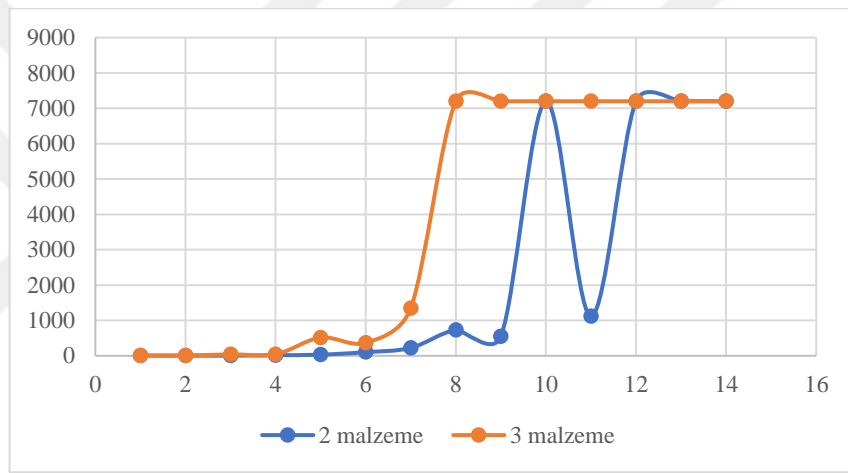
Şekil 5'te gösterildiği üzere, malzeme sayısı ile hesaplama süresi arasında kesin bir ilişki yoktur. Ek olarak, malzeme sayısının artmasının, daha fazla malzeme değişimi nedeniyle farklı veri setleri için çizelgenin tamamlanma zamanını artırma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Makinanın baskı alanı da tamamlanma zamanını etkileyen bir diğer parametredir. Eİ makinası daha büyük bir tepsiye sahip olduğunda, daha fazla parça tahsis etmek mümkün hale gelecektir. Böylece siparişler daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Diğer bir önemli bulgu ise 2 ve 3 çeşit malzeme için optimal Z_j sayısı arasında fark olmamasıdır.



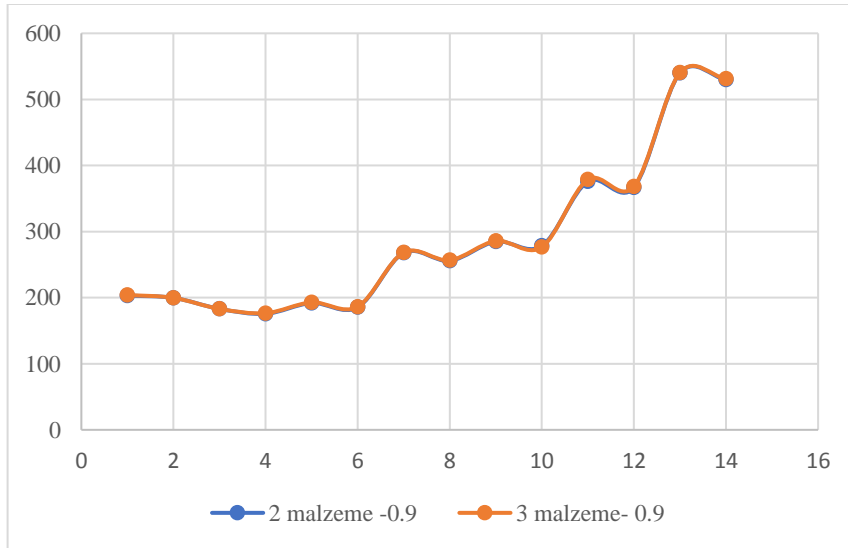
Şekil 6. $set_i = 0.3$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlama zamanları (sa.)

2.2.2 $set_i = 0.9$ saat

Bu aşamada, set_i değeri 0.9 saat olarak ayarlanmıştır. Bu senaryo SLA, DLP vb. gibi malzeme değiştirme prosedürleri daha zor olan makinalar için daha uygundur. Tablo 2'de sunulduğu üzere, bu durum için bazı veri setlerinde belirlenen sürede optimal çözümler elde edilememiştir. Bu senaryoda, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterildiği gibi farklı malzeme sayıları arttığında C_{maks} genellikle artma eğilimindedir.



Şekil 7. $set_i = 0.9$ (sa.) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.)



Şekil 8. $set_i = 0.9$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlanma zamanları (sa.)

Tablo 2. Farklı senaryolara ait TSDP modeli sonuçları

Veri Seti	Özellikler		Sonuçlar											
	i	$MA(c_{max})$	$set_i = \varphi$		$set_i = 0.9$		$set_i = 0.3$		$set_i = \varphi$		$set_i = 0.9$		$set_i = 0.3$	
			C_{maks-2} malzeme	C_{maks-3} malzeme	C_{maks-2} malzeme	C_{maks-3} malzeme	C_{maks-2} malzeme	C_{maks-3} malzeme	Z_j-2 malzeme	Z_j-3 malzeme	Z_j-2 malzeme	Z_j-3 malzeme	Z_j-2 malzeme	Z_j-3 malzeme
P1	6	625	209.961	218.7	203.158	204.058	201.96	202.26	2	3	2	2	2	2
P2	6	800	209.961	218.7	199.731	199.73	199.13	199.13	2	3	2	2	2	2
P3	7	625	183.764	192.563	183.037	183.037	181.84	181.84	3	3	3	3	3	3
P4	7	800	183.764	192.563	175.628	176.528	174.43	174.73	3	3	2	2	2	2
P5	8	625	196.741	208.182	191.859	192.759	191.26	191.56	3	3	3	3	3	3
P6	8	800	195.411	204.812	185.35	186.25	184.15	184.45	3	3	2	2	2	2
P7	9	625	269.468	275.324	267.898	268.328	266.70	266.99	4	4	4	4	4	4
P8	9	800	258.689	270.634	255.799	256.699*	254.60	254.90*	3	4	3	3	3	3
P9	10	625	297.533	307.354	284.833	285.733*	283.63	283.933*	5	5	4	4	4	4
P10	10	800	288.245	292.12	278.324*	276.524*	276.52*	275.924*	3	3	3	3	3	3
P11	11	625	378.11*	390.907*	376.023	378.723*	374.82*	375.723*	4	5	4	4	4	4
P12	11	800	369.211*	380.936*	366.647*	368.355*	365.44*	366.555*	4	4	3	3	3	3
P13	12	800	541.981	547.99*	539.889*	540.421*	538.69*	538.989*	5	6	5	5	5	5
P14	12	1000	538.61*	544.655*	529.918*	531.35*	528.72*	531.358*	4	5	4	4	4	4

(Tüm C_{maks} ve Z_j değerleri optimallik koşullarını sağlarken, “*” eklenenler 7200 saniyelik zaman sınırı içinde elde edilen uygun sonuçları (optimum olmayan) gösterir.)

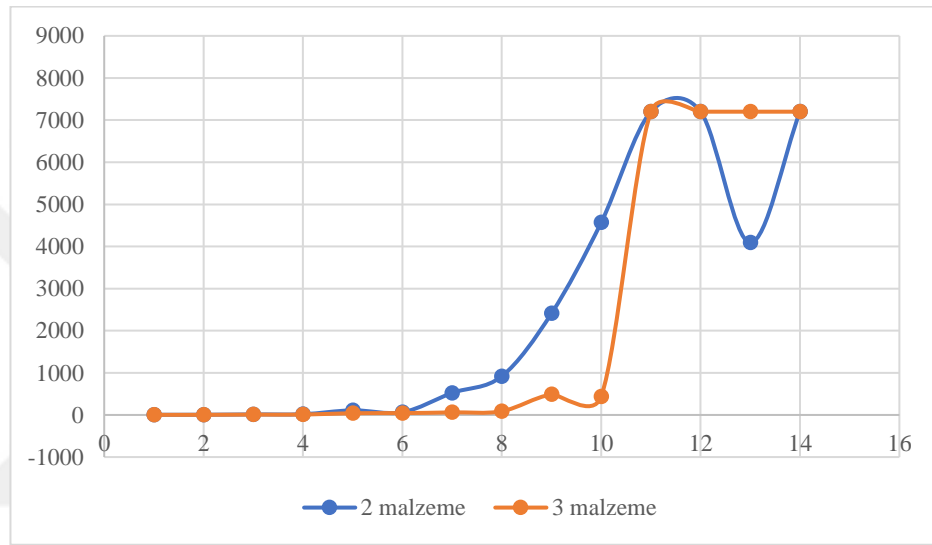
2.2.3. $set_i = \varphi$ saat

Birbirinden farklı malzemeleri aynı yazma tablasında basamayan tek bir Eİ makinası veya kontamine olmayan bitmiş ürünlere ihtiyaç duyulan siparişler için bu senaryoda $set_i = \varphi$ olarak belirlenmiştir. Özellikle tek makina ortamında, daha önce açıklandığı gibi tek nozul nedeniyle malzeme değişimleri kritik bir sorun haline gelmektedir. Ayrıca biyomedikal uygulamalarda parçaların farklı malzemelerden basılması gerektiği durumlarda bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Aynı nozuldan farklı malzemelerin çıkması nedeni ile malzeme geçişleri, yüksek çapraz kontaminasyona neden olur [13]. Öte yandan firmalar, farklı malzemeleri aynı yığında kullanmanın mümkün olmadığı Eİ makinalarına sahip olabilir. Bu durumlarda gelen siparişlerden oluşacak her bir yığın, aynı malzeme türüne sahip işlerden oluşmalıdır. Bu çalışmada önerilen yaklaşım, tek bir Eİ makinasında malzeme benzerliğine bağlı olarak farklı malzemeler içeren siparişlerin yazma tablasında üretimini planlamak isteyen araştırmacılar ve uygulayıcılar için yol gösterici niteliktedir. Bu senaryoda, geliştirilen TSDP modeli, malzeme türlerine dikkat ederek işlerden yığınlar oluşturmaya zorlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için set_i parametresi Eşitlik (10')daki gibi φ olarak güncellenmiştir.

$$SET_j = set_b Z_j + \varphi \sum_{i \in I} d_{ji} \quad \forall j \in J \quad (10')$$

φ katsayısı ile farklı malzeme içeren işlerin aynı yığında olmasından kaynaklanan yığın içi malzeme değişimini engelleyen bir ceza maliyeti oluşturulması hedeflenmiştir. Bu senaryonun bir sonucu olarak tüm d_{ji} değerlerinin sıfır olması beklenir. Öte yandan, malzeme benzerliğine göre yığınların bölünmesi optimal yığın sayısını artırabilir. Örneğin, siparişler 5 çeşit farklı malzemedan oluşuyorsa, her çeşide göre işleri bölmek için en az 5 yığına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu senaryo, oluşturulacak daha fazla yığına bağlı olarak çizelgenin en büyük tamamlanma süresini artırabilir. İlave olarak, baskı alanının (yazma tablasının) verimli kullanımı da azalabilir. Ancak, bu geliştirilen yaklaşım, Eİ makinalarının çok malzemeli baskı yapamaması veya malzeme değişimleri nedeniyle kontaminasyon sorunları istenmeyen ürünlerin basımı için önemli bir stratejidir. j_n için üst sınır, yazdırılacak işlerin içerdiği en büyük malzeme türü sayısı dikkate alınarak seçilmelidir. Ek olarak, Z_j optimum değerini elde etmek için bir gevşeklik gerekmektedir. Örneğin, üretilecek en fazla 3 çeşit birbirine benzemeyen malzemedan oluşan işler bulunduğu, j_n üst sınırı en az 3 olarak belirlenmelidir.

Ancak j_n 'nin üst sınırını malzeme türlerine eşit seçmek, j_n 'de gevşekliğin olmaması nedeniyle zorunlu olarak baskı alanına ürünleri sığdırmayı hedefleyerek malzeme değiştirme kararına katlanmak gibi bazı beklenmedik sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle daha önce tanımlanan tüm üst sınırlar $j_n' = j_n + 2$ olacak şekilde güncellenmiştir. Şekil 9'da gösterildiği gibi $set_i = \varphi$ iken siparişler farklı malzemelerden oluştuğunda hesaplama süreleri artmaktadır.



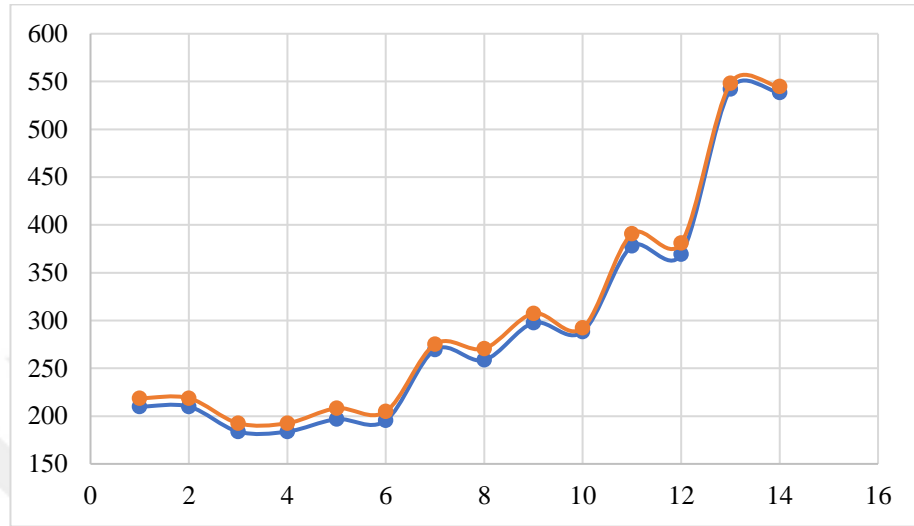
Şekil 9. $set_i = \varphi$ (sa) için matematiksel modele ait hesaplama süreleri (sn.)

Tablo 2 ve Şekil 10 karşılaştırıldığında, parçaların malzeme benzerliğine bağlı olarak yığınlar oluşturulduğunda C_{maks} değerinde artışlar olmaktadır. Bu senaryo, homojen malzeme ile işleri gruplamanın C_{maks} 'ı artırdığını vurgulamaktadır.

Tüm senaryolar arasında en yüksek tamamlanma zamanı değerleri, 3 farklı malzeme türü ile $set_i = \varphi$ iken elde edilmiştir. Aynı zamanda, en büyük yığın sayısı değerleri de 3 farklı tipte malzeme ile $set_i = \varphi$ iken bulunmuştur.

2 ve 3 çeşit malzemeli siparişler için elde edilen en büyük tamamlanma zamanı ve hesaplama sürelerinin sonuçları istatistiksel anlamlılık açısından incelenmiştir. Uygun bir testin seçilmesinden önce, parametrik testlerin önemli varsayımlarından biri olan normallik, Kolmogorov-Smirnov testi ile kontrol edilmelidir. Kolmogorov-Smirnov testinin sonuçları verilerimizin normallik varsayımını sağlamadığını göstermiştir. Ayrıca örneklem büyüklüğü de parametrik testler için çok küçüktür. Bu nedenle “Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek” testi uygulanmıştır. Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek,

bağımlı örnekler için t-testine parametrik olmayan bir alternatif olarak bilinmektedir [41]. Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek testinin sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 10. $set_i = \varphi$ (sa.) için matematiksel modele ait en büyük tamamlanma zamanları (sa)

Tablo 3. 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait C_{maks} ve hesaplama süreleri için Wilcoxon test sonuçları

Wilcoxon test sonuçları	C_{maks}			Hesaplama süreleri		
	T	Z	p değeri	T	Z	p değeri
φ hazırlık süresi-3 malzemeli ve φ hazırlık süresi-2 malzemeli	0	3.30	0.0009	9.1	2.41	0.0159
0.9 hazırlık süresi-3 malzemeli ve 0.9 hazırlık süresi-2 malzemeli	10.5	2.24	0.0254	0	2.80	0.0051
0.3 hazırlık süresi-3 malzemeli ve 0.3 hazırlık süresi-2 malzemeli	8	2.43	0.0150	0	2.67	0.0077

Tablo 3'te vurgulandığı gibi, 2 ve 3 malzeme için tüm hazırlık süresi senaryolarında C_{maks} değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. Bu senaryolarda p değerleri 0.05'ten küçük bulunmuştur. Ayrıca, hesaplama süreleri için de p değerlerinin 0.05'ten küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, hazırlık süresinin hem çizelgenin tamamlanma zamanına hem de hesaplama sürelerine etki ettiğini göstermektedir.

3.BÖLÜM

PROBLEM İÇİN GELİŞTİRİLEN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI

3.1 Farklı Malzemeler İçeren Siparişlerin Tek Eİ Makinasında Çizelgelenmesi için Geliştirilen TB Algoritması

TB meta sezgisel tabanlı bir yerel arama algoritmasıdır ve kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Bu yöntem orijinal olarak metal haddeleme işleminin simüle edilmesini amaçlar [42] ve ilk olarak kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için Kirkpatrick ve ark. [43] tarafından kullanılmıştır.

Algoritmanın adımları kısaca şu şekildedir:

- Adım 1: Başlangıç sıcaklığı T , son sıcaklık T_{min} ve soğuma katsayısı olan τ değerleri belirlenir.
- Adım 2: Rastgele bir başlangıç çözümü oluşturulur.
- Adım 3: Başlangıç çözümü üzerinden değişiklikle yeni bir komşu çözüm oluşturulur.
- Adım 4: Eğer yeni oluşan komşu çözümün, belirlenen amaca göre, maliyeti daha iyi ise komşu çözüm yeni çözüm olarak kabul edilir. Eğer oluşturulan komşu çözüm daha kötü ise 0 – 1 arası rastgele bir sayı belirlenir. Belirlenen sayı $e^{-E/kT}$ değerinden küçük ise yeni çözüm olarak komşu çözüm seçilir.
- Adım 5: Aynı sıcaklıktaki adım sayısı tamamlanana kadar devam edilir, tamamlanınca Adım 3'e geri dönlür.
- Adım 6: Sıcaklık $T = T \times \tau$ denklemi ile güncellenir.

- Adım 7: Sonlandırma kriteri sağlanana kadar devam edilir, sağlanmadığında Adım 3'e dönülür. Sonlandırma kriteri olarak $T < T_{min}$ koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir [44].

TB metal haddeleme işleminin yapay bir taklididir. Algoritma yüksek sıcaklıklarda farklı çözümler arasında serbestçe geçiş yaparken, kötü sonuç verse dahi komşu çözümleri değerlendirir. Sıcaklık azaldıkça ise yeni çözüm daha iyiye kabul edilmekte, kötü çözümlerin kabul edilme ihtimali ise olasılıksal olarak azalmaktadır. Kötü çözümlerin kabulü $e^{-E/kT}$ olasılık dağılımına göre belirlenir. Termal dengedeki bir sistemin T sıcaklığındaki enerjisi olasılıksal olarak dağıtılır. Sistem yüksek sıcaklıklarda herhangi bir enerji durumunda olabilirken, sıcaklık azaldıkça yüksek enerji durumunda olma olasılığı da azalmaktadır [45].

TB algoritması çizelgeleme problemlerinde de sıklıkla tercih edilen bir algoritmadır [46–48]. Algoritmanın adımlarından da anlaşıldığı üzere, algoritmada arama performansını etkileyecek 3 parametre mevcuttur. Bunlar başlangıç sıcaklığı (T), son sıcaklık T_{min} ve soğutma katsayısıdır (τ). Meta sezgisel algoritmalarda parametrelerin doğru tercihi, özellikle problem boyutu büyüdüğünde, daha hızlı ve uygun çözümler elde edebilme açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada parametrelerin doğru seviyelerine karar verebilmek için deney tasarımı yaklaşımından faydalanılmıştır.

Deney tasarımı, parametrelerin olası alternatiflerinin birlikte kullanımı durumunda oluşacak sonuçları verimli bir şekilde organize etmek, yürütmek ve yorumlamak için kullanılan, az sayıda deneme yaparak mümkün olduğunca çok yararlı bilginin elde edilmesini sağlayan bir metodolojidir [49]. Literatürde çok farklı deney tasarımı yaklaşımları bulunmaktadır. Bu yaklaşımların birbirilerine göre üstünlük ve zayıflıkları mevcuttur. Uygun deney tasarımı yaklaşımı, en iyilenecek parametreler ve seviyeleri dikkate alınarak probleme özgü seçilmelidir. Bu yaklaşımlardan biri olan ve kullanımı oldukça kolay ve yaygın olan Taguchi deney tasarımı, minimum sayıda deneyle optimizasyona izin veren benzersiz ve güçlü bir optimizasyon disiplindir [50]. Taguchi deney tasarımı yaklaşımının diğer yöntemlere göre avantajları, çok sayıda faktörün aynı anda optimize edilebilmesi ve daha az deneysel denemeden daha fazla nicel bilginin çıkarılabilmesidir [51]. Taguchi deney tasarımı yaklaşımında, istenen yanıtı (response) elde edebilmek adına, yanıtı etkileyen parametreleri (faktörleri) belirlemek ve bu

parametreleri optimize etmek için bir deney seti oluşturmak gerekmektedir. Oluşan deney seti, seçilen faktörlere ve seviyelerine göre şekillenir. Taguchi deney tasarımı yaklaşımında oluşan deney setine ortogonal dizi denir ve ortogonal dizilerin çıktısı, yanıtların sinyal-gürültü oranına (S/N) göre optimize edilir, böylece proses değişkenliği azaltılır [51]. Sinyal/gürültü (S/N) oranı, kontrol faktörlerine karşı sağlamlık ölçümü sağlayan bilgidir. Ayrıca, sağlamlık ölçüsü aslında yanıtların istenen değerden sapmasının da bir ölçüsüdür [50]. S/N oranında "sinyal" ortalama değeri ifade ederken, "gürültü" standart sapma terimini gösterir. Taguchi deney tasarımında S/N oranı maksimize edilerek süreçteki değişkenliğin azaltılması hedeflenir.

Çalışmada matematiksel modelde olduğu gibi 3 boyutlu yazıcı tipine göre malzeme değişiminin zor ve kolay olduğu senaryolar (0.3 ve 0.9 hazırlık süreleri) ile malzeme değişimine hiç izin verilmeyen senaryo ele alınmıştır. TB algoritması için Python programlama dili kullanılarak yazılan kod temelde 4 bölümden oluşmaktadır; maliyet fonksiyonu, başlangıç çözümü fonksiyonu, komşu çözüm oluşturma fonksiyonu ve TB fonksiyonudur. Ayrıca, malzeme değişiminin mümkün olmadığı senaryo için başlangıç, komşu çözüm oluşturma ve maliyet hesaplama fonksiyonlarının bu duruma özgü yazılması gerekmektedir.

3.1.1. Maliyet fonksiyonu

Önerilen TB algoritması için amaç, çizelge için en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir. Her bir yığında belirli işlerin üretimi yapılacaktır. Gelen siparişler için başlangıç tamamlanma zamanı 0 kabul edilir. Daha sonra sırası ile her yığını oluşturan işler baz alınarak ilgili yığının işlem süresi bulunur. İlgili yığının başlangıç zamanı ve işlem süresinin toplamı, o yığın için tamamlanma zamanını verir. Algoritmada amacımız bu tamamlanma zamanlarından en büyüğünün en küçüklenmesidir. Maliyet fonksiyonu hesaplama prosedürüne ait adımlar şu şekildedir:

1. Başlangıç hacmini 0'a eşitle ve aynı yığında bulunan işlerin toplam hacimlerini bul.
2. Yığınlara ait toplam hacimleri VT değeri ile çarparak EI makinasının birim hacmi oluşturmak için harcadığı süreyi hesapla.
3. Tüm yığınları göz önünde bulundurarak en büyük yüksekliğe sahip işi bul.

4. En büyük yüksekliğe sahip işin yükseklik değeri ile HT değerini çarparak Eİ makinasının birim yüksekliği yazma hızına bağlı yazma zamanını hesapla.
5. Yüksekliğe bağlı yazma zamanını ve hacme bağlı yazma zamanını toplayarak her yığın için işlem sürelerini hesapla.
6. Yığınlar içinde malzeme değişimi olup olmadığını tespit et.
7. Malzeme değişimi varsa malzeme değişim sayısını yığın bazlı kaydet.
8. Eİ makinasının farklı malzemededen oluşan siparişleri üretebilme kolaylığına göre hazırlık süreleri ile malzeme değişim sayılarını çarp.
9. Her bir yığın için ön işlemlerden kaynaklanan hazırlık sürelerini ve malzeme değişiminden kaynaklanan hazırlık sürelerini topla.
10. Her yığın için işlem sürelerini ve toplam hazırlık süresini toplayarak toplam süreyi bul.
11. Çizelgenin başlangıç zamanını 0'a eşitle.
12. Sırası ile yığınların toplam sürelerini ilgili yığının başlangıç zamanına ekleyerek yığınların tamamlanma zamanlarını bul.
13. Tamamlanma zamanlarından en büyük olanı seç.

Ancak hazırlık süresinin φ olduğu, farklı malzeme içeren işlerden oluşan yığınların mümkün olmadığı senaryo için, malzeme değişim sayısı büyük bir sayı ile çarpılarak ceza maliyeti oluşturulmuştur. Ek 2 ve 3'te maliyet fonksiyonu için yazılan Python kodları sunulmuştur.

3.1.2. Başlangıç çözümü fonksiyonu

Ele alınan problemi TB algoritması ile çözmek için öncelikle iyi bir başlangıç çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. İyi bir başlangıç çözümü ile çözüm uzayında arama yapmaya başlamak, daha hızlı sonuç alınmasına olanak sağlamaktadır. Matematiksel modelde gösterildiği gibi problemde yığın içi malzeme değişimine izin verildiği senaryolarda malzeme değişim sayısı dolaylı olarak minimize edilmektedir. Bu nedenle, yazma tablasının alan kısıtı dikkate alınarak yığınları benzer malzemeli işlerden oluşturmanın başlangıç çözümü elde etmek için iyi bir sezgisel yaklaşım olacağı düşünülmüştür. Başlangıç çözümü fonksiyonu için yazılan Python kodları Ek 4 ve 5'te sunulmuştur.

Başlangıç çözümü elde etmek için geliştirilen prosedürün adımları aşağıda belirtilmiştir;

1. İşler malzeme tipine göre sıraya konulur.
2. Bir yığında makinada yazılacak işleri bulmak için ilgili yığının başlangıç alanı 0'a eşitlenir.
3. Sırası ile işler yığına eklenmeye başlanır. Eklenen işlerin toplam alanı yazıcı tablasının alanına eşit veya küçük olduğu sürece o yığına malzeme tipine göre sıralanmış iş dizisinden yeni işlerin atanmasına devam edilir.
4. Yazıcı tablasının alan büyüklüğü ihlal edilince yeni yığın açılır.
5. Bütün işler atanıncaya kadar döngü devam eder.

Yığın içi malzeme değişiminden kaynaklı hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için başlangıç çözümü olarak, önerilen prosedür kullanılmıştır. Görüldüğü üzere algoritmadaki yaklaşımda yığınlarda malzemelerin homojen olma zorunluluğu yoktur. Ancak hazırlık süresinin φ olduğu, farklı malzemeli yığınların mümkün olmadığı senaryo için 3. adım aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

- 3'. Sırası ile aynı malzeme tipinden işler yığına eklenmeye başlanır. Eklenen işlerin toplam alanı yazıcı tablasının alanına eşit veya küçük olduğu sürece o yığına benzer malzeme tipine göre sıralanmış iş dizisinden yeni işlerin atanmasına devam edilir.

Ek 4 ve 5'te hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için ve hazırlık süresinin φ olduğu senaryo için yazılan başlangıç çözümü fonksiyonu sunulmaktadır.

3.1.3. Komşu çözüm oluşturma fonksiyonu

Meta sezgisel algoritmalar, üretilen komşu çözümlerle çözüm uzayında daha iyi bir noktaya ilerlemeyi hedeflemektedir. Mevcut çözüm üzerinden çeşitli yöntemlerle (araya ekleme, karşılıklı yer değiştirme vb.) değişimler yapılarak yeni bir çözüm elde edilmesi ve bu çözümün uygunluk kontrolünün sağlanmasının ardından, mevcut çözümün belli kriterler baz alınarak güncellenip güncellenmeyeceği kararının verilmesi gerekmektedir. Komşu çözüm elde edilirken temel nokta, başlangıç çözümü üzerinde yapılacak değişiklikten sonra elde edilen çözümün uygun bir çözüm olmasıdır. Örneğin başlangıç çözümünde 1. yığında bulunan 2. iş ve 3. yığında bulunan 5. iş yer değiştirerek komşu çözümde 5. iş 1. yığında, 2. iş ise 3. yığında yer alacaktır. Ancak yapılan bu değişimden hemen sonra elde edilen çözümün uygunluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu

çalışmada, uygun çözümden kastedilen yapılan değişiklik sonrası yığınlarda bulunan işlerin toplam alanının yazıcının yazma tablasının alanından küçük veya küçük eşit olma kuralının sağlanmasıdır. Bu nedenle rassal yapılan yer değiştirme işleminden sonra, ilk olarak çözümün uygunluğu kontrol edilmektedir. Uygun bir komşu çözüm elde edilmedi ise rassal yer değiştirme işlemi mevcut çözüm üzerinden uygun bir komşu çözüm elde edilene kadar devam etmelidir. Ayrıca farklı malzemelerin bir arada üretilmediği senaryoda uygun çözümün aynı zamanda homojen malzeme tipi içeren yığınlardan oluşması da gerekmektedir.

Geliştirilen TB algoritmasında komşu çözüm oluştururken ilk olarak rassal belirlenen 2 iş karşılıklı yer değiştirir. Bu işlemden hemen sonra yeri değişen işlerin bulunduğu yığınların yazma tablasının kullanılabilir alanına sığıp sığmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yazma tablasının alanı aşılmışsa bu çözüm uygun bir çözüm olarak kabul edilemez. Yazma tablasının alanından daha küçük veya eşit alana sahip yığınlar oluştuğunda, bu çözüm olası komşu çözüm olarak belirlenir. Olası komşu çözüm üzerinde her bir yığın için boş alanlar hesaplanır. Ardından olası komşu çözümden rastgele bir iş seçilerek, seçilen iş kendi yığınının dışındaki yığınlardan rastgele seçilen bir yığına eklenir. Araya ekleme işlemi sırasında eklenecek işin alanının rastgele seçilen yığının boş alanından küçük veya eşit olması gerekmektedir. Ayrıca her araya ekleme işleminden sonra işlerin değişiminden kaynaklı olarak yığınların ardışık numaralandırılmasının bozulup bozulmadığı kontrol edilmelidir. Örneğin, 3. yığında yer değiştirme sonrası 2 iş olsun ve araya ekleme işlemi sonucunda bu 2 işin de dahil olduğu yığınlar değişmiş olsun; bu durumda 3. yığında eleman kalmayacaktır. Bu nedenle diğer yığınların numaralarının ardışık olacak şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

Geliştirilen komşu çözüm fonksiyonunun adımları aşağıda belirtilmiştir;

1. Başlangıç çözümü üzerinden rastgele iki iş seç.
2. Eğer seçtiğin işler aynı ise, seçilen işler birbirinden farklı olana kadar rastgele iş seçmeye devam et.
3. Yeri değişen işlere göre oluşan olası çözüm için yığınlara ait toplam alanları hesapla.

4. Toplam yığın alanları yazıcı tablası alanını aşıyorsa çözüm uygun değildir. Adım 1'e dön ve tekrar rastgele iki iş seçimi yap.
5. Toplam yığın alanlarının yazıcı tablası alanını aşmadığı bir çözüm bulana kadar devam et.
6. Yazıcı tablası alanının aşılmadığı çözüm olası uygun çözümdür.
7. Olası uygun çözüm için rassallığı artırmak adına rastgele bir iş seç.
8. Rastgele işin bulunduğu yığının dışındaki yığınlardan herhangi birini rastgele seç.
9. Seçtiğin işin alanı eğer seçtiğin yığının boş alanına eşit veya küçükse bu işi o yığına ekle.
10. Yığınlardaki işleri kontrol et. Eğer araya ekleme işleminden kaynaklı herhangi bir yığında iş kalmamış ise yığın numaralarını ardışık olacak şekilde güncelle.
11. İşleri yığınlarda malzeme tipine göre sıraya diz.
12. Yığın alanlarını güncelle.

Komşu çözüm fonksiyonu üzerinde farklı malzemelerden oluşan işlerin aynı yazıcı tablasında üretilemediği senaryo için değişiklikler yapılmıştır. Bu güncelleme karşılıklı yer değiştirme mekanizmasının ve araya ekleme mekanizmasının olduğu kısımdadır. Adım 2 ve Adım 9'un bu senaryoya uyarlanmış halleri şu şekildedir:

2'. Eğer seçtiğin işler aynı malzeme tipinden değilse ise, aynı malzeme tipinden olan iki işi seçene kadar rastgele iş seçmeye devam et.

9'. Seçtiğin işin alanı eğer seçtiğin yığının boş alanına eşit veya küçükse ve seçilen işin malzeme tipi rastgele seçilen yığının malzeme tipi ile aynı ise bu işi o yığına ekle.

Ek 6 ve Ek 7'de hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için ve hazırlık süresinin ϕ olduğu senaryo için yazılan komşu çözüm fonksiyonları sunulmaktadır.

3.1.4. Tavlama Benzetimi algoritması

Başlangıç çözümü fonksiyonu, maliyet hesaplama fonksiyonu ve komşu çözüm oluşturma fonksiyonu çağırılarak Tavlama Benzetimi algoritması aracılığı ile tamamlanma zamanının en küçük olduğu üretim çizelgeleri hesaplanmıştır. TB'ye ait yalancı kod şu şekildedir:

Başlangıç durumu belirle: *başlangıç_çözüm*, T_{min} T ve τ

Çıktı: *en_iyi_çözüm*

$\Delta = 0$; *mevcut_çözüm*, *en_iyi_çözüm* = *başlangıç_çözüm*; $T = T_0$

mevcut_çözüm_kalitesi, *en_iyi_çözüm_kalitesi* = *maliyet(başlangıç_çözüm)*

$T > T_{min}$ olduğu sürece döngüyü devam ettir

yeni_çözüm = *komşu_çözüm_fonksiyonu(mevcut_çözüm)*

$\Delta = \textit{maliyet}(\textit{yeni_çözüm}) - \textit{mevcut_çözüm_kalitesi}$

Eğer ($\Delta > 0$) veya $e^{-\frac{\Delta}{\tau}} > \textit{rand}(0,1)$) ise

mevcut_çözüm = *yeni_çözüm*

mevcut_çözüm_kalitesi = *mevcut_çözüm_kalitesi* + Δ

Eğer koşulunu sonlandır

Eğer ($\Delta < 0$) ise

en_iyi_çözüm = *mevcut_çözüm*

en_iyi_çözüm_kalitesi = *mevcut_çözüm_kalitesi*

Eğer koşulunu sonlandır

$T \leftarrow T \times \tau$

döngüyü sonlandır

TB algoritmasına ait yalancı koddan da anlaşıldığı üzere algoritma performansına etki edebilecek 3 parametre mevcuttur. Bu çalışmada TB algoritmasına ait 3 parametre için literatürde en çok tercih edilen 3 seviye belirlenmiş ve bu parametreler için optimum seviyeler bulunmuştur. Deney tasarımında çıktı üzerindeki etkisi araştırılan

parametrelere “faktör” ve çıktılara ise “yanıt” denilmektedir. Deney tasarımı uygulaması MİNİTAB 17 İstatistik Yazılımı ile yapılmıştır. 3 faktör ve bu faktörlere ait 3 seviye için oluşan L9 Taguchi ortogonal deney seti Tablo 4’teki gibidir.

Tablo 4. L9 Taguchi ortogonal deney seti

Deney No	T_0	T_{min}	τ
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Faktörler ve seçilen seviyelere göre deney setinin dönüşüm yapılmış hali Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Dönüştürülmüş Taguchi deney seti

Deney No	T_0	T_{min}	τ
1	100	0.1	0.85
2	100	1	0.90
3	100	10	0.95
4	500	0.1	0.90
5	500	1	0.95
6	500	10	0.85
7	1000	0.1	0.95
8	1000	1	0.85
9	1000	10	0.90

Literatürde tek Eİ makinası için çizelgeleme problemlerinde kullanılan 14 farklı veri seti için Taguchi deney setine ait sonuçlar, Python programlama dilinde yazılan TB algoritması kodu çalıştırılarak elde edilmiştir. Yazılan kod, Google tarafından geliştirilen ve tarayıcılardan kurulum yapmaksızın Python’ı yazmayı ve çalıştırmayı sağlayan Colaboratory’de çalıştırılmıştır. Her bir senaryoda tüm veri setleri için 5 tekrar yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Ardından yapılan analizler ile TB algoritmasının

hangi parametrelerinin hangi seviyelerinin hangi senaryo için daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Taguchi $L9$ deneylerine ait sonuçlar Ek 9'da verilmektedir. Optimum seviyelerin belirlenmesi ve faktörlerin önem sıralarının tespiti için yapılan Taguchi analizinin sonuçları her bir senaryo için ayrı ayrı ele alınmıştır. Taguchi deney tasarımında deneylerin sonuçları S/N oranına dönüştürülerek değerlendirilir. Hedeflenen yanıt değerine göre S/N oranı en büyük en iyi, nominal en iyi ve en küçük en iyi olmak üzere 3 farklı şekilde hesaplanır ve analiz edilir. Çalışmada amaç fonksiyonunun maksimum tamamlanma zamanının en küçüklenmesi olması nedeni ile “en küçük en iyi (smaller the better)” seçeneği tercih edilmiştir. S/N oranı için kullanılan formül şu şekildedir:

$$S/N = -10 \times \log(\Sigma(Y^2)/n) \quad (13)$$

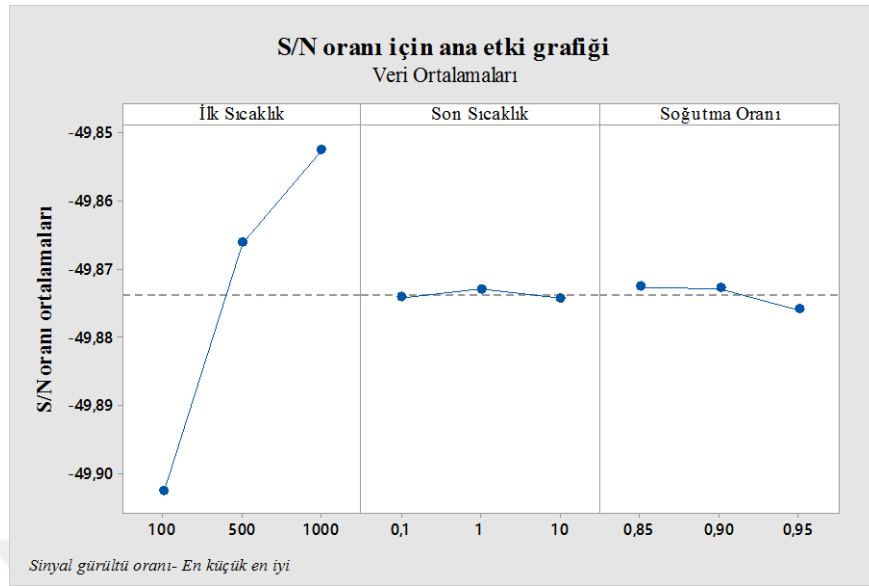
3.2. Taguchi deney tasarımı sonuçları

3.2.1. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi baz alınarak 9 deney 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 6'da S/N oranı, Tablo 7'de ortalamalar ve Tablo 8'de standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

Tablo 6. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

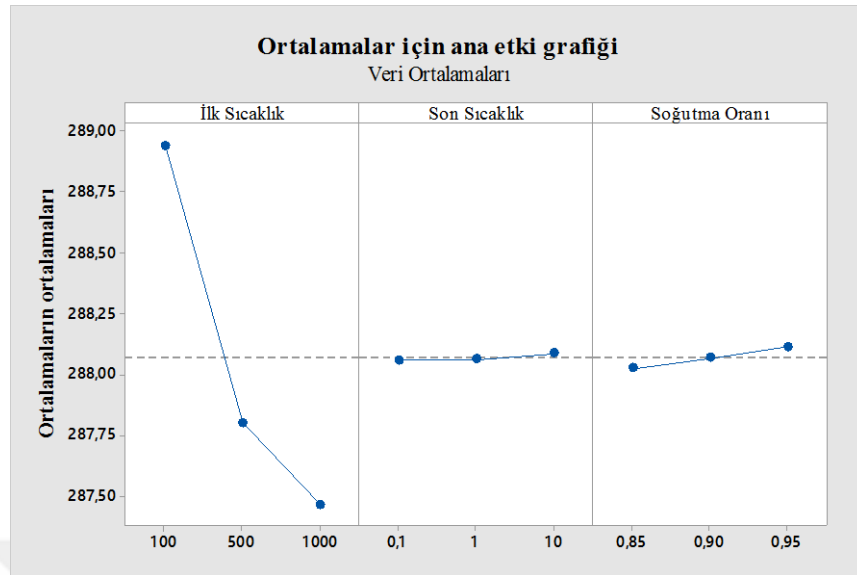
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-49.9	-49.87	-49.87
2	-49.87	-49.87	-49.87
3	-49.85	-49.87	-49.88
Delta	0.05	0.00	0.00
Sıralama	1	3	2



Şekil 11. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği

Tablo 7. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

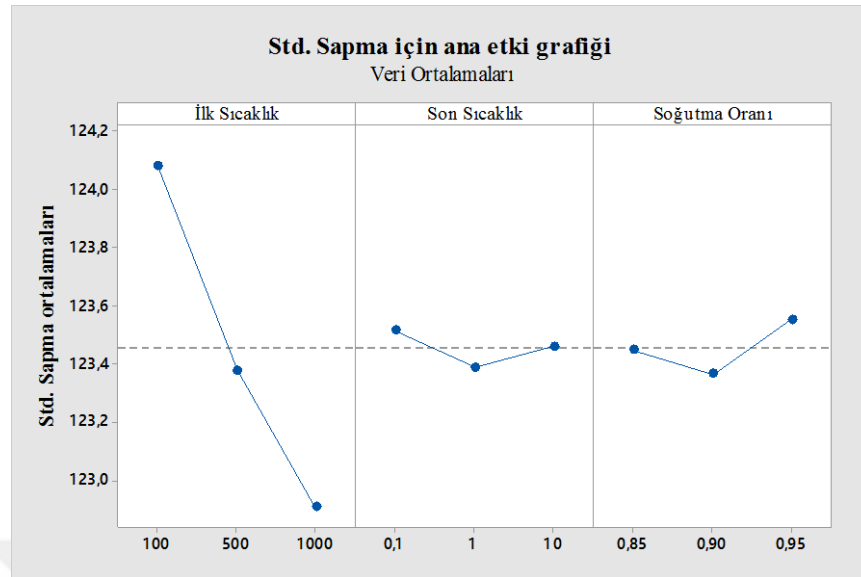
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	288.9	288.1	288.0
2	287.8	288.1	288.1
3	287.5	288.1	288.1
Delta	1.5	0	0.1
Sıralama	1	3	2



Şekil 12. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 8. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	124.1	123.5	123.4
2	123.4	123.4	123.4
3	122.9	123.5	123.6
Delta	1.2	0.1	0.2
Sıralama	1	3	2



Şekil 13. 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

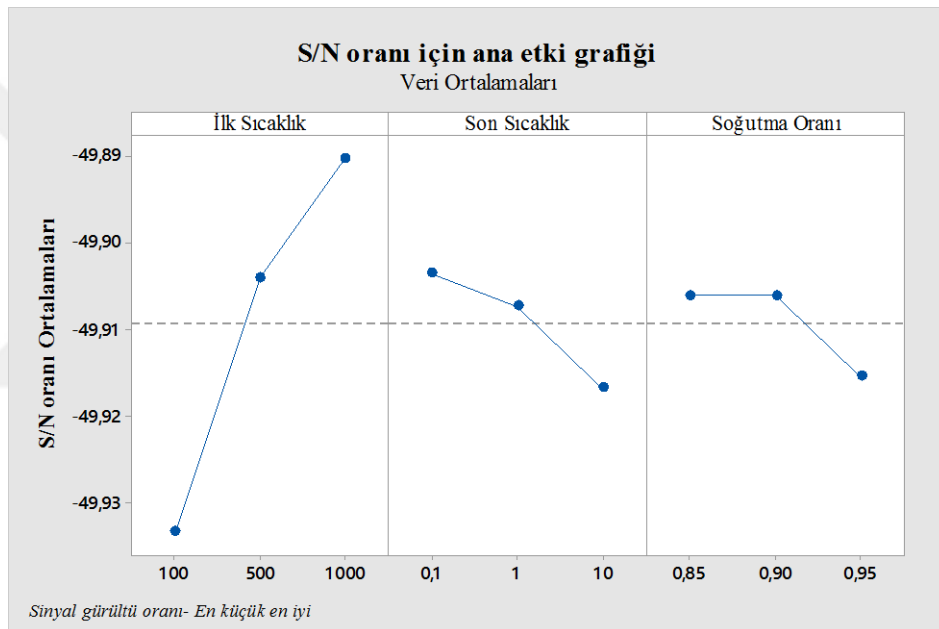
Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi için en önemli TB parametresi başlangıç sıcaklığı olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile soğutma oranı ve son sıcaklık gelmektedir. S/N oranında, analiz için tercih edilen “en küçük en iyi” kuralı gereği negatif olmayan sıfır hedef değeri istenmektedir. Bu durumda S/N tablosundan optimum seviyeleri belirlediğimizde başlangıç sıcaklığı için 3. Seviye (1000) optimum olarak bulunur. Ana etki grafiğinden ve sıralamalardan anlaşıldığı üzere, son sıcaklık ve soğutma oranının etkisi nerede ise yoktur. Bu nedenle bu iki parametre için seviyeler sırası ile 2 (1) ve 1 (0.90) olarak belirlenmiştir.

3.2.2. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi baz alınarak 9 deney 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 9’da S/N oranı, Tablo 10’da ortalamalar ve Tablo 11’de standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16’da sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

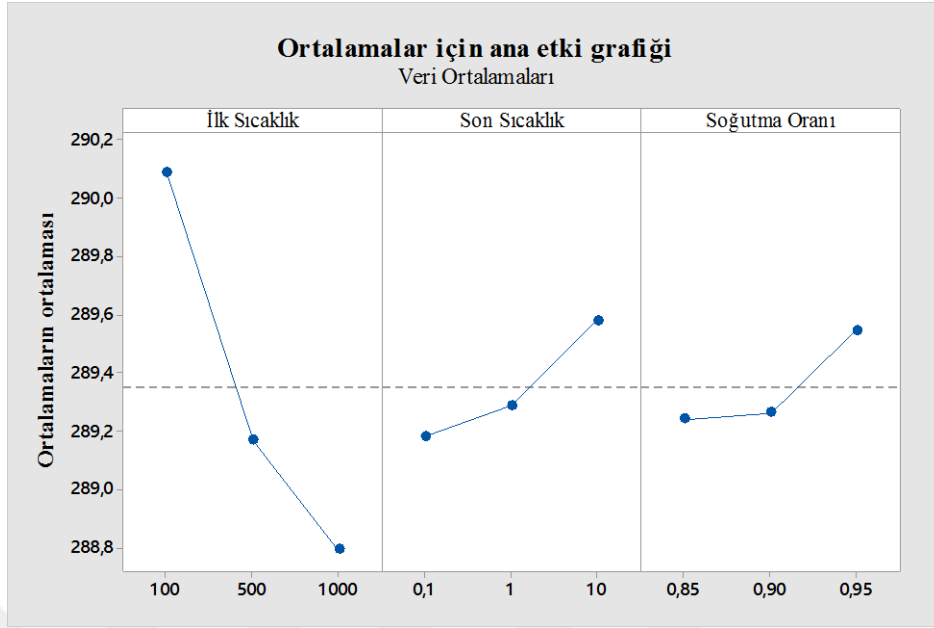
Tablo 9. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-49.9	-49.9	-49.9
2	-49.9	-49.9	-49.9
3	-49.8	-49.9	-49.9
Delta	0.04	0.01	0.01
Sıralama	1	2	3

Şekil 14. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği

Tablo 10. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	290.1	289.2	289.2
2	289.2	289.3	289.3
3	288.8	289.6	289.5
Delta	1.3	0.4	0.3
Sıralama	1	2	3

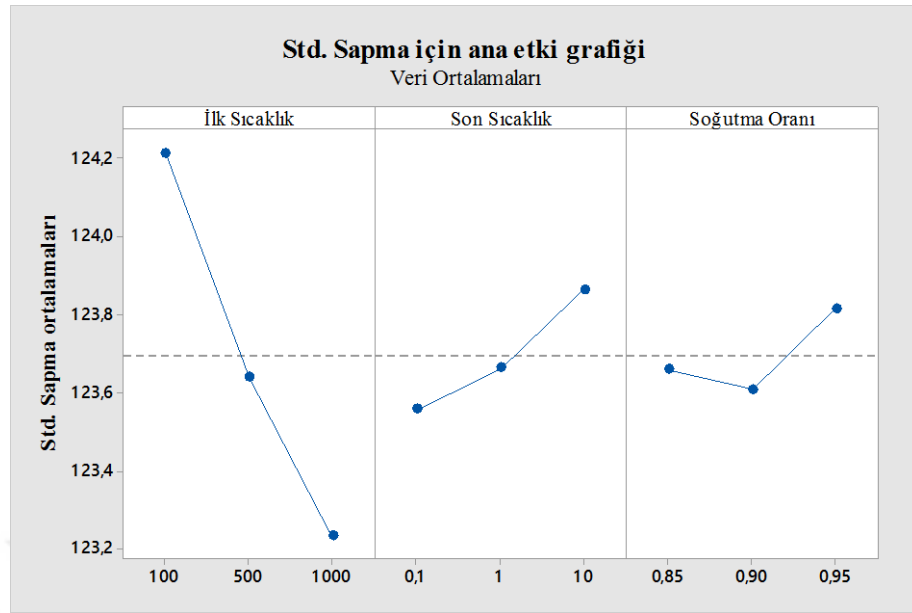


Şekil 15. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 11. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	124.2	123.6	123.7
2	123.6	123.7	123.6
3	123.2	123.9	123.8
Delta	1	0.3	0.2
Sıralama	1	2	3

Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için en önemli TB parametresi başlangıç sıcaklığı olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile son sıcaklık ve soğutma oranı gelmektedir. *S/N* tablosu yardımı ile optimum seviyeleri belirlediğimizde başlangıç sıcaklığı için 3. Seviye (1000) optimum bulunur. Son sıcaklık ve soğutma oranının etkisi nerede ise yoktur. Bu nedenle bu iki parametre için ortalamalar ve standart sapmalara ait tabloların da yardımı ile seviyeler 1 (0.1 ve 0.85) olarak belirlenmiştir.



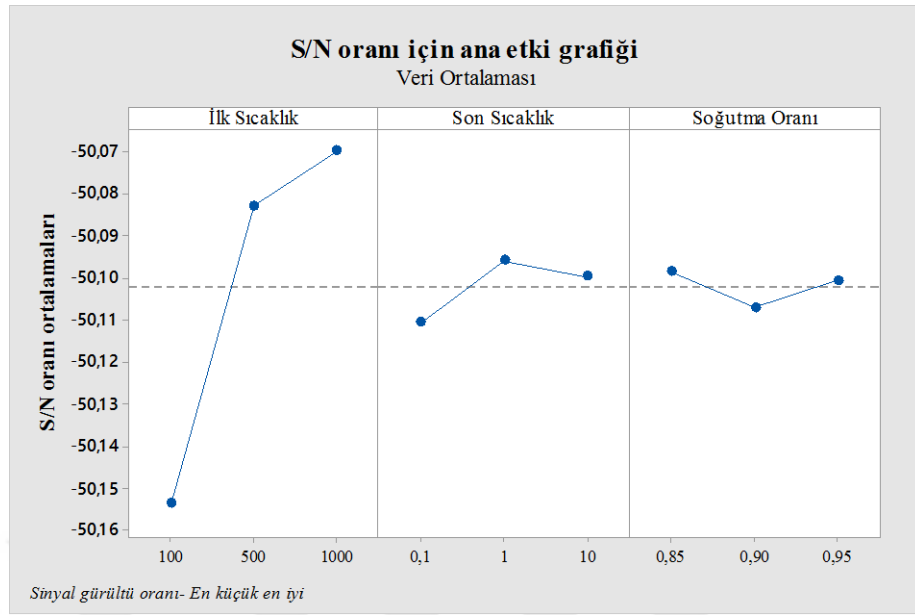
Şekil 16. 2 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

3.2.3.2 malzeme- ϕ hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

2 malzeme- ϕ hazırlık süresi baz alınarak 9 deney seti 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 12’de S/N oranı, Tablo 13’te ortalamalar ve Tablo 14’te standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19’de sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

Tablo 12. 2 malzeme- ϕ hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

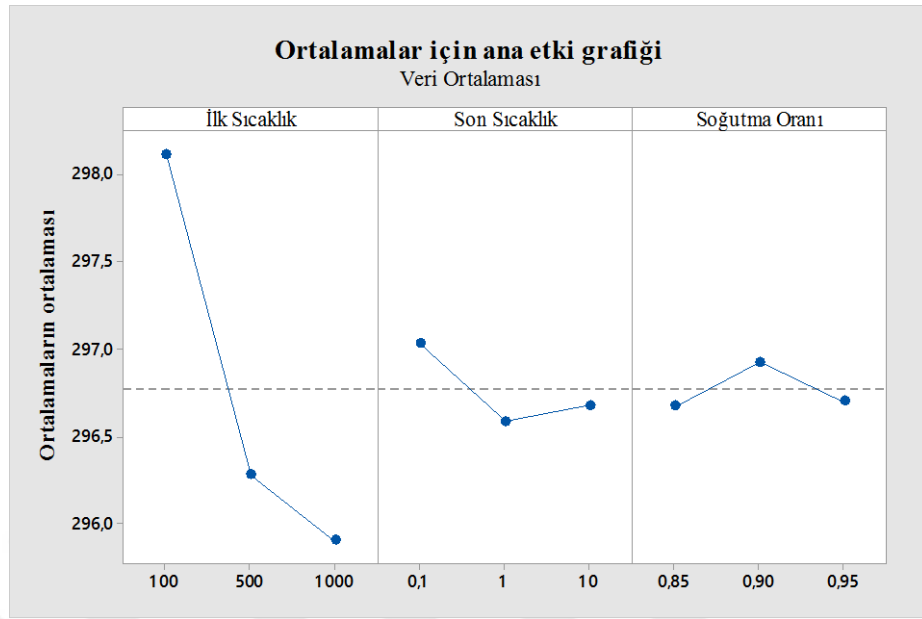
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-50.15	-50.11	-50.09
2	-50.08	-50.09	-50.1
3	-50.06	-50.09	-50.1
Delta	0.1	0.02	0.01
Sıralama	1	2	3



Şekil 17. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği

Tablo 13. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

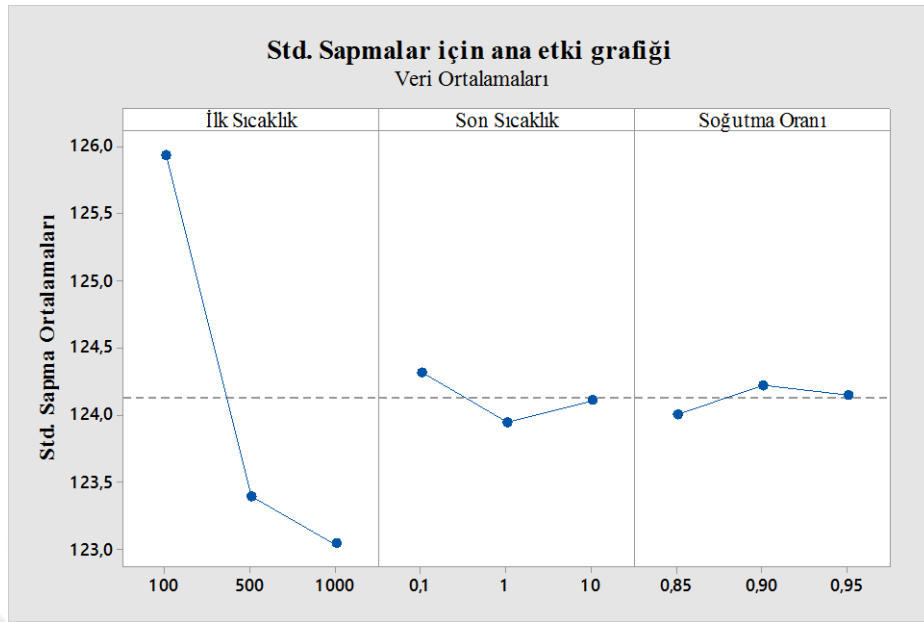
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	298.1	297	296.5
2	296.3	296.4	296.7
3	295.5	296.5	296.7
Delta	2.6	0.7	0.3
Sıralama	1	2	3



Şekil 18. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 14. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	125.9	124.4	123.8
2	123.4	123.7	124
3	122.7	123.9	124.2
Delta	3.3	0.6	0.4
Sıralama	1	2	3



Şekil 19. 2 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

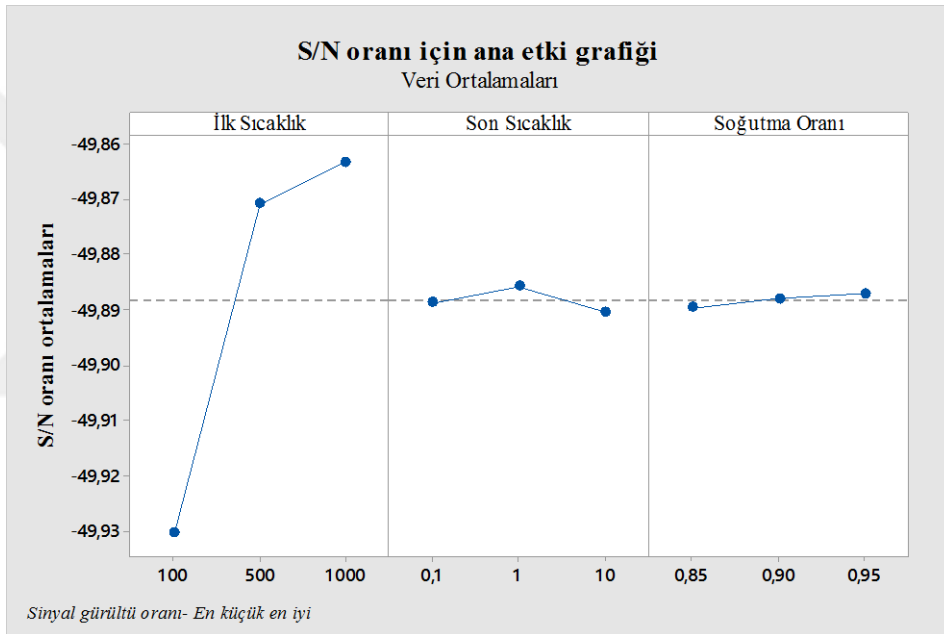
Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 2 malzeme- φ hazırlık süresi için en önemli TB parametresi başlangıç sıcaklığı olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile son sıcaklık ve soğutma oranı gelmektedir. S/N tablosu ve S/N ana etki grafiği yardımı ile optimum seviyeleri belirlediğimizde başlangıç sıcaklığı için 3. seviye (1000) optimum bulunur. Son sıcaklık ve soğutma oranının etkisi nerede ise yoktur. Bu nedenle bu iki parametre için ortalama ve standart sapma tablolarının yardımı ile optimum seviyeler sırası ile 2 (1) ve 1 (0.85) olarak belirlenmiştir.

3.2.4. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi baz alınarak 9 deney 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 15'te S/N oranı, Tablo 16'da ortalamalar ve Tablo 17'de standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22'de sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

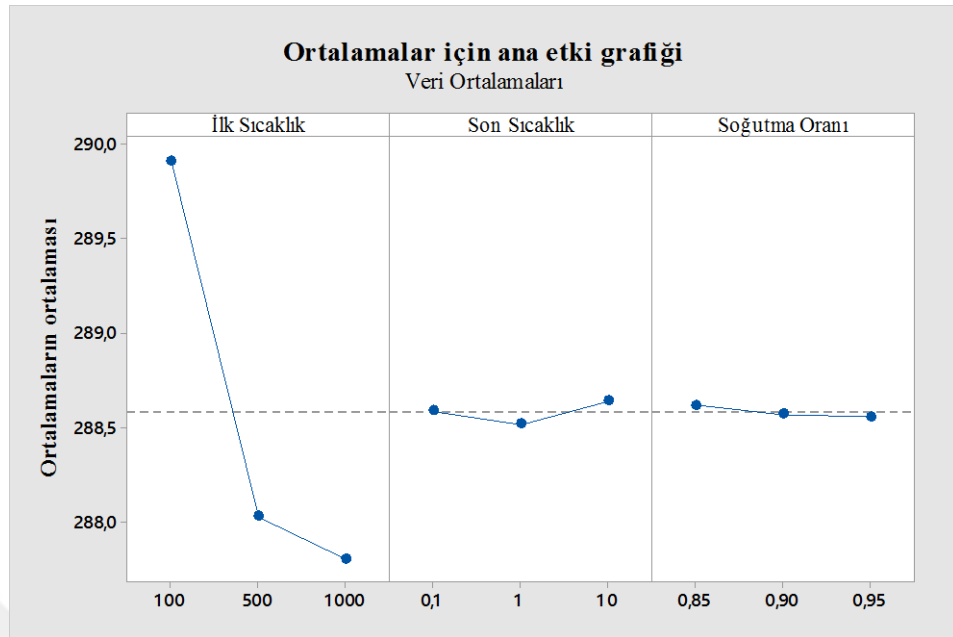
Tablo 15. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-49.93	-49.89	-49.89
2	-49.87	-49.89	-49.89
3	-49.86	-49.89	-49.89
Delta	0.07	0	0
Sıralama	1	2	3

Şekil 20. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği

Tablo 16. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

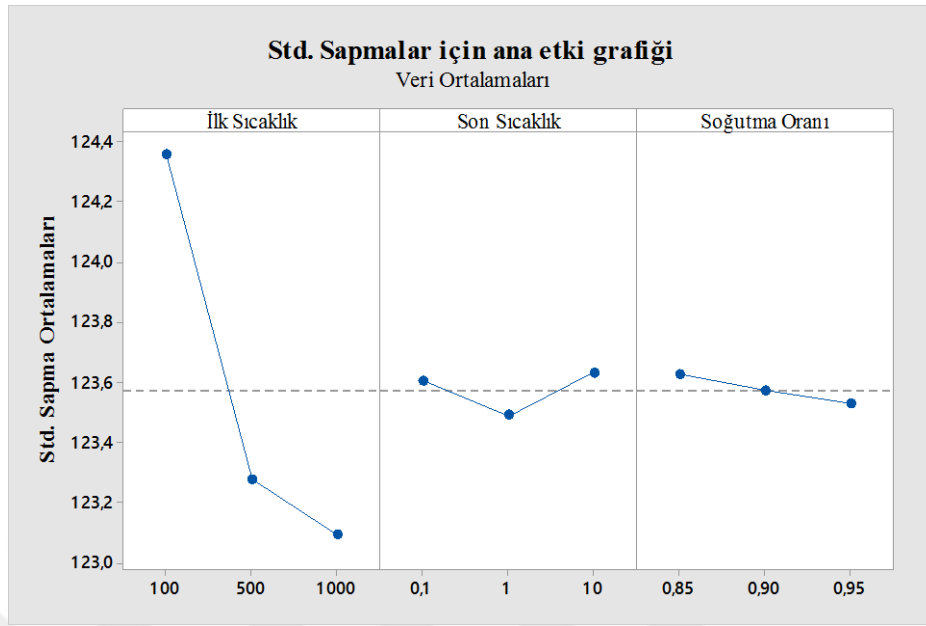
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	289.9	288.6	288.6
2	288.0	288.5	288.6
3	287.8	288.6	288.6
Delta	2.10	0.1	0.1
Sıralama	1	2	3



Şekil 21. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 17. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart Sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	124.4	123.6	123.6
2	123.3	123.5	123.6
3	123.1	123.6	123.5
Delta	1.3	0.1	0.1
Sıralama	1	2	3



Şekil 22. 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

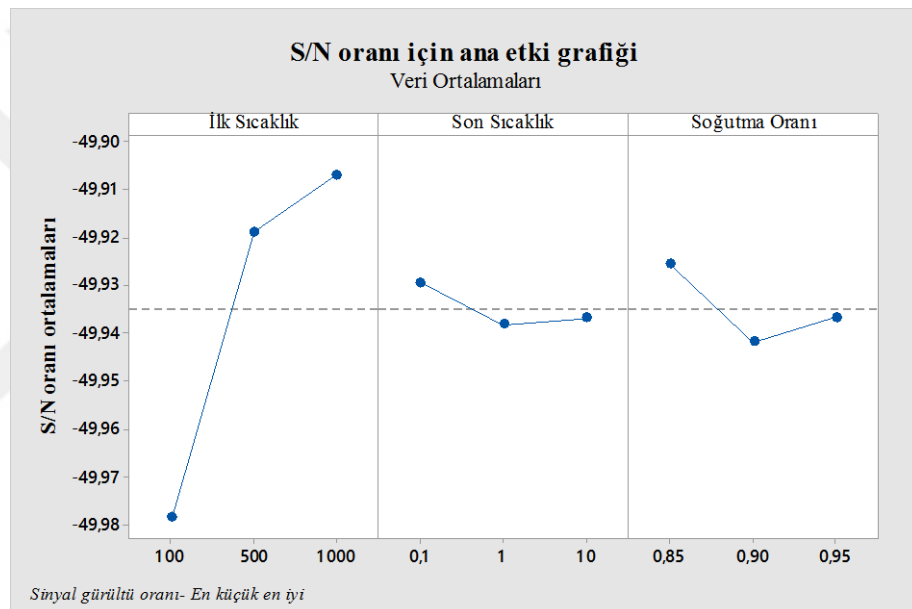
Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi için en önemli TB parametresi başlangıç sıcaklığı olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile son sıcaklık ve soğutma oranı gelmektedir. S/N tablosundan optimum seviyeleri belirlediğimizde başlangıç sıcaklığı için 3. Seviye (1000) optimum olarak bulunur. Son sıcaklık ve soğutma oranının bu senaryoda etkisi nerede ise yoktur. Bu nedenle bu iki parametre için seviyeler ortalamalar ve standart sapmalar tablolarının yardımı ile sırası ile 2 (1) ve 1 (0.85) olarak belirlenmiştir.

3.2.5. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi baz alınarak 9 deney 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 18'de S/N oranı, Tablo 19'da ortalamalar ve Tablo 20'de standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'te sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

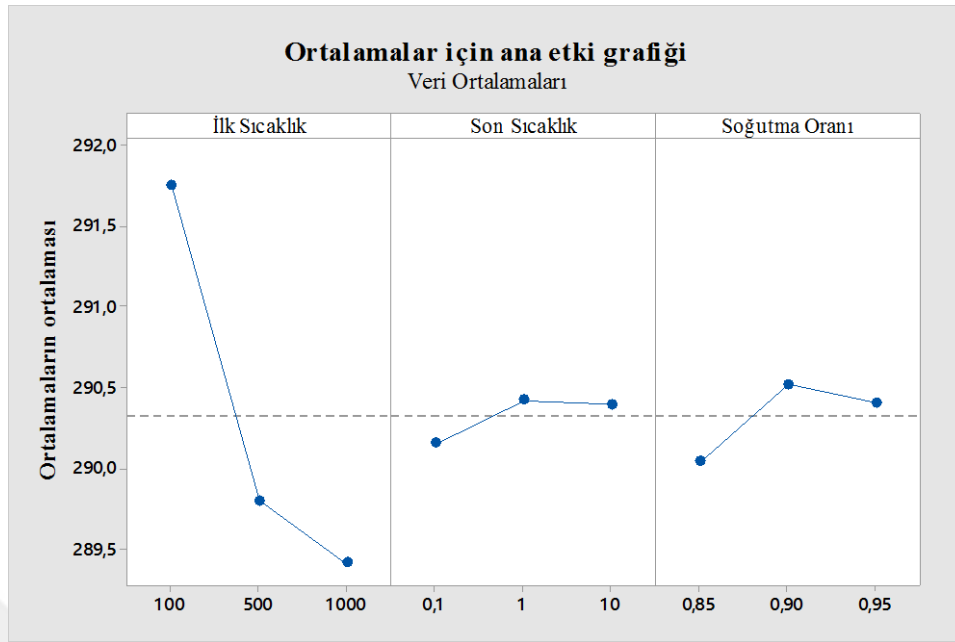
Tablo 18. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-49.98	-49.93	-49.93
2	-49.92	-49.94	-49.94
3	-49.91	-49.94	-49.94
Delta	0.07	0.01	0.02
Sıralama	1	3	2

Şekil 23. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiği

Tablo 19. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

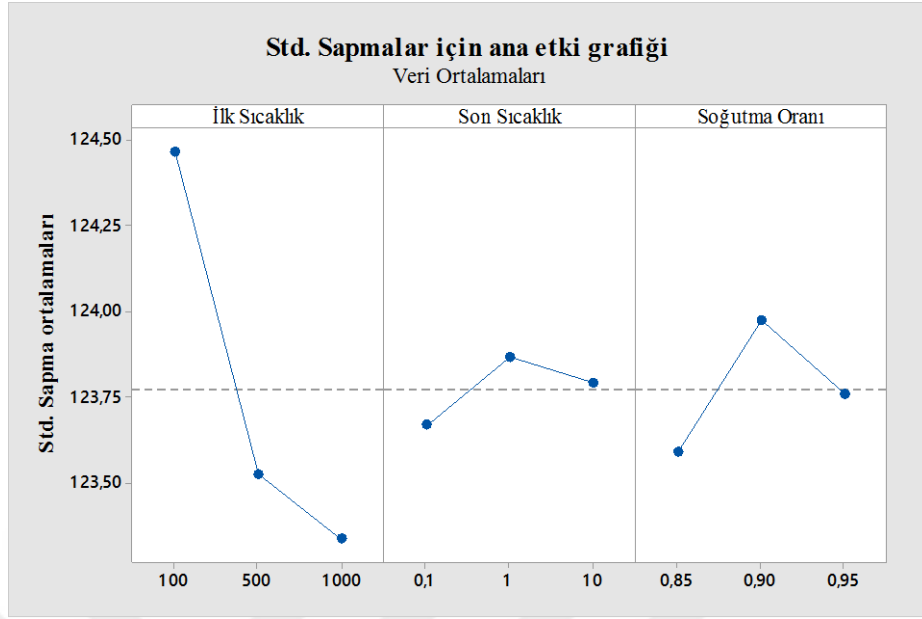
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	291.8	290.2	290
2	289.8	290.4	290.5
3	289.4	290.4	290.4
Delta	2.3	0.3	0.5
Sıralama	1	3	2



Şekil 24. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 20. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	124.5	123.7	123.6
2	123.5	123.9	124
3	123.3	123.8	123.8
Delta	1.1	0.2	0.4
Sıralama	1	3	2



Şekil 25. 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

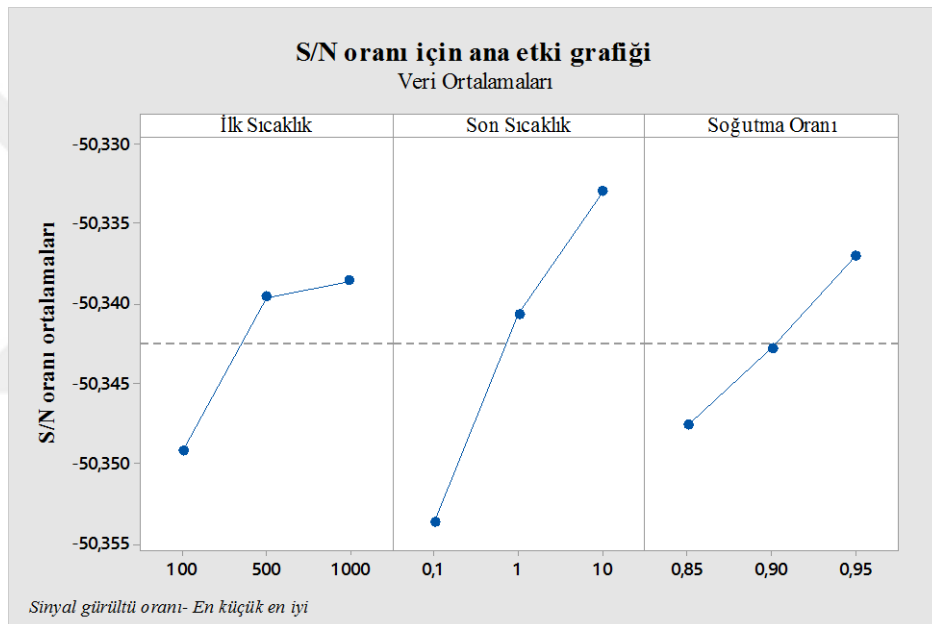
Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi için Tavlama Benzetimi parametresi başlangıç sıcaklığı olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile soğutma oranı ve son sıcaklık gelmektedir. S/N tablosundan optimum seviyeleri belirlediğimizde başlangıç sıcaklığı için 3. seviye (1000) optimum olarak bulunur. Son sıcaklık ve soğutma oranının bu senaryoda etkisi nerede ise yoktur. Bu nedenle bu iki parametre için seviyeler ana etki grafikleri ve ortalama ve standart sapma yanıt tablolarının yardımı ile 1 (0.1 ve 0.85) olarak belirlenmiştir.

3.2.6. 3 malzeme- φ hazırlık süresi için Taguchi deney tasarımı sonuçları

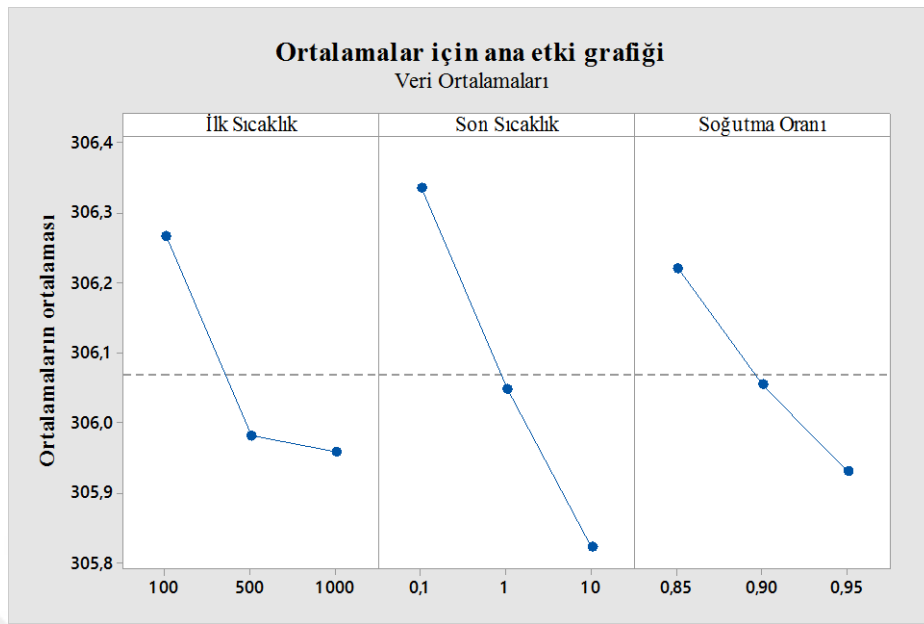
3 malzeme- φ hazırlık süresi baz alınarak 9 deney seti 14 veri seti için, Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. Minitab İstatistik Yazılımı ile yapılan analiz sonuçları; Tablo 21'de S/N oranı, Tablo 22'de ortalamalar ve Tablo 23'te standart sapmalar için sunulmuştur. Ayrıca Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28'de sırası ile S/N oranı, ortalamalar ve standart sapma için ana etki grafikleri görülmektedir.

Tablo 21. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait S/N oranı için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	-50.35	-50.35	-50.35
2	-50.34	-50.34	-50.34
3	-50.34	-50.33	-50.34
Delta	0.01	0.02	0.01
Sıralama	2	1	3

Şekil 26. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait S/N oranı için ana etki grafiğiTablo 22. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için yanıt tablosu

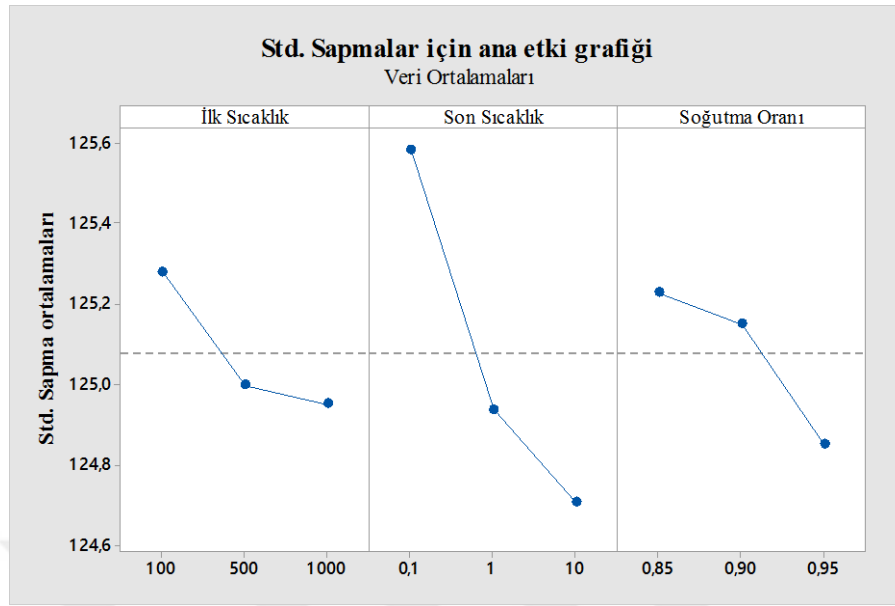
Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	306.3	306.3	306.2
2	306	306	306.1
3	306	305.8	305.9
Delta	0.3	0.5	0.3
Sıralama	2	1	3



Şekil 27. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait ortalamalar için ana etki grafiği

Tablo 23. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için yanıt tablosu

Seviye	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
1	125.3	125.6	125.2
2	125	124.9	125.1
3	125	124.7	124.9
Delta	0.3	0.9	0.4
Sıralama	3	1	2



Şekil 28. 3 malzeme- φ hazırlık süresine ait standart sapmalar için ana etki grafiği

Ana etki grafikleri ve sıralamalar incelendiğinde 3 malzeme- φ hazırlık süresi için en önemli TB parametresi son sıcaklık olarak bulunmuştur. Ardından sırası ile başlangıç sıcaklığı ve soğutma oranı gelmektedir. S/N tablosu yardımı ile son sıcaklığa ait optimum seviye 3 (1) olarak belirlenmiştir. Başlangıç sıcaklığı ve soğutma oranı için seviyeler ortalama ve standart sapma tabloları ve grafiklerinin yardımı ile 3 (1000 ve 0.95) olarak belirlenmiştir. Malzeme sayısının ve hazırlık süresinin farklı değerleri için elde edilen Taguchi deney tasarımı sonuçları özetlenecek olursa, 6 farklı durumun 5'inde en önemli parametre başlangıç sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Tablo 24'te her bir durum için parametrelerin önem sıralamaları verilmektedir.

Tablo 24.Taguchi analizine göre parametrelerin önem sıralamaları

	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
2 malzeme-0.3 hazırlık süresi	1	3	2
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	1	2	3
2 malzeme- φ hazırlık süresi	1	2	3
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	1	2	3
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	1	3	2
3 malzeme- φ hazırlık süresi	2	1	3

Ayrıca parametrelerin optimum seviyeleri ve dönüştürülmüş hali de özet olarak Tablo 25'te sunulmuştur.

Tablo 25. Taguchi analizine göre parametrelerin optimum seviyeleri

	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı	İlk Sıcaklık	Son Sıcaklık	Soğutma Oranı
2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	3	2	1	1000	1	0.85
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	3	1	1	1000	0.1	0.85
2 malzeme- φ hazırlık süresi	3	2	1	1000	1	0.85
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	3	2	1	1000	1	0.85
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	3	1	1	1000	0.1	0.85
3 malzeme- φ hazırlık süresi	3	3	3	1000	10	0.95

Elde edilen parametrelerin optimum seviyeleri her bir durum için göz önünde bulundurularak algoritma 5 defa koşturulmuştur. Ortalama en büyük tamamlanma zamanı ve ortalama hesaplama sürelerine ait sonuçlar Tablo 26'da sunulmaktadır (Optimum parametre seviyeleri ile elde edilen 5 tekrara ait tüm sonuçlar Ek 10'da verilmiştir.).

Tablo 26. Optimum parametre seviyelerine göre TB algoritmasına ait C_{maks} ortalama ve ortalama hesaplama süresi değerleri

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.28	276.52	374.82	366.38	539.23	529.10
	Ort. Süre (sn.)	6.51	5.23	6.22	5.60	6.77	6.95	9.23	8.76	9.87	8.52	10.54	8.79	10.74	10.51
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.43	539.89	530.20
	Ort. Süre (sn.)	11.15	9.89	11.53	10.78	11.89	11.42	13.80	12.77	14.11	12.93	15.07	12.64	15.06	13.32
2 malzeme- φ hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.68	269.67	258.69	299.79	289.02	378.11	369.39	543.20	539.69
	Ort. Süre (sn.)	10.33	11.18	11.98	11.47	12.74	12.02	14.54	14.32	14.18	13.43	14.30	11.70	13.38	12.37
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.14	276.04	375.72	368.35	539.04	530.90
	Ort. Süre (sn.)	7.38	7.10	8.29	7.60	8.66	7.63	11.89	8.92	10.40	9.07	10.91	9.50	11.68	10.15
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	286.00	276.52	378.72	368.65	540.42	531.51
	Ort. Süre (sn.)	10.64	10.37	11.68	11.09	11.97	11.56	13.85	12.60	14.36	12.72	15.25	13.63	15.19	14.13
3 malzeme- φ hazırlık süresi	C_{maks} Ort.(sa.)	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	273.45	307.42	292.12	399.20	382.45	551.32	550.33
	Ort. Süre (sn.)	8.61	8.90	10.01	8.81	10.42	9.57	11.03	9.91	11.96	10.30	12.71	11.70	13.31	12.48

3.3.Tavlama Benzetimi Algoritması için Nümerik Örnek

Farklı müşterilerden gelen 6 adet sipariş tek Eİ makinasında üretilecek olsun. İşlere ait özellikler Tablo 27’de sunulmuştur.

Tablo 27. Sayısal örneğe ait veri seti

İşler	Yükseklik	Hacim	Alan	Malzeme tipi
1	17.13	315	48.27	1
2	2.67	121.82	84.97	1
3	33.23	635.62	248.68	1
4	10.77	1928.6	269.75	2
5	26.67	1375.9	258.54	2
6	14.38	989.53	114.56	1

Tek Eİ makinasına ait özellikler ise şu şekildedir: $VT = 0.030864 \text{ sa/cm}^3$, $HT = 0.7 \text{ sa/cm}$, $Set_b = 1.2 \text{ sa}$, $Set_i = 0.9 \text{ sa}$ ve $MA = 625 \text{ cm}^2$. Siparişler 2 farklı malzeme tipi içermektedir ve yığınlarda farklı malzeme içeren ürünler üretilebilmektedir. TB algoritması, algoritmanın işleyişini anlayabilmek adına 1 replikasyon olacak şekilde çalıştırılmış ve parametreler $T = 1$; $T_{min} = 0.1$; $\tau = 0.85$ olarak belirlenmiştir.

Başlangıç çözümünün elde edilmesi:

Uygun çözümler, kromozom tipi gösterimle ifade edilmektedir. Öncelikle işler malzeme tipine göre sıralanır. Sıralı işler, 1. yığından başlayarak gruplandırılır. Yazıcı tablası alanı olan 625 cm^2 alana ulaşıldığında veya aşıldığında yeni bir yığın oluşturulur. Bu durumda başlangıç çözümü şu şekilde elde edilmiştir.

İşler	1	2	3	6	4	5
Yığınlar	1	1	1	1	2	2

Yığınlara ait toplam alanlar ve boş alanlar hesaplanır:

Başlangıç çözümüne ait yığınların toplam alanı: [496.48, 528.29]

Başlangıç çözümüne ait yığınların toplam boş alanı: [128.52, 96.71]

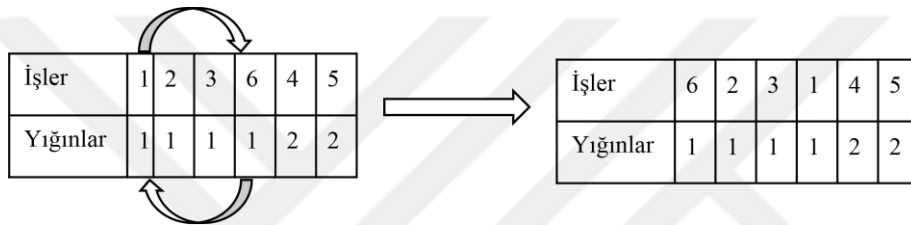
Maliyet fonksiyonu yardımı ile başlangıç çözümüne ait C_{maks} değeri hesaplanır. $C_{maks} = 209.961$ saat olarak bulunmuştur.

Komşu çözümlerin elde edilmesi:

Oluşan başlangıç çözümünden rastgele iki iş seçilir ve bu işler karşılıklı yer değiştirir.

Rastgele seçilen işler: 1. ve 6. iş olsun

Aday komşu çözüm:



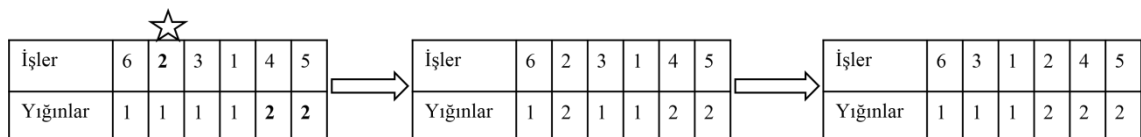
Aday komşuya ait yığınların toplam alanı: [496.48, 528.29]

Aday komşuya ait yığınların toplam boş alanı: [128.52, 96.71]

Olası komşu çözümde oluşan yığınlar yazıcı tablası alanını aşmadığı için olası komşu çözüm uygundur. Karşılıklı yer değiştirme işleminden sonra rassallığı artırmak için araya ekleme işlemine geçilir.

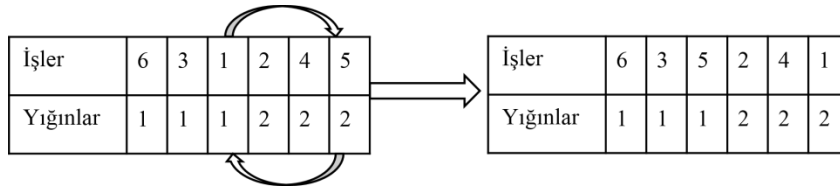
Rastgele bir iş seçilir: 2. İş seçilmiş olsun

Seçilen işin yığını dışında kalan yığınlardan rastgele bir yığın seçilir: 2. Yığın seçilmiş olsun. Seçilen işin alanı seçilen yığının boş alanından küçük veya eşitse seçilen iş o yığına eklenir ($84.97 < 96.71$). Son olarak yığınlardaki işler kontrol edilir, eğer tüm yığınlarda en az 1 iş varsa işler yığınlarına ve malzeme tipine göre sıraya konular ve maliyet fonksiyonu yardımı ile C_{maks} değeri hesaplanır. Oluşan aday komşu çözüme ait $C_{maks} = 210.861$ saat olarak bulunmuştur.



Durdurma kriteri sağlanmadığı için oluşan olası komşu çözümünden rastgele iki iş seçilir ve bu işler karşılıklı yer değiştirir.

Rastgele seçilen işler: 1. ve 5. iş olsun



Aday komşuya ait yığınların toplam alanı: [621.78, 402.99]

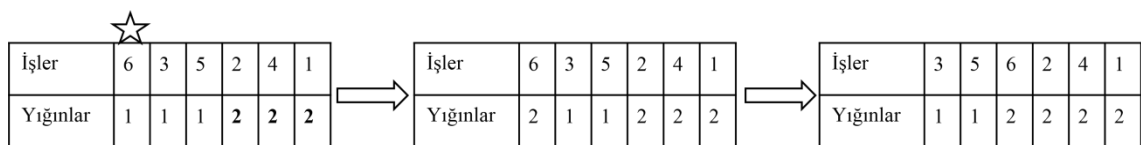
Aday komşuya ait yığınların toplam boş alanı: [3.22, 222.01]

Olası komşu çözümde oluşan yığınlar yazıcı tablası alanını aşmadığı için olası komşu çözüm uygundur. Araya ekleme işlemi ile devam edilir.

Rastgele bir iş seçilir: 6. iş seçilmiş olsun

Rastgele bir yığın seçilir: 2. yığın seçilmiş olsun

Seçilen işin alanı seçilen yığının boş alanından küçük veya eşitse seçilen iş o yığına eklenir ($114.56 < 222.01$). Son olarak yığınlardaki işler kontrol edilir, eğer tüm yığınlarda en az 1 iş varsa işler yığınlara ve malzeme tipine göre sıraya konular ve maliyet fonksiyonu yardımı ile C_{maks} değeri hesaplanır. Oluşan aday komşu çözüme ait $C_{maks} = 205.082$ saat olarak bulunmuştur.



Belirlenen Tavlama Benzetimi parametrelerine göre komşu çözüm arama döngüsü $mevcut_sicaklik > son_sicaklik$ koşulu sağlandığı sürece çözüm üretmeye devam eder. Bu örnekte belirlenen parametre değerlerine göre mevcut sıcaklık başlangıçta 1 kabul edilir ve her adımda $mevcut_sicaklik = mevcut_sicaklik \times 0.85$ olacak

şekilde güncellenir. Mevcut sıcaklık değeri, son sıcaklık değeri olan 0.1 değerinin altına düştüğü anda algoritma arama yapmayı durdurur.

Üretilen olası komşu çözümlerin komşu çözüm olarak belirlenmesinde ise bulunan maliyet fonksiyonları arasındaki farka bakılır. Komşu çözüm ile mevcut çözüm arasındaki maliyet farkı hesaplanır. Bu fark 0'dan küçük ise olası komşu çözüm artık yeni mevcut çözüm olarak belirlenir, ancak fark sıfırdan büyük ise $e^{-\frac{\Delta}{T}} > rand(0,1)$ olasılığına göre kötü çözüme mevcut çözüm olma şansı tanınır. Bu örnekte başlangıç çözümü için amaç fonksiyonu değeri $C_{maks} = 209.961$ iken ilk adımda olası komşu için amaç fonksiyonu değeri $C_{maks} = 210.86$ olarak bulunmuştur. Bu durumda $\Delta = 210.86 - 209.961 = 0.899$ 'dur ve $\Delta > 0$ 'dır. Mevcut çözümden daha kötü bir çözüm elde edilmiştir ancak TB algoritmasının özelliğinden dolayı bu çözüme olasılıksal olarak şans verilecektir. Öncelikle rassal olarak [0,1] aralığında sayı üretilecek daha sonra bu sayı ile $e^{-\frac{0.899}{1}} = 0.406$ değeri kıyaslanacaktır. $0.406 > rassal\ sayı$ olması durumunda kötü çözüm komşu çözüm olarak belirlenecektir. Ele alınan örnekte rassal sayı 0.13 olarak belirlenmiş olup $0.406 > 0.13$ olduğu için kötü çözüm olan $C_{maks} = 210.86$ çözümü mevcut çözüm olarak kabul edilmiştir. 2. Adımda maliyet fonksiyonu değeri olan $C_{maks} = 205.082$ değeri ile mevcut çözüm olan $C_{maks} = 210.86$ değeri arasındaki fark $\Delta < 0$ 'dır. Bu nedenle $C_{maks} = 205.082$ çözümü yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir. Bu döngü durdurma kriteri sağlanınca sona erer.

3.4. TB algoritmasının sonuçlarının istatistiksel analizi

2 ve 3 farklı malzemeden elde edilen en büyük tamamlanma süreleri ve hesaplama sürelerinin sonuçları istatistiksel anlamlılık açısından incelenmiştir. Örneklem büyüklüğünün yetersizliği ve normallik şartının sağlanmaması nedeni ile bağımlı örnekler için t-testine parametrik olmayan bir alternatif olarak “Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek” testi uygulanmıştır. Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek testinin sonuçları Tablo 28'de sunulmuştur.

Tablo 28. 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait C_{maks_ort} ve hesaplama süresi için Wilcoxon test sonuçları

TB algoritması için Wilcoxon test sonuçları	C_{maks}			Hesaplama Süreleri		
	T	Z	p değeri	T	Z	p değeri
φ hazırlık süresi-3 malzeme ve φ hazırlık süresi-2 malzeme	0	3.30	0.0009	3	3.11	0.0019
0.9 hazırlık süresi-3 malzeme ve 0.9 hazırlık süresi-2 malzeme	11	2.20	0.0281	26	1.67	0.0962
0.3 hazırlık süresi-3 malzeme ve 0.3 hazırlık süresi-2 malzeme	18	2.17	0.0303	2	3.17	0.0015

Tablo 28'de görüldüğü gibi, 2 ve 3 malzeme için C_{maks} değerleri arasında tüm hazırlık süresi senaryolarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. Bu senaryolarda p değerleri 0.05'ten küçük bulunmuştur. Öte yandan, 0.9 hazırlık süresinde 2 ve 3 malzeme için hesaplama süreleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmazken, 0.3 ve φ hazırlık sürelerinde hesaplama süreleri arasında anlamlı bir farklılık tespit edilmiştir.

Ayrıca tespit edilen optimum seviyelerle 5 defa tüm durumlar için algoritma koşturulduğunda, matematiksel model ile elde edilen en büyük tamamlanma zamanına ait optimum çözümlerin tamamı elde edilmiş, uygun çözümlerin değerleri için ise TB algoritması ile matematiksel modele eşit veya matematiksel modelden daha küçük çözüm değerleri bulunmuştur.

Literatürde mevcut veri setleri tek makina problemi için en fazla 12 işi kapsamaktadır. TB algoritmasının daha büyük veri setlerindeki başarısını görebilmek adına, daha büyük iş sayıları içeren paralel makina çalışmalarına ait veriler ele alınan problem için kullanılmıştır. 25 iş ve 46 iş içeren siparişlerin tek Eİ makinasında çizelgelenmesi için veriye öncelikle malzeme tipi özelliği eklenmiştir. Malzeme türleri, 2 malzeme türü için $U[1,2]$ ve 3 malzeme türü için $U[1,3]$ üniform kesikli dağılıma göre rastgele oluşturulmuştur. Kullanılan veriler Ek 11'de sunulmuştur. Oluşturulan 2 veri seti için Python programlama dili ile kodlanan TB algoritması 5 defa koşturulmuştur ve sonuçlar kaydedilmiştir. TB algoritmasına ait parametre değerleri Taguchi deney tasarımı ile

daha önce tespit edilen optimum değerler olarak belirlenmiştir. Tablo 29’da 5 tekrar için bulunan ortalama C_{maks} ve hesaplama zamanı değerleri verilmektedir.

Tablo 29. 25 ve 46 iş için 2 ve 3 malzemeli senaryolara ait C_{maks_ort} ve ortalama hesaplama süreleri

		P25	P46
2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	897.24	1371.36
	Ort. Süre (sn.)	0.64	0.63
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	899.11	1373.87
	Ort. Süre (sn.)	0.78	0.96
2 malzeme- φ hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	919.39	1373.8
	Ort. Süre (sn.)	0.62	0.71
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	897.05	1364.67
	Ort. Süre (sn.)	0.68	0.81
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	901.00	1367.57
	Ort. Süre (sn.)	0.77	1.1
3 malzeme- φ hazırlık süresi	C_{maks_ort} (sa.)	921.09	1398.82
	Ort. Süre (sn.)	1.14	1.55

Görüldüğü üzere önerilen meta sezgisel algoritma iş sayısı arttığında da oldukça etkindir ve sonuçları kısa sürede vermektedir. Sonuç değerlerinin optimum olup olmadığı bilinmese de büyük boyutlu veri setleri ile de çalışırken hızlı şekilde uygun çözelgeler oluşturmak mümkündür.

4.BÖLÜM

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında önerilen TSDP modeli ile tüm durumların %64'ünde optimum sonuç, %36'sında ise 7200 sn. zaman limiti içerisinde uygun çözümler elde edilmiştir. Siparişlerdeki iş sayısı arttıkça matematiksel modelin hesaplama süresi artmakta ve optimum sonuç elde etme performansı düşmektedir. Ancak, yine de önerilen model, malzeme değişim sürecinde farklı zorluk seviyelerine sahip Eİ makinalarında ve tüm siparişlerin homojen malzemelerden üretilme zorunluluğu olduğu durumlarda, gelen siparişlerin tek makinada çizelgelenmesine çözüm sağlamak adına literatüre önemli bir katkıda bulunmaktadır. Önerilen matematiksel modelin problem boyutu büyüdükçe oldukça uzun hesaplama sürelerine ihtiyaç duyması nedeni ile, bu problem için global optimumu ararken tepe tırmanma hareketini kullanarak yerel optimumlardan uzaklaşmayı sağlayan ve başarılı bir arama algoritması olan TB algoritması Python programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. TB algoritması ile tam sayılı doğrusal programlama modelinde elde edilen optimum sonuçların tamamına ulaşılmıştır. Ayrıca matematiksel model ile elde edilen uygun çözümler için ise TB algoritması ile eşit veya daha küçük çözüm değerleri elde edilmiştir. TB algoritması ile elde edilen ortalama en büyük tamamlanma zamanı ve tam sayılı doğrusal programlama ile elde edilen en büyük tamamlanma zamanı sonuçları istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Tablo 30'da bu karşılaştırmanın sonuçları görülmektedir. Bazı senaryolarda en büyük tamamlanma zamanları arasında istatistiksel anlamlılık bulunmuştur, ancak bu durum karşılaştırma için TB algoritmasının 5 tekrarının ortalama değerlerinin kullanılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere TB algoritması meta sezgisel bir algoritma olup, sonuçlar her zaman optimumu garanti etmez ve rassallık nedeni ile her tekrarda aynı sonucun elde edilmesi mümkün olmayabilir.

Tablo 30. TB ile TSDP modelinin en büyük tamamlanma zamanları açısından kıyaslanması

Wilcoxon test sonuçları	T	Z	p değeri
2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	3	2.10	0.04
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	34	1.16	0.25
2 malzeme- φ hazırlık süresi	7	2.86	0.004
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	28	1.54	0.12
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	23	1.85	0.06
3 malzeme- φ hazırlık süresi	7	2.86	0.004

Bu tez çalışmasında geliştirilen matematiksel model için bilgisayara ait işlemci kullanılırken TB algoritması için yazılan kod, tamamen bulut tabanlı çalışan Google Colaboratory'de çalıştırılmıştır. Bu nedenle bu iki yöntem eşit kapasiteli bilgisayarlarda test edilmediği için hesaplama süreleri açısından bir karşılaştırma yapmak tam olarak gerçekçi değildir. Buna rağmen Ek 12 incelendiğinde bu iki yöntem arasında hesaplama zamanları açısından büyük farklılık olduğu sonucu kolaylıkla çıkarılabilir. Tablo 31'de hesaplama süreleri için yapılan Wilcoxon testi sonuçları sunulmuştur. Hesaplama süreleri açısından bakıldığında tüm durumlar için p değerinin 0.05'ten küçük elde edildiği görülür.

Tablo 31. TB ile TSDP modelinin hesaplama süreleri açısından kıyaslanması

Wilcoxon test sonuçları	T	Z	p değeri
2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	0	3.3	0.001
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	0	3.3	0.001
2 malzeme- φ hazırlık süresi	0	3.3	0.001
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	0	3.3	0.001
3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	0	3.3	0.001
3 malzeme- φ hazırlık süresi	0	3.3	0.001

Bu tez çalışmasında, tek bir Eİ makinasına dağıtık müşterilerden gelen farklı tipte malzemelerle üretilmesi gereken siparişler için çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve büyük boyutlu problemler için daha hızlı sonuçlar elde edebilmek adına TB algoritması önerilmiştir. Geliştirilen model sayesinde malzeme değişim süreci farklı zorluk seviyelerine sahip Eİ makinalarında ve yazıcı tablasında yığınlar içinde malzeme değişiminin mümkün olmadığı makinalarda siparişlerin çizelgelenmesi sağlanmıştır. En büyük tamamlanma zamanını en küçükleleyen model, malzeme değişiminin mümkün olduğu makinalarda aynı zamanda en az malzeme değişimini yapan çizelgeyi de vermektedir. Yazıcı tablasının büyüklüğü beklendiği şekilde daha hızlı çözümler elde edilmesine olanak sunmaktadır. Ayrıca TB algoritması sayesinde mevcut veri setleri için oldukça hızlı sonuçlar elde edilmiştir. Eİ makinalarında çizelgeleme literatüründe henüz büyük boyutlu veri setleri mevcut değildir. Bu nedenle tek makine için literatürde paralel makinaya ait olan veriler de kullanılarak sonuç alınmıştır. Eİ makinalarında çizelgeleme literatürü genişledikçe daha büyük boyutlu veri setleri de geliştirilen modelde kullanılabilir. Geliştirilen model sayesinde kullanıcılar ve üreticiler, hangi parçanın hangi yığında ve hangi sırayla basılacağını ve ayrıca baskı işlemi sırasında malzeme değişimi için hangi parçalara ihtiyaç duyulacağını tahmin edebilir. Bu da etkin bir çizelgeyle birlikte dolaylı olarak başarılı bir üretim planı yapılmasına olanak sunacaktır. Ayrıca malzeme değiştirme maliyetlerinin minimize edilmesi sayesinde üretim maliyetleri de düşecektir.

Bu tez çalışmasında ele alınan problem gelecekteki araştırmalar için temel teşkil edebilir. Eİ makinalarına parçaların yerleştirilmesi, çizelgeleme problemleriyle ilgili farklı parametrelerin de dikkate alınarak farklı amaçlar için çizelgeleme probleminin çözülmesi, özdeş veya özdeş olmayan özelliklere sahip birden fazla makina veya paralel makinaların dikkate alınması, ürün katmanları arasında malzeme değişimi varsayımının hesaba katılması gibi farklı konularda çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKÇA

1. F42 Committee. Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F2792-12A>
2. Wong, K.V., Hernandez, A., 2012. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mechanical Engineering, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
3. Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., Bil, C., 2019. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, 6(4): 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
4. Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., Marto, C., 2017. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 92(5): 1671–1676. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0239-8>
5. Godoi, F. C., Prakash, S., Bhandari, B. R., 2016. 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. **Journal of Food Engineering**, 179: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
6. Frazier, W. E., 2014. Metal additive manufacturing: A review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 23(6): 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
7. Singh, S., Ramakrishna, S., 2017. Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future. **Current Opinion in Biomedical Engineering**, 2: 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2017.05.006>
8. Joshi, S. C., Sheikh, A. A., 2015. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. **Virtual and Physical Prototyping**, 10(4): 175–185. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
9. Wohlers Associates. Retrieved December 22, 2020, from <http://wohlersassociates.com/2020report.htm>

10. Guo, N., Leu, M. C., 2013. Additive manufacturing: technology, applications, and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, **8**(3): 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
11. Yalçın, B., Ergene, B., 2017. Endüstride yeni eğilim olan 3-b eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. **SDU International Journal of Technological Sciences**, **9**(3): 65-88
12. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, **69**: 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
13. Han, D., Lee, H., 2020. Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications. **Current Opinion in Chemical Engineering**, **28**: 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
14. Bandyopadhyay, A., Heer, B., 2018. Additive manufacturing of multi-material structures. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, **129**: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>
15. Choi, J.-W., Kim, H.-C., Wicker, R., 2011. Multi-material stereolithography. **Journal of Materials Processing Technology**, **211**(3): 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.003>
16. Zhou, C., Chen, Y., Yang, Z., Khoshnevis, B., 2013. Digital material fabrication using mask-image-projection-based stereolithography. **Rapid Prototyping Journal**, **19**(3): 153–165. <https://doi.org/10.1108/13552541311312148>
17. Rickenbacher, L., Spierings, A., Wegener, K., 2013. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). **Rapid Prototyping Journal**, **19**(3): 208–214. <https://doi.org/10.1108/13552541311312201>
18. Li, Q., Kucukkoc, I., Zhang, D. Z., 2017. Production planning in additive manufacturing and 3D printing. **Computers & Operations Research**, **83**: 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.013>

19. Chergui, A., Hadj-Hamou, K., Vignat, F., 2018. Production scheduling and nesting in additive manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, **126**: 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.048>
20. Dvorak, F., Micali, M., Mathieug, M., 2018. Planning and Scheduling in Additive Manufacturing. **Inteligencia Artificial**, **21(62)**: 40–52. <https://doi.org/10.4114/intartif.vol21iss62pp40-52>
21. Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., Macchiaroli, R., Todisco, V., 2018. A modified genetic algorithm for time and cost optimization of an additive manufacturing single-machine scheduling. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, **9(4)**: 423–438.
22. Oh, Y., Zhou, C., Behdad, S., 2018. Production Planning for Mass Customization in Additive Manufacturing: Build Orientation Determination, 2D Packing and Scheduling. Presented at the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85639>
23. Kucukkoc, I., 2019. MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems. **Computers & Operations Research**, **105**: 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.006>
24. Li, Q., Zhang, D., Wang, S., Kucukkoc, I., 2019. A dynamic order acceptance and scheduling approach for additive manufacturing on-demand production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. **105**: 3711–3729. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03796-x>
25. Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., Lambiase, A., 2020. A modified tabu search algorithm for the single-machine scheduling problem using additive manufacturing technology. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, **11(3)**: 401–414.

26. Li, Q., Zhang, D., Kucukkoc, I., He, N., 2020. Heuristic Techniques for Real-Time Order Acceptance and Scheduling in Metal Additive Manufacturing. In J. A. T. Machado, N. Özdemir, & D. Baleanu (Eds.), *Mathematical Modelling and Optimization of Engineering Problems* (pp. 1–24). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37062-6_1
27. Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., Sprock, T., 2020. Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review. **Additive Manufacturing**, **36**: 101492. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101492>
28. Ransikarbum, K., Pitakaso, R., Kim, N., 2020. A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization. **Applied Sciences**, **10**(15): 5159-5179. <https://doi.org/10.3390/app10155159>
29. Alicastro, M., Ferone, D., Festa, P., Fugaro, S., Pastore, T., 2021. A reinforcement learning iterated local search for makespan minimization in additive manufacturing machine scheduling problems. **Computers & Operations Research**, **131**: 105272. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105272>
30. Aloui, A., Hadj-Hamou, K., 2021. A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints. **Computers & Industrial Engineering**, **154**: 107115. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107115>
31. Arık, O. A., 2021. Additive manufacturing scheduling problem considering assembly operations of parts. **Operational Research**, **22**: 3063-3087. <https://doi.org/10.1007/s12351-021-00649-y>
32. Kapadia, M. S., Uzsoy, R., Starly, B., Warsing, D. P., 2021. A genetic algorithm for order acceptance and scheduling in additive manufacturing. **International Journal of Production Research**, 1–18. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1991023>

33. Karimi, S., Kwon, S., Ning, F., 2021. Energy-aware production scheduling for additive manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, **278**: 123183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123183>
34. Castillo-Rivera, S., 2021. Maximum Utilization in Operations Scheduling for Multiple Machines and Batches in Additive Manufacturing. **Digital Manufacturing Technology**, **1**: 1–14. <https://doi.org/10.37256/dmt.112021909>
35. Kim, H.-C., Choi, J., Wicker, R., 2010. Scheduling and process planning for multiple material stereolithography. **Rapid Prototyping Journal**, **16**(4): 232–240. <https://doi.org/10.1108/13552541011049243>
36. Kim, Y. J., Kim, B. S., 2021. Part-grouping and build-scheduling with sequence-dependent setup time to minimize the makespan for non-identical parallel additive manufacturing machines. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. **119**: 2247–2258. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08361-z>
37. Rohaninejad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahedi-Nouri, B., Hanzálek, Z., Shirazian, S., 2021. A hybrid learning-based meta-heuristic algorithm for scheduling of an additive manufacturing system consisting of parallel SLM machines. **International Journal of Production Research**: 1–21. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987550>
38. Koh, S.-G., Koo, P.-H., Kim, D.-C., Hur, W.-S., 2005. Scheduling a single batch processing machine with arbitrary job sizes and incompatible job families. **International Journal of Production Economics**, **98**(1): 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.10.001>
39. Koh, S.-G., Koo, P.-H., Ha, J.-W., Lee, W.-S., 2004. Scheduling parallel batch processing machines with arbitrary job sizes and incompatible job families. **International Journal of Production Research**, **42**(19): 4091–4107. <https://doi.org/10.1080/00207540410001704041>

40. Peng, W., Xu, L., You, J., Fang, L., & Zhang, Q., 2016. Selective laser melting of titanium alloy enables osseointegration of porous multi-rooted implants in a rabbit model. **Biomedical Engineering Online**, **15**(1): 85. <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0207-9>
41. Woolson, R. F., 2008. Wilcoxon Signed-Rank Test. In Wiley Encyclopedia of Clinical Trials. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct979>
42. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., 1953. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, 7.
43. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, **220**(4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
44. Özcan, U., 2010. Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm. **European Journal of Operational Research**, **205**(1): 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.033>
45. Rao, S. S., 2019. Engineering Optimization: Theory and Practice. John Wiley & Sons.
46. Kolonko, M., 1999. Some new results on simulated annealing applied to the job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, **113**(1): 123–136. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00420-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00420-7)
47. Melouk, S., Damodaran, P., Chang, P.-Y., 2004. Minimizing makespan for single machine batch processing with non-identical job sizes using simulated annealing. **International Journal of Production Economics**, **87**(2): 141–147. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00092-6)
48. Laarhoven, P. J. M. van, Aarts, E. H. L., Lenstra, J. K., 1992. Job Shop Scheduling by Simulated Annealing. **Operations Research**, **40**(1): 113–125. <https://doi.org/10.1287/opre.40.1.113>

49. Steinberg, D. M., Hunter, W. G., 1984. Experimental Design: Review and Comment. **Technometrics**, **26**(2): 71–97.
<https://doi.org/10.1080/00401706.1984.10487928>
50. Antony, J., Jiju Antony, F., 2001. Teaching the Taguchi method to industrial engineers. **Work Study**, **50**(4): 141–149.
<https://doi.org/10.1108/00438020110391873>
51. Krishnaiah, K., Shahabudeen, P., 2012. Applied Design of Experiments and Taguchi Methods. PHI Learning Pvt. Ltd.



EKLER

EK 1. Malzeme değişiminin mümkün olduğu eklemeli imalat makinaları için maksimum tamamlanma zamanını en küçükleme amacı ile önerilen matematiksel modelin CPLEX kodları

- **CPLEX MODEL Dosyası:**

```

int nbparca = ...;
int nbparti=...;

range parca = 1..nbparca;
range parti = 1..nbparti;
range sirasira= 1..nbparca;

float height [parca]=...;
float area [parca]=...;
float volume [parca]=...;
int m [parca]=...;

int MA =...;
float SET=...;
float VT=...;
float HT=...;
int fi=...;

dvar boolean w[parti][parca][parca];
dvar boolean x[parti][parca][sira];
dvar boolean z[parti];
dvar boolean a[parti][parca];

dexpr float PT[j in parti] = VT *(sum(i in parca,s in
sira)volume[i]*x[j][i][s])+ HT *(max(i in parca, s in
sira)(height[i]*x[j][i][s]));
dvar float+ tamamlanma[j in parti];

execute

{
    cplex.tilim=7200; // timelimit
}

minimize (max (j in parti)tamamlanma[j]);

subject to

{
    cons01:
    forall (i in parca)
    sum (j in parti, s in sirasira)
    x[j][i][s]==1;

```

```

cons02:
forall(j in parti, s in siras)
sum (i in parca)x[j][i][s]<=1;

cons03:
forall(j in parti:j!=nbparti)
sum (i in parca , s in siras)x[j+1][i][s]<= fi* sum(i in parca , s in
siras)x[j][i][s];

cons04:
forall(j in parti, s in siras:s!=nbparca)
sum (i in parca )x[j][i][s+1]<= fi* sum(i in parca )x[j][i][s];

cons05:
forall(j in parti)
sum (i in parca, s in siras)area[i]*x[j][i][s]<= MA;

cons06:
forall(j in parti)
sum (i in parca, s in siras)x[j][i][s]>=1 => z[j]==1;

cons07:
forall(j in parti)
sum (i in parca, s in siras)x[j][i][s]==0 => z[j]==0;

cons08:
forall (j in parti:j!=1)
z[j]==1=>
tamamlanma[j-1]+ PT[j]+ SET *z[j]+ 0.3*sum(i in parca)a[j][i]
<=tamamlanma[j];

cons09:
forall (j in parti:j!=1)
z[j]==0=>
tamamlanma[j]==0;

cons10:
forall(j in parti: j==1)
PT[1]+ SET *z[1]+ 0.3*sum(i in parca)a[j][i]<=tamamlanma[1];

cons11:
forall(j in parti)
forall(s in siras:s!=nbparca, i in parca, k in parca:k!=i)
(z[j]==1)=> x[j][i][s]+ x[j][k][s+1]- w[j][i][k]<=1;

cons14:
forall(i in parca)
sum(j in parti, k in parca:i!=k)w[j][i][k]<=1;

cons13:
forall(k in parca)
sum(j in parti, i in parca:i!=k)w[j][i][k]<=1;

cons15:
forall(j in parti)
sum(i in parca, k in parca:i!=k)x[j][i][k]<=1=>
sum(i in parca, k in parca:i!=k)w[j][i][k]==0;

```

```

cons16:
forall (j in parti, i in parca, k in parca:i!=k)
(w[j][i][k])==1=>
(w[j][k][i]==0);

cons17:
forall(j in parti)
forall(i in parca, k in parca:i!=k)
(m[i]*w[j][i][k])!=(m[k]*w[j][i][k])=>
a[j][i]==1;

cons18:
forall(j in parti)
forall(i in parca)
z[j]==0=>
a[j][i]==0;
}

```

- **CPLEX DATA Dosyası:**

```

nbparti=4; // üst sınırlar buraya girilir.
fi=500;
VT=0.030864;
HT=0.7;
SET=1.2;

SheetConnection data("P11.xlsx");
nbparca from SheetRead (data, "parca");
height from SheetRead (data, "height");
area from SheetRead (data, "area");
volume from SheetRead (data, "volume");
m from SheetRead (data, "material"); // 2 malzemeli data
//m from SheetRead (data, "m"); // 3 malzemeli data
MA from SheetRead (data, "MA");

```

EK 2. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait maliyet fonksiyonu (Bu kod hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için uygundur.)

```
def amachesapla(atanan, grup):

    #gruplar için toplam hacim hesaplama
    t_volume=[]
    for k in range(1, max(grup)+1):
        volume=0
        for i in range(0, len(atanan)):
            if grup[i]==k:
                volume+=v[atanan[i]-1]
        t_volume.append(volume)
        total_v= VT* t_volume
    print(f"Gruplara ait toplam hacim \n {t_volume} ")
    print(f"Gruplara ait makina hızından etkilenmiş toplam hacim \n {
total_v} ")

    # gruplara ait max h bulma
    maxh=[]
    for k in range(1, max(grup)+1):
        height=0
        for i in range(0, len(atanan)):
            if grup[i]==k:
                if h[atanan[i]-1]>=height:
                    height=h[atanan[i]-1]
        maxh.append(height)
        total_h=maxh*HT
    print(f"Her gruptaki maksimum yükseklik: \n {maxh} ")
    print(f"Her gruptaki makina yazma hızından etkilenmiş maksimum yü
kseklik: \n {total_h} ")

    #gruplara ait processing time bulma
    processing_time=[]
    for i in range(0,max(grup)):
        processing_time.append(total_h[i]+total_v[i])
    print(f"Her gruptaki toplam yükseklik ve toplam hacim toplamı yan
i processing time: \n {processing_time} ")

    #gruplarda değişen ürün sayısı hesaplama
    d=[]

    for i in range(1, max(grup)+1):
        sirala=[]
        degis=0
```

```

for j in range (0, len(atanan)):
    if grup[j]==i:
        sirala.append(atanan[j])
print(sirala)
for k in range(0, len(sirala)-1):
    if mt[sirala[k]-1]!=mt[sirala[k+1]-1]:
        degis+=1
d.append(degis)

print(f"Gruplardaki malzeme değişim sayısı: \n {d} ")

#SET değeri hesaplama
#malzeme değişimden kaynaklı set
seti=[]
for i in range(0, max(grup)):
    kk=0.9* d[i]
    seti.append(kk)
print(f"Gruplardaki malzeme değişiminden kaynaklanan maliyet: \n
{seti} ")

#yazıcı kurulumundan kaynaklı set
SS=[]
for k in range(0, max(grup)):
    SS.append(1)
    SETB=SS*SETb
print(f"Grup kurmadan kaynaklanan kaynaklanan maliyet: \n {SETB}
")

#toplam SET
SETJ=[]
for i in range (0, max(grup)):
    SETJ.append(SETB[i]+ seti[i])
print(f"Toplam setup maliyeti: \n {SETJ} ")

CT=[]
for i in range (0,max(grup)):
    CT.append(processing_time[i]+ SETJ[i])
print(f"Gruplara ait kurulum zamanları dahil edilmiş processing t
ime: \n {CT} ")

completion=0
comp_time=[]
for i in range (0, max(grup)):
    completion+=CT[i]
    comp_time.append(completion)
print(f"Gruplara ait completion time: \n {comp_time} ")

#max completion time hesaplama

```

```
maxC=max(comp_time)
print(f" Maksimum tamamlanma zamanı {maxC} dir")
return maxC
```

EK 3. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait amaç fonksiyonu (Bu kod farklı malzemeler içeren işlerin aynı yazıcı tablasında üretilemediği senaryo içindir.)

```

def amachesapla(atanan, grup):
    #gruplar için toplam hacim hesaplama
    t_volume=[]
    for k in range(1, max(grup)+1):
        volume=0
        for i in range(0, len(atanan)):
            if grup[i]==k:
                volume+=v[atanan[i]-1]
        t_volume.append(volume)
    total_v= VT* t_volume

    # gruplara ait max h bulma
    maxh=[]
    for k in range(1, max(grup)+1):
        height=0
        for i in range(0, len(atanan)):
            if grup[i]==k:
                if h[atanan[i]-1]>=height:
                    height=h[atanan[i]-1]
        maxh.append(height)
    total_h=maxh*HT

    #gruplara ait processing time bulma
    processing_time=[]
    for i in range(0,max(grup)):
        processing_time.append(total_h[i]+total_v[i])

    #gruplarda değişen ürün sayısı hesaplama
    d=[]

    for i in range(1, max(grup)+1):
        sirala=[]
        degis=0
        for j in range (0, len(atanan)):
            if grup[j]==i:
                sirala.append(atanan[j])

        for k in range(0, len(sirala)-1):
            if mt[sirala[k]-1]!=mt[sirala[k+1]-1]:
                degis+=1

```

```

d.append(degis)

#SET değeri hesaplama
#malzeme değişimden kaynaklı set
seti=[]
for i in range(0, max(grup)):
    kk=80* d[i]
    seti.append(kk)

#yazıcı kurulumundan kaynaklı set
SS=[]
for k in range(0, max(grup)):
    SS.append(1)
    SETB=SS*SETb

#toplam SET
SETJ=[]
for i in range (0, max(grup)):
    SETJ.append(SETB[i]+ seti[i])

#Completion time hesaplama
CT=[]
for i in range (0,max(grup)):
    CT.append(processing_time[i]+ SETJ[i])

completion=0
comp_time=[]
for i in range (0, max(grup)):
    completion+=CT[i]
    comp_time.append(completion)

#max completion time hesaplama
maxC=max(comp_time)
print(f" Maksimum tamamlanma zamanı {maxC} dir")
return maxC

```

EK 4. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait başlangıç çözümü oluşturma fonksiyonu (Bu kod hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için uygundur.)

```
def baslama(id):

    sıralı_i=[]
    sıralı_a=[]
    sıralı_m=[]
    sıralı_v=[]
    sıralı_h=[]
    for s in range(1, max(mt)+1):
        for i in range(0,len(id)):
            if mt[i]==s:
                sıralı_i.append(id[i])
                sıralı_a.append(a[i])
                sıralı_m.append(mt[i])
                sıralı_v.append(v[i])
                sıralı_h.append(h[i])
    toplam=0
    grup=[]
    total=[]
    for j in range(1,len(id)+1):
        toplam=0
        j=1
        for i in range(0,len(id)):
            toplam+=sıralı_a[i]
            if toplam<=m1.MA:
                total.append(sıralı_i[i])
                grup.append(j)
                #print(grup)
                atanan= np.asarray(total)
                atanan=list(atanan)
                #print(atanan)
            else:
                j=j+1
                toplam=0
                toplam+=sıralı_a[i]
                #print(toplam)
                total.append(sıralı_i[i])
                grup.append(j)
                grup=list(grup)
                atanan= np.asarray(total)
                atanan=list(atanan)
                #print(atanan)
                #print(grup)
```

```
if len(atanan)==len(id):
    break
else:
    continue

grupalanı=[]
bosalan=[]
for j in range(1, max(grup)+1):
    toplam=0
    for i in range(0,len(atanan)):
        if grup[i]==j:
            toplam+=sıralı_a[i]
        grupalanı.append(toplam)
    bosalan.append(MA- grupalanı[j-1])
print(f"Atanan işler:\n {atanan} ")
print(f"Atanan gruplar:\n {grup} ")
print(f"Atanan işlerin malzemeleri:\n {sıralı_m}")
print(f"Grupların alanları:\n {grupalanı}")
print(f"Grupların boş alanları:\n {bosalan}")
return atanan, grup
```



EK 5. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait başlangıç çözümü oluşturma fonksiyonu (Bu kod farklı malzemeler içeren işlerin aynı yazıcı tablasında üretilmediği senaryo içindir.)

```
def baslama(id):
    sıralı_i=[]
    sıralı_a=[]
    sıralı_m=[]
    sıralı_v=[]
    sıralı_h=[]
    for s in range(1, max(mt)+1):
        for i in range(0, len(id)):
            if mt[i]==s:
                sıralı_i.append(id[i])
                sıralı_a.append(a[i])
                sıralı_m.append(mt[i])
                sıralı_v.append(v[i])
                sıralı_h.append(h[i])

    grup=[0 for i in range (1, len (id)+1)]
    atanan=[]
    g=1

    for s in range(1, max(mt)+1):
        toplam=0
        for i in range (0, len (id)):
            if sıralı_m[i]==s:
                if toplam+ sıralı_a[i]<=MA:
                    grup[i]=g
                    toplam+=sıralı_a[i]
                    atanan.append(sıralı_i[i])
                else:
                    g+=1
                    toplam=sıralı_a[i]
                    grup[i]=g
                    atanan.append(sıralı_i[i])

        g+=1

    if len(atanan)==len(id):
        break
    else:
        continue

    grupalanı=[]
    bosalan=[]
```

```
for j in range(1, max(grup)+1):
    toplam=0
    for i in range(0,len(atanan)):
        if grup[i]==j:
            toplam+=sıralı_a[i]
        grupalanı.append(toplam)
    bosalan.append(MA- grupalanı[j-1])

    print(f"Başlangıç için atanan işler:\n {atanan} ve partileri şu ş
ekildedir:\n {grup} ")
    print(f"Başlangıç için atanan işlerin oluşturduğu partilerin alan
ları:\n {grupalanı} ve boş alanları şu şekildedir:\n {bosalan} ")

return(atanan,grup)
```

EK 6. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait komşu çözüm oluşturma fonksiyonu (Bu kod hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar için uygundur.)

```
def komsuluk(atanan, grup):
    #başlangıç çözümü ata
    alan=[]
    malzeme=[]
    hacim=[]
    yükseklik=[]
    neighbor=[]
    for i in range(0, len(atanan)):
        alan.append(a[atanan[i]-1])
        malzeme.append(mt[atanan[i]-1])
        hacim.append(v[atanan[i]-1])
        yükseklik.append(h[atanan[i]-1])

    #Rastgele iki nokta oluşturuyor ve onlar arasında değişim yapıyor
    uz
    uygun=1
    while uygun==1:
        p0 = randint(0, len(atanan)-1)
        p1 = randint(0, len(atanan)-1)
        while p0==p1:
            p0 = randint(0, len(atanan)-1)
            p1 = randint(0, len(atanan)-1)

        aday = atanan[:]
        aday[p0], aday[p1] = aday[p1], aday[p0]

        neighboralan= alan[:]
        neighboralan[p0], neighboralan[p1] = neighboralan[p1], neighbor
alan[p0]

        nh= yükseklik[:]
        nh[p0], nh[p1] = nh[p1], nh[p0]

        nv=hacim[:]
        nv[p0], nv[p1] = nv[p1], nv[p0]

        nmt=malzeme[:]
        nmt[p0], nmt[p1] = nmt[p1], nmt[p0]

        print(f"{p0+1}'inci ve {p1+1}'inci işler yer değiştirecek")
        print(f"Komşuluk için aday çözüm: {aday} işler ve grupları: {gr
up}")
```

```

#oluşan aday komşu çözümün partiler için alanları kontrol edili
yor. Eğer tabla alanını aşan varsa çözüm uygun değil
grupalanı=[]
bosalan=[]
for j in range(0, max(grup)):
    toplam=0
    for i in range(0, len(aday)):
        if grup[i]==j+1:
            toplam+=neighboralan[i]
        grupalanı.append(toplam)
        bosalan.append(MA- grupalanı[j])

print(f"Komşuluk ile oluşan grupların alanı:{grupalanı}")
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların bosalanı:{bosalan}")

#uygun bir komşu çözüm bulana kadar rastgele sayı üretip değişt
irmeye devam ediyor
hepsiküçük=True
for i in range(0, len(grupalanı)):
    if grupalanı[i]>MA:
        hepsiküçük=False
        uygun=1
        print(f"komşu çözüm uygun değil (not feasible)")
        break
    else:
        uygun=0

#üretilen komşu uygun ise bu çözüm üzerinden insert işlemi yapı
lıyor.
if hepsiküçük==True:
    print(f"komşu çözüm uygun (feasible)")
    neighbor=aday
    print(f"Üretilen komşu çözüm {neighbor}")
    yeridegisecekis=neighbor[randint(0, len(neighbor)-1)]
    print(f"Grup değişimi için rastgele seçtiğim iş { yeridegisec
ekis}")

olasıyenigruplar=[]
olasıbosalanlar=[]
for i in range(0, len(neighbor)):
    for j in range(0, len(bosalan)):
        if yeridegisecekis==neighbor[i]:
            degisecekisindisi= neighbor.index(neighbor[i])
            degisecekisingrubu=grup[degisecekisindisi]
            degisecekisinalanı=neighboralan[degisecekisindisi]

            if j!=degisecekisingrubu-1:
                olasıyenigruplar.append(j+1)

```

```

        olasibosalanlar.append(bosalan[j][0])
        yenigrup=olasıyenigruplar[randint(0, len(olasıyenigruplar)-1)]
        yenigrupindis= olasıyenigruplar.index(yenigrup)
        print(f" {degisecekisindisi+1} sıradaki {yeridegisecekis}. iş in alanı {degisecekisinalanı} kadardır. ")
        print(f"Rastgele olarak seçtiğim parti {yenigrup} ve bu partinin indisi ise {yenigrupindis}")

        #Grup insert işlemi yapılır
        if degisecekisinalanı<=olasibosalanlar[yenigrupindis]:
            print(f"Seçilen işin alanının sığabileceği yeni parti {yenigrup}")
            grup.remove(grup[degisecekisindisi])
            grup.insert(degisecekisindisi,yenigrup)
            print(f"Yeni parti sıralaması {grup}")

        else:
            print(f"Grubu değiştirebilecek iş yok")

        #partileri artan sıraya göre dizer, bağlı olarak işleri de dizer.

p=[]
r=[]
s=[]

for i in range(1, max(grup)+1):
    for k in range (1,len(mt)+1):
        for j in range(0,len(neighbor)):
            if grup[j]==i and nmt[j]==k:
                p.append(neighbor[j])
                r.append(grup[j])
                s.append(nmt[j])

grup=r
neighbor=p

print(f"Komşuluk ile oluşan grupların sıralı dizimi:{grup} ve komşu {neighbor}")

#herhangi bir partide eleman kalmamış ise kontrol edilir ve partilerin numaraları ardışık olacak şekilde güncellenir.

gg=[]
ygg=[]
for k in range (1, max(grup)+1):
    gg.append(k)
    if (k in grup):
        ygg.append(k)

```

```

for eleman in gg:
    if eleman not in ygg:
        kayıp=eleman
        print(f"Grup değişimi sonucu {kayıp} grubunda hiç eleman kalmamıştır")
        for i in range (0, len(grup)):
            if grup[i]>kayıp and kayıp>0:
                grup[i]=grup[i]-1

print(f"En son durumda partiler:{grup} ve komşu çözüm {neighbor}")
)
#partilerin alan ve boş alanlarını günceller
grupalanı=[]
bosalan=[]
for j in range(1, max(grup)+1):
    toplam=0
    for i in range(0,len(neighbor)):
        if grup[i]==j:
            toplam+=a[neighbor[i]-1]
    grupalanı.append(toplam)
    bosalan.append(MA- grupalanı[j-1])
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların alanı:{grupalanı}")
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların bosalanı:{bosalan}")

return neighbor,grup

```

EK 7. Önerilen model için Python programlama dilinde yazılan TB algoritmasına ait komşu çözüm oluşturma fonksiyonu (Bu kod farklı malzemeler içeren işlerin aynı yazıcı tablasında üretilmediği senaryo içindir.)

```
def komsuluk(atanan, grup):
    #başlangıç çözümü ata
    alan=[]
    malzeme=[]
    hacim=[]
    yükseklik=[]
    neighbor=[]
    for i in range(0, len(atanan)):
        alan.append(a[atanan[i]-1])
        malzeme.append(mt[atanan[i]-1])
        hacim.append(v[atanan[i]-1])
        yükseklik.append(h[atanan[i]-1])

    #Rastgele iki nokta oluşturuyor ve onlar arasında değişim yapıyor
    uz
    uygun=1
    while uygun==1:
        p0 = randint(0, len(atanan)-1)
        p1 = randint(0, len(atanan)-1)
        while malzeme[p0]!=malzeme[p1]:
            p0 = randint(0, len(atanan)-1)
            p1 = randint(0, len(atanan)-1)

        aday = atanan[:]
        aday[p0], aday[p1] = aday[p1], aday[p0]

        neighboralan= alan[:]
        neighboralan[p0], neighboralan[p1] = neighboralan[p1], neighbor
alan[p0]

        nh= yükseklik[:]
        nh[p0], nh[p1] = nh[p1], nh[p0]

        nv=hacim[:]
        nv[p0], nv[p1] = nv[p1], nv[p0]

        nmt=malzeme[:]
        nmt[p0], nmt[p1] = nmt[p1], nmt[p0]

        print(f"{p0+1}'inci ve {p1+1}'inci işler yer değiştirecek")
        print(f"Komşuluk için aday çözüm: {aday} işler ve grupları: {gr
up}")
```

```

#oluşan aday komşu çözümün partiler için alanları kontrol edili
yor. Eğer tabla alanını aşan varsa çözüm uygun değil
grupalanı=[]
bosalan=[]
for j in range(0, max(grup)):
    toplam=0
    for i in range(0, len(aday)):
        if grup[i]==j+1:
            toplam+=neighboralan[i]
        grupalanı.append(toplam)
        bosalan.append(MA- grupalanı[j])

print(f"Komşuluk ile oluşan grupların alanı:{grupalanı}")
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların bosalanı:{bosalan}")

#uygun bir komşu çözüm bulana kadar rastgele sayı üretip değişt
irmeye devam ediyor
hepsiküçük=True
for i in range(0, len(grupalanı)):
    if grupalanı[i]>MA:
        hepsiküçük=False
        uygun=1
        print(f"komşu çözüm uygun değil (not feasible)")
        break
    else:
        uygun=0

#üretilen komşu uygun ise bu çözüm üzerinden insert işlemi yapı
lıyor.
if hepsiküçük==True:
    print(f"komşu çözüm uygun (feasible)")
    neighbor=aday
    print(f"Üretilen komşu çözüm {neighbor}")
    yeridegisecekis=neighbor[randint(0, len(neighbor)-1)]
    print(f"Grup değişimi için rastgele seçtiğim iş { yeridegisec
ekis}")

olasıyenigruplar=[]
olasıbosalanlar=[]
for i in range(0, len(neighbor)):
    for j in range(0, len(bosalan)):
        if yeridegisecekis==neighbor[i]:
            degisecekisindisi= neighbor.index(neighbor[i])
            degisecekisingrubu=grup[degisecekisindisi]
            degisecekisinalanı=neighboralan[degisecekisindisi]

            if j!=degisecekisingrubu-1:
                olasıyenigruplar.append(j+1)

```

```

        olasibosalanlar.append(bosalan[j][0])
        yenigrup=olasıyenigruplar[randint(0, len(olasıyenigruplar)-1)]
        yenigrupindis= olasıyenigruplar.index(yenigrup)
        print(f" {degisecekisindisi+1} sıradaki {yeridegisecekis}. iş in alanı {degisecekisinalanı} kadardır. ")
        print(f"Rastgele olarak seçtiğim parti {yenigrup} ve bu partinin indisi ise {yenigrupindis}")

        #Grup insert işlemi yapılır
        if degisecekisinalanı<=olasibosalanlar[yenigrupindis]:
            print(f"Seçilen işin alanının sığabileceği yeni parti {yenigrup}")
            grup.remove(grup[degisecekisindisi])
            grup.insert(degisecekisindisi,yenigrup)
            print(f"Yeni parti sıralaması {grup}")

        else:
            print(f"Grubu değiştirebilecek iş yok")

        #partileri artan sıraya göre dizer, bağlı olarak işleri de dizer.

p=[]
r=[]
s=[]

for i in range(1, max(grup)+1):
    for k in range (1,len(mt)+1):
        for j in range(0,len(neighbor)):
            if grup[j]==i and nmt[j]==k:
                p.append(neighbor[j])
                r.append(grup[j])
                s.append(nmt[j])
grup=r
neighbor=p

print(f"Komşuluk ile oluşan grupların sıralı dizimi:{grup} ve komşu {neighbor}")

#herhangi bir partide eleman kalmamış ise kontrol edilir ve partilerin numaraları ardışık olacak şekilde güncellenir.

gg=[]
ygg=[]
for k in range (1, max(grup)+1):
    gg.append(k)
    if (k in grup):
        ygg.append(k)

```

```

for eleman in gg:
    if eleman not in ygg:
        kayıp=eleman
        print(f"Grup değişimi sonucu {kayıp} grubunda hiç eleman kalmamıştır")
        for i in range (0, len(grup)):
            if grup[i]>kayıp and kayıp>0:
                grup[i]=grup[i]-1

print(f"En son durumda partiler:{grup} ve komşu çözüm {neighbor}")
)
#partilerin alan ve boş alanlarını günceller
grupalanı=[]
bosalan=[]
for j in range(1, max(grup)+1):
    toplam=0
    for i in range(0,len(neighbor)):
        if grup[i]==j:
            toplam+=a[neighbor[i]-1]
    grupalanı.append(toplam)
    bosalan.append(MA- grupalanı[j-1])
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların alanı:{grupalanı}")
print(f"Komşuluk ile oluşan grupların bosalanı:{bosalan}")

return neighbor,grup

```

EK 8. Geliştirilen model için Python programlama dilinde yazılan koda ait TB algoritması kısmı (Bu kod hazırlık süresinin 0.3 ve 0.9 olduğu senaryolar ve farklı malzemeler içeren işlerin aynı yazıcı tablasında yazılmadığı senaryolar için uygundur.)

```

initial_temp =25
final_temp = 1
alpha = 0.05

atanan, grup= baslama(id)
maxC=amachesapla(atanan,grup)
best=maxC

current_temp = initial_temp
current_state = atanan
solution = current_state
minimum=maxC

while current_temp > final_temp:
    neighbor, grup=komsuluk(solution,grup)
    yeniçözüm=amachesapla(neighbor, grup)
    cost_diff =maxC-yeniçözüm

    if cost_diff > 0:
        solution =neighbor
        minimum= yeniçözüm
        print(f"Daha iyi bir çözüm buldum")
    else:
        if random.uniform(0, 1) < math.exp(-cost_diff / current_temp):
            solution = neighbor
            minimum= yeniçözüm
            print(f"Kötü çözüme şans verdim")
    current_temp *= alpha
    if best>minimum:
        best=minimum
        bestsolution=neighbor
        print(f"En iyi çözümü {bestsolution} olarak güncelledim")

print(bestsolution, best)

```

EK 9. TB parametreleri için Taguchi Deney Sonuçları

a) 0.3 hazırlık süresi – 2 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	287.96	280.29	378.11	368.82	543.32	534.39
	2	201.96	199.13	182.87	174.43	191.26	184.15	266.70	258.07	283.93	276.52	376.86	370.11	540.28	534.49
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	184.15	266.70	258.07	283.63	279.32	374.82	366.74	539.52	535.19
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	184.15	268.33	254.60	286.73	276.52	380.19	369.81	538.99	535.62
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	289.89	279.99	379.00	368.92	541.49	536.29
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	182.04	174.43	191.79	184.15	267.44	255.99	286.43	278.53	377.80	368.88	540.72	535.19
2. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	189.52	267.43	254.60	284.96	276.52	385.25	366.74	542.78	531.29
	2	201.96	199.13	182.87	174.43	191.26	184.15	266.70	258.64	293.16	276.52	380.19	374.52	538.69	531.43
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	284.96	276.52	378.71	366.74	539.98	534.09
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	184.15	266.70	254.60	283.63	279.99	376.86	368.82	539.79	534.09
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	189.52	267.73	258.99	285.26	276.52	374.82	367.58	540.82	535.32
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	182.04	174.43	191.79	186.30	267.26	256.28	286.40	277.22	379.17	368.88	540.41	533.24
3. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	184.15	268.33	258.07	289.89	276.52	379.00	370.11	540.63	534.39
	2	201.96	199.13	182.87	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	284.96	281.59	378.41	369.51	538.69	535.19
	3	201.96	199.13	182.87	174.43	191.26	184.15	268.03	258.99	283.93	276.52	374.82	369.81	543.32	535.49
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	189.52	267.00	258.07	284.63	279.32	380.19	368.52	540.28	535.62
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	379.00	368.92	539.52	538.03
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	182.25	174.43	191.79	185.22	267.56	256.86	285.41	278.10	378.29	369.37	540.49	535.74
4. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	367.58	539.52	533.46
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	285.26	276.52	374.82	366.74	538.69	530.66
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	367.58	540.82	531.43
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.66	276.52	378.41	369.81	538.69	531.52
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	192.59	184.15	266.70	254.60	284.66	276.52	374.82	366.74	538.69	532.26
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.52	184.15	266.70	254.60	284.37	276.52	375.54	367.69	539.28	531.86
5. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	376.86	366.74	539.52	533.93
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.93	276.52	374.82	370.11	538.97	530.66
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.93	276.52	374.82	366.25	539.52	531.82
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	376.86	367.58	538.69	533.93
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.43	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	539.98	531.96
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.84	254.60	284.15	276.52	375.64	367.49	539.34	532.46

a) 0.3 hazırlık süresi – 2 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
6. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	378.71	366.74	539.52	529.02
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	283.63	276.52	374.82	368.92	539.52	529.02
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.73	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	539.52	530.66
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	539.79	532.26
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.93	276.52	374.82	366.74	538.69	534.09
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	267.11	254.60	284.09	276.52	375.60	367.18	539.41	531.01
7. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.25	538.69	529.02
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	365.45	538.69	529.02
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	365.45	538.69	529.25
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.93	276.52	374.82	366.74	540.28	530.36
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	374.82	367.28	539.98	530.66
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.89	276.52	374.82	366.23	539.27	529.66
8. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	528.72
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	285.56	276.52	374.82	366.25	539.79	528.72
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	529.25
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.93	276.52	374.82	365.45	538.69	529.25
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	374.82	366.74	540.28	529.55
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.28	276.52	374.82	366.38	539.23	529.10
9. deney	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.93	276.52	374.82	368.78	538.69	528.72
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	540.28	529.02
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	529.25
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	529.25
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	374.82	366.74	539.52	529.55
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.89	276.52	374.82	367.15	539.17	529.16

b) 0.9 hazırlık süresi- 2 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	379.91	371.31	542.62	532.63
	2	203.16	199.73	183.47	175.63	194.09	185.35	268.03	255.80	286.16	278.32	376.02	373.46	541.00	533.68
	3	203.16	199.73	183.47	175.63	193.19	185.35	268.33	255.80	286.16	282.79	378.11	374.85	543.78	533.86
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	268.33	259.57	285.73	278.32	376.02	369.72	541.72	535.26
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	268.03	255.80	288.96	278.32	376.02	370.02	542.62	536.19
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.21	175.63	192.57	185.35	268.12	256.55	286.37	279.22	377.22	371.87	542.35	534.32
2. deney	1	203.16	199.73	183.47	175.63	196.62	185.35	267.90	255.80	286.16	278.32	381.39	375.08	541.32	532.63
	2	203.16	199.73	183.47	175.63	193.79	185.35	268.33	255.80	287.96	278.32	382.98	369.72	543.98	533.86
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	194.09	185.35	267.90	258.67	287.06	278.32	379.09	370.02	542.62	533.86
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	268.03	255.80	285.26	278.32	383.19	367.79	539.89	535.29
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	282.09	379.91	371.01	543.72	535.29
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.21	175.63	193.64	185.35	268.01	256.37	286.26	279.08	381.31	370.72	542.31	534.18
3. deney	1	203.16	199.73	183.47	175.63	194.09	185.35	267.90	255.80	285.73	281.12	376.02	368.78	540.99	534.06
	2	203.16	199.73	183.47	175.63	193.19	185.35	269.23	255.80	286.16	283.09	389.38	369.98	542.62	535.43
	3	203.16	200.63	183.47	175.63	193.79	185.35	269.23	255.80	287.06	278.32	378.06	371.31	542.88	536.52
	4	203.16	199.73	183.47	175.63	193.19	185.35	268.33	258.67	288.56	278.32	386.26	374.09	541.32	538.09
	5	203.16	199.73	183.47	175.63	193.79	190.72	268.33	258.67	289.59	282.09	384.76	374.18	542.67	538.99
	C_{maks} Ort.	203.16	199.91	183.47	175.63	193.61	186.42	268.60	256.95	287.42	280.59	382.90	371.67	542.10	536.62
4. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	373.55	539.89	530.45
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.94	539.89	535.26
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	193.19	185.35	267.90	255.80	285.73	278.32	380.20	369.12	540.79	530.45
	4	203.16	199.73	183.47	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.73	278.32	376.02	367.79	541.32	530.82
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	268.33	255.80	286.16	278.32	376.02	374.49	541.32	532.72
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.12	175.63	192.13	185.35	267.98	255.80	285.46	278.32	376.86	370.58	540.64	531.94

b)0.9 hazırlık süresi- 2 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
5. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	268.03	255.80	286.16	278.32	376.02	367.94	539.89	534.06
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	378.11	368.82	540.99	531.56
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	286.16	278.32	379.91	372.55	542.62	535.29
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	286.16	278.32	376.02	373.89	541.32	533.25
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.94	539.89	534.53
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.92	255.80	285.63	278.32	377.22	370.23	540.94	533.74
6. deney	1	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	268.33	255.80	284.83	278.32	376.02	370.11	539.89	531.56
	2	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	268.03	255.80	285.26	278.32	376.02	372.32	541.18	532.72
	3	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	288.56	278.32	376.02	373.46	541.32	535.26
	4	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	287.06	278.32	378.06	367.94	542.62	535.29
	5	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.73	278.32	378.11	369.51	542.62	533.25
	C_{maks} Ort.	199.73	203.16	183.04	175.63	191.86	185.35	268.01	255.80	286.29	278.32	376.85	370.67	541.52	533.61
7. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	378.11	368.78	539.89	530.82
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	370.02	539.89	531.35
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.26	278.32	376.02	369.72	539.89	531.56
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.94	540.99	532.63
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.26	278.32	376.02	367.94	541.32	532.72
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.01	278.32	376.44	368.88	540.40	531.81
8. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	379.91	367.94	539.89	529.92
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	368.69	539.89	530.82
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	193.19	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.94	539.89	531.56
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.73	278.32	376.02	367.94	540.79	532.46
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.45	540.99	532.63
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.04	175.63	192.13	185.35	267.90	255.80	285.01	278.32	376.80	367.99	540.29	531.47
9. deney	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.88	539.89	533.68
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.94	539.89	533.16
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	368.82	539.89	529.92
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	285.26	278.32	376.02	367.94	541.18	529.92
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	379.91	367.94	541.32	535.15
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.92	278.32	376.80	368.11	540.43	532.37

c) 2 malzeme- Φ hazırlık süresi senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	301.30	292.12	388.89	378.11	565.62	545.75
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	274.56	258.69	301.30	288.25	389.38	369.51	552.68	545.75
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	276.79	262.46	301.30	292.12	389.38	378.11	565.62	544.12
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	258.69	301.30	288.25	384.33	378.11	549.39	545.75
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	258.69	301.30	292.12	389.38	378.11	553.25	538.61
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.48	276.35	260.20	301.30	290.57	388.27	376.39	557.31	543.99
2. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	274.56	258.69	301.30	288.25	389.38	369.51	558.62	545.75
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	297.53	292.12	389.38	378.11	550.15	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	269.47	258.69	301.30	292.12	378.11	378.11	549.12	545.75
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.11	262.46	301.30	292.12	386.85	378.11	565.62	545.75
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	276.79	262.46	301.30	292.12	389.38	378.11	554.72	545.75
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.48	274.14	260.95	300.55	291.35	386.62	376.39	555.64	544.32
3. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	269.47	258.69	301.30	288.25	386.85	369.51	561.85	545.75
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	276.79	258.69	301.30	292.12	389.38	378.11	565.62	545.75
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	301.30	292.12	389.38	378.11	561.85	543.09
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	301.30	292.12	378.11	378.11	565.62	545.75
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	297.53	292.12	389.38	378.11	544.78	538.61
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.21	275.33	260.95	300.55	291.35	386.62	376.39	559.94	543.79
4. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	273.02	258.69	297.53	288.25	386.85	369.51	543.09	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	274.26	258.69	301.30	288.25	386.85	369.51	548.46	541.32
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	275.76	258.69	301.30	292.12	386.85	376.11	549.39	541.41
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	258.69	301.30	292.12	389.38	378.11	550.02	541.41
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	276.79	262.46	301.30	292.12	389.38	378.11	550.72	541.98
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.21	275.33	259.44	300.55	290.57	387.86	374.27	548.33	540.95

b) 2 malzeme- Φ hazırlık süresi senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
5. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	270.50	258.69	297.53	288.25	378.11	369.51	541.98	540.65
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	272.00	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	543.09	541.32
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	272.00	258.69	301.30	292.12	385.25	369.51	544.78	541.41
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	292.12	385.25	376.11	545.75	541.76
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	292.12	386.85	377.81	547.22	541.98
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.21	272.11	258.69	300.55	290.57	382.72	372.49	544.56	541.42
6. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	272.00	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	541.98	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	272.00	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	544.78	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	288.25	378.11	376.11	545.75	538.61
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	288.25	385.25	378.11	545.89	540.65
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	292.12	386.85	378.11	548.46	541.98
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.21	272.61	258.69	301.30	289.02	381.29	374.27	545.37	539.69
7. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.50	258.69	297.53	288.25	378.11	369.21	541.98	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.50	258.69	301.30	288.25	382.29	369.51	543.09	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	272.00	258.69	301.30	288.25	384.72	377.81	544.78	541.32
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	288.25	386.85	377.81	545.89	541.98
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.11	258.69	301.30	288.25	386.85	377.81	547.22	541.98
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.48	271.82	258.69	300.55	288.25	383.77	374.43	544.59	540.50
8. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.50	258.69	297.53	288.25	378.11	369.51	541.98	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.50	258.69	297.53	288.25	378.11	369.51	543.09	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	272.00	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	543.09	538.61
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	288.25	378.11	376.11	543.09	541.32
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	292.12	378.11	377.81	544.78	541.32
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	271.81	258.69	299.79	289.02	378.11	372.49	543.20	539.69
9. deney	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.50	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	541.98	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	272.00	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	544.78	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	273.02	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	545.75	538.61
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	545.89	538.61
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	273.02	258.69	301.30	292.12	378.11	376.11	545.89	538.61
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.48	272.31	258.69	301.30	289.02	378.11	370.83	544.86	538.61

ç) 0.3 hazırlık süresi -3 malzeme senaryosuna için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.73	254.90	284.23	276.22	384.13	372.35	541.69	531.96
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	196.31	184.45	267.00	259.89	285.26	275.92	379.90	378.37	541.92	532.48
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	193.19	184.45	268.33	259.89	294.92	281.89	383.86	373.59	544.66	532.48
	4	202.26	199.13	183.17	174.73	192.59	189.82	268.33	254.90	289.59	276.22	388.65	370.96	545.68	532.48
	5	202.26	199.13	183.17	174.73	195.72	184.45	267.00	258.67	287.79	276.52	375.72	367.79	545.95	532.48
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	182.37	174.73	193.87	185.52	267.68	257.65	288.36	277.36	382.45	372.61	543.98	532.38
2. deney	1	202.26	199.13	183.17	174.73	192.59	184.45	268.33	254.90	285.26	276.52	388.05	373.89	539.22	529.32
	2	202.26	199.13	182.87	174.73	192.59	184.45	267.73	259.89	289.42	276.22	384.16	375.78	540.63	532.12
	3	202.26	199.13	183.17	174.73	193.19	184.45	267.73	255.20	288.06	281.89	384.38	367.04	541.69	532.12
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	193.19	184.45	268.03	258.67	288.09	276.52	385.12	378.37	542.32	532.18
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	193.19	184.45	267.00	254.90	285.26	279.99	379.01	373.18	542.99	532.48
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	182.57	174.73	192.95	184.45	267.76	256.71	287.22	278.23	384.15	373.65	541.37	531.64
3. deney	1	202.26	199.13	182.87	174.73	192.59	184.45	268.03	255.20	283.93	276.22	388.56	369.12	540.28	531.96
	2	202.26	199.13	182.87	174.73	191.56	184.45	268.33	259.67	288.06	282.79	385.92	377.02	540.52	532.48
	3	202.26	199.13	182.87	174.73	193.49	184.45	268.33	259.59	284.96	276.22	384.13	367.04	540.82	532.48
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	192.59	184.45	267.00	255.20	287.79	276.52	386.12	379.19	542.59	532.48
	5	202.26	199.13	182.87	174.73	192.59	184.45	268.03	258.67	289.42	276.52	384.38	376.08	543.18	532.48
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	182.66	174.73	192.56	184.45	267.94	257.66	286.83	277.66	385.82	373.69	541.48	532.38
4. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	285.26	276.22	375.72	367.79	539.22	530.36
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	285.26	276.22	375.72	368.92	539.22	531.43
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.96	276.22	375.72	366.05	539.29	531.73
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.23	276.22	375.72	370.52	539.29	532.18
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	370.52	540.28	532.26
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.73	276.16	375.72	368.76	539.46	531.59

ç) 0.3 hazırlık süresi -3 malzeme senaryosuna için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
5. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	367.88	538.99	529.55
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.73	254.90	283.93	276.22	379.01	373.18	538.99	529.85
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	192.59	184.45	267.00	254.90	285.26	275.92	375.72	367.04	538.99	530.36
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	367.04	539.22	530.66
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	192.59	184.45	267.73	254.90	285.26	276.52	379.30	367.04	539.22	531.43
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.97	184.45	267.29	254.90	284.47	276.16	377.10	368.44	539.08	530.37
6. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.23	275.92	375.72	367.88	539.22	529.55
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	258.67	285.26	276.22	375.72	367.04	539.52	530.66
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	258.67	283.93	276.22	375.72	369.42	539.82	532.12
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.96	275.92	375.72	368.18	540.09	532.18
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	367.04	540.58	532.26
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	256.41	284.47	276.10	375.72	367.91	539.85	531.35
7. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	379.01	367.04	538.99	529.32
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.23	275.92	375.72	367.04	539.22	529.55
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	367.04	539.22	529.85
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	367.04	539.52	529.85
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	366.05	539.52	530.36
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.99	275.98	376.38	366.84	539.29	529.78
8. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	367.88	539.22	531.73
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	367.04	538.99	529.55
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.96	276.22	375.72	367.04	538.99	531.43
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	367.04	538.99	531.43
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	367.04	538.99	530.36
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.14	276.04	375.72	367.21	539.04	530.90
9. deney	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	366.05	539.29	529.55
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	285.26	276.22	379.01	372.35	539.52	529.55
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	367.04	539.29	529.55
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	268.03	254.90	284.23	275.92	375.72	367.04	539.22	530.36
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	370.71	538.99	532.05
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.20	254.90	284.26	276.16	376.38	368.64	539.26	530.21

d) 0.9 hazırlık süresi- 3 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	204.06	199.73	184.07	176.53	193.79	186.25	268.80	256.70	287.06	278.32	387.81	373.79	541.32	531.56
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	193.79	186.25	268.33	256.70	290.49	283.69	378.72	375.35	542.08	532.78
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	194.99	186.25	268.33	260.47	287.06	281.12	383.19	370.88	544.52	533.16
	4	204.06	199.73	184.07	176.53	195.89	186.25	268.33	260.47	290.83	281.19	381.10	374.68	545.66	533.68
	5	204.06	199.73	184.07	176.53	194.99	186.25	268.80	256.70	290.36	280.22	390.33	370.72	545.80	533.68
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.65	176.53	194.69	186.25	268.52	258.21	289.16	280.91	384.23	373.08	543.87	532.97
2. deney	1	204.06	199.73	184.07	176.53	197.82	186.25	268.33	260.47	287.06	283.69	389.74	380.02	541.32	533.53
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	271.54	257.60	285.73	283.99	382.90	376.49	544.62	533.68
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	194.99	186.25	268.33	257.60	293.56	280.22	389.85	373.11	545.85	533.68
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	193.79	186.25	268.33	262.29	293.73	280.22	391.47	377.82	546.69	533.68
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	194.99	186.25	270.73	256.70	296.73	281.12	383.75	380.02	546.99	533.68
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.24	176.53	194.87	186.25	269.45	258.93	291.36	281.85	387.54	377.49	545.09	533.65
3. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	191.62	269.23	260.47	287.06	281.12	386.47	376.92	540.42	533.68
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	269.23	260.47	290.79	283.69	381.95	378.27	544.88	533.68
	3	204.06	199.73	184.07	176.53	197.52	191.62	269.23	256.70	286.16	277.42	390.48	375.69	545.21	533.68
	4	204.06	199.73	185.27	176.53	197.52	186.25	269.23	260.47	296.29	277.42	378.72	380.17	545.42	533.68
	5	204.06	199.73	184.07	176.53	194.99	186.25	268.33	260.27	292.59	281.19	385.28	378.48	546.32	533.68
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.89	176.53	195.11	188.40	269.05	259.67	290.58	280.17	384.58	377.91	544.45	533.68
4. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	286.63	276.52	378.72	376.94	540.42	531.35
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	193.79	186.25	268.33	256.70	289.86	276.52	380.81	369.68	540.79	531.35
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	384.33	372.81	541.53	531.72
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	276.52	380.81	370.02	541.69	531.72
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	193.79	186.25	269.23	256.70	287.06	277.42	378.72	375.08	541.72	533.16
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	193.17	186.25	268.51	256.70	287.27	276.70	380.68	372.91	541.23	531.86

d) 0.9 hazırlık süresi- 3 malzeme senaryosu için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
5. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	278.32	378.72	375.98	540.42	531.35
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	194.99	186.25	268.33	256.70	287.06	277.42	380.81	368.84	540.42	531.72
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.80	256.70	285.73	276.52	386.13	369.68	541.89	532.78
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	277.42	380.81	368.84	541.89	533.16
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	277.42	381.10	368.84	542.08	533.16
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	193.21	186.25	268.42	256.70	286.27	277.42	381.52	370.44	541.34	532.43
6. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	193.79	186.25	268.80	256.70	287.06	277.42	381.10	368.84	540.42	531.56
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	277.42	378.72	368.84	540.79	531.56
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	269.23	257.60	285.73	277.42	378.72	368.84	541.32	533.62
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.80	257.60	287.06	276.52	378.72	373.19	541.72	533.68
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	194.99	186.25	268.33	257.60	285.73	276.52	378.72	368.84	542.62	533.68
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	193.41	186.25	268.70	257.24	286.53	277.06	379.20	369.71	541.37	532.82
7. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	531.35
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	531.35
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	375.35	540.42	532.46
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	276.52	380.81	368.84	540.79	532.46
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	541.32	532.63
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	286.00	276.52	379.14	370.14	540.67	532.05
8. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.35	540.79	531.35
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.35	540.42	531.35
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	277.42	378.72	368.84	541.32	533.25
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	277.42	378.72	368.45	540.42	531.56
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	532.25
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	286.00	276.88	378.72	368.57	540.67	531.95
9. deney	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	277.42	378.72	371.82	541.32	532.46
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	370.72	542.62	533.68
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	370.02	540.79	532.46
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	541.53	533.68
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	257.60	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	533.16
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.88	285.73	276.70	378.72	370.05	541.33	533.09

e) Φ hazırlık süresi- 3 malzeme senaryosuna için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	270.63	307.53	292.12	390.91	383.46	560.89	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	406.70	383.46	565.09	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	407.30	383.46	565.63	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	412.07	383.46	565.63	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	412.07	383.46	565.63	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	274.39	308.52	292.12	405.81	383.46	564.57	550.59
2. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	270.63	307.35	292.12	394.28	380.94	555.65	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	406.70	380.94	559.29	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	383.46	559.29	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	312.63	292.12	409.30	383.46	559.82	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	312.63	292.12	412.07	383.46	565.63	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	274.39	309.80	292.12	405.81	382.45	559.94	550.59
3. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	390.91	380.94	558.59	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	402.17	380.94	560.36	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	409.00	383.46	560.36	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	409.30	383.46	563.76	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	312.45	292.12	412.07	383.46	563.76	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	309.54	292.12	404.69	382.45	561.37	550.59
4. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	270.63	307.53	292.12	400.80	380.94	565.63	551.75
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	402.17	383.46	565.63	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	402.17	383.46	565.63	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	383.46	565.63	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	312.63	292.12	412.07	383.46	565.63	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	274.39	309.35	292.12	404.78	382.96	565.63	551.75

e) Φ hazırlık süresi- 3 malzeme senaryosuna için 5 tekrara ait C_{maks} değerleri (Devamı)

	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
5. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	390.91	380.94	553.26	544.65
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	399.40	383.46	555.65	545.95
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	400.80	383.46	563.76	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	402.17	383.46	563.76	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	404.17	383.46	565.09	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.03	292.12	399.49	382.96	560.31	549.17
6. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	399.40	383.46	549.32	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	400.80	383.46	559.82	545.95
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	402.17	383.46	563.76	545.95
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	403.87	383.46	564.39	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	383.46	565.09	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.03	292.12	402.59	383.46	560.48	548.27
7. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	390.91	380.94	549.85	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	404.77	380.94	563.76	549.89
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	380.94	563.86	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	383.46	565.63	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	406.70	383.46	565.63	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.56	292.12	403.16	381.95	561.75	550.22
8. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.35	292.12	403.87	380.94	558.06	551.75
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	412.07	380.94	558.59	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	412.07	380.94	563.76	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	412.07	383.46	559.29	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	412.07	383.46	559.82	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.49	292.12	410.43	381.95	559.91	551.75
9. deney	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	390.91	380.94	555.12	545.95
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	392.95	380.94	563.86	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	400.80	380.94	563.86	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.68	292.12	400.80	380.94	555.12	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.86	292.12	400.80	383.46	563.76	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	308.56	292.12	397.25	381.44	560.35	550.59

EK 10. TB algoritması için bulunan optimum parametre seviyeleri ile elde edilen C_{maks} değerleri

2 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks} (sa.)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	528.72
	2	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	285.56	276.52	374.82	366.25	539.79	528.72
	3	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.63	276.52	374.82	366.74	538.69	529.25
	4	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	283.93	276.52	374.82	365.44	538.69	529.25
	5	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.63	276.52	374.82	366.74	540.28	529.55
	C_{maks} Ort.	201.96	199.13	181.84	174.43	191.26	184.15	266.70	254.60	284.28	276.52	374.82	366.38	539.23	529.10
2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks}	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	366.65	539.89	529.92
	2	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.45	539.89	529.92
	3	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.45	539.89	529.92
	4	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.79	539.89	530.45
	5	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.79	539.89	530.82
	C_{maks} Ort.	203.16	199.73	183.04	175.63	191.86	185.35	267.90	255.80	284.83	278.32	376.02	367.43	539.89	530.20
2 malzeme- \varnothing hazırlık süresi	C_{maks}	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	269.46	258.69	297.53	288.25	378.11	369.21	541.98	538.61
	2	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	269.46	258.69	297.53	288.25	378.11	369.21	543.09	538.61
	3	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	269.46	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	543.09	538.61
	4	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.41	269.46	258.69	301.30	288.25	378.11	369.51	543.09	541.32
	5	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	196.74	270.49	258.69	301.30	292.12	378.11	369.51	544.78	541.32
	C_{maks} Ort.	209.96	209.96	183.76	183.76	196.74	195.68	269.67	258.69	299.79	289.02	378.11	369.39	543.20	539.69
3 malzeme- 0.3 hazırlık süresi	C_{maks}	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	276.22	375.72	366.55	539.22	531.73
	2	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	368.18	538.99	529.55
	3	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.96	276.22	375.72	368.82	538.99	531.43
	4	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	369.08	538.99	531.43
	5	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	283.93	275.92	375.72	369.12	538.99	530.36
	C_{maks} Ort.	202.26	199.13	181.84	174.73	191.56	184.45	267.00	254.90	284.14	276.04	375.72	368.35	539.04	530.90

EK 10. TB algoritması için bulunan optimum parametre seviyeleri ile elde edilen C_{maks} değerleri (Devamı)

3 malzeme- 0.9 hazırlık süresi	C_{maks}	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.35	540.42	531.35
	2	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.35	540.42	531.35
	3	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	531.56
	4	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	285.73	276.52	378.72	368.84	540.42	531.56
	5	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	287.06	276.52	378.72	368.84	540.42	531.72
	C_{maks} Ort.	204.06	199.73	183.04	176.53	192.76	186.25	268.33	256.70	286.00	276.52	378.72	368.65	540.42	531.51
3 malzeme- \varnothing hazırlık süresi	C_{maks}	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
	1	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	270.63	307.35	292.12	390.91	380.94	547.99	544.65
	2	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	270.63	307.35	292.12	396.80	380.94	549.85	551.75
	3	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.35	292.12	399.40	383.46	549.85	551.75
	4	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	402.17	383.46	553.79	551.75
	5	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	275.32	307.53	292.12	406.70	383.46	555.12	551.75
	C_{maks} Ort.	218.70	218.70	192.56	192.56	208.18	204.81	275.32	273.45	307.42	292.12	399.20	382.45	551.32	550.33

(Koyu renkle işaretlenen veriler matematiksel modelde bulunan optimuma eşit veya küçük olan verilerdir.)

EK 11. 25 ve 46 iş içeren veri setleri

a) P25 (MA=1200)

P25	Yükseklik	Hacim	Alan	Malzeme tipi (2 malzeme)	Malzeme tipi (3 malzeme)
1	14.38	989.53	114.56	1	2
2	3.5	683.48	454.89	2	2
3	3	722.91	615.12	2	3
4	19.14	164.78	33.58	2	3
5	16.78	802.8	248.15	2	3
6	34.2	8777.6	666.63	1	1
7	1.18	44.74	71.04	1	1
8	34.61	295.45	51.41	2	2
9	13.87	670.69	71.15	1	2
10	22.73	991.45	161.49	2	3
11	30.07	1824.9	145.62	1	1
12	20.45	143.73	21.15	2	2
13	17.61	617.98	146.57	1	3
14	9.18	1193.36	728.33	2	2
15	13.22	641.7	179.75	1	3
16	22.58	508.46	64.76	1	1
17	1.36	216.44	270.44	1	3
18	36.01	906.42	162.75	1	1
19	1.56	426.67	397.56	2	2
20	14.06	800.72	198.55	2	2
21	13.11	668.72	282.93	2	1
22	13.55	670.79	174.43	2	3
23	7.84	977.65	222.18	2	2
24	32.61	1244.13	69.79	1	1
25	7.62	1055.16	366.12	1	3

b) P46 (MA=1200)

P46	Yükseklik	Hacim	Alan	Malzeme tipi (2 malzeme)	Malzeme tipi (3 malzeme)
1	4.27	102.83	122.62	1	2
2	2.18	214.79	178.34	1	2
3	29.58	840.17	273.83	2	2
4	18.99	683.06	89.68	2	2
5	10.77	1928.6	269.75	2	1
6	26.67	1375.9	258.54	2	3
7	14.38	989.53	114.56	1	2
8	3.5	683.48	454.89	1	2
9	3	722.91	615.12	1	3
10	19.14	164.78	33.58	2	3
11	16.78	802.8	248.15	2	1
12	34.2	8777.6	666.63	2	1
13	1.18	44.74	71.04	1	2
14	34.61	295.45	51.41	2	2
15	13.87	670.69	71.15	1	2
16	22.73	991.45	161.49	1	3
17	17.04	703.08	99.53	2	1
18	27.94	272.92	56.85	2	2
19	17.38	125.7	50.02	1	3
20	13.09	285.37	99.36	2	1
21	4.59	610.69	222.9	2	3
22	22.58	508.46	64.76	2	1
23	1.36	216.44	270.44	2	3
24	36.01	906.42	162.75	2	1
25	1.56	426.67	397.56	1	3
26	14.06	800.72	198.55	2	1
27	13.11	668.72	282.93	2	3

a) P46 (MA=1200) (Devamı)

P46	Yükseklik	Hacim	Alan	Malzeme tipi (2 malzeme)	Malzeme tipi (3 malzeme)
28	13.55	670.79	174.43	1	1
29	7.84	977.65	222.18	2	3
30	32.61	1244.13	69.79	1	1
31	7.62	1055.16	366.12	1	1
32	12.26	462.54	93.09	2	3
33	12.3	241.05	66.52	2	3
34	27.76	128.78	39.03	2	3
35	17.61	617.98	146.57	1	3
36	9.18	1193.36	728.33	2	1
37	13.22	641.7	179.75	2	1
38	28.26	176.98	56	2	1
39	31.94	1143.04	235.16	2	2
40	30.8	1650.23	149.8	1	1
41	20.64	1348	102.37	2	2
42	7.42	70.69	39.91	1	2
43	13.8	54.83	30.67	2	1
44	14.05	876.28	284.65	1	2
45	1.79	42.01	65.95	2	3
46	38.82	1599.67	62.97	2	3

EK 12. TB algoritması için bulunan optimum parametre seviyeleri ile elde edilen ortalama C_{maks} değerleri ve ortalama süreler

	2 malzeme-0.3 hazırlık süresi		2 malzeme- 0.9 hazırlık süresi		2 malzeme- φ hazırlık süresi		3 malzeme-0.3 hazırlık süresi		3 malzeme-0.9 hazırlık süresi		3 malzeme- φ hazırlık süresi	
	Süre	Ort. Süre	Süre	Ort. Süre	Süre	Ort. Süre	Süre	Ort. Süre	Süre	Ort. Süre	Süre	Ort. Süre
P1	4.31	0.33	6.59	0.56	3.92	0.52	6.91	0.37	8.58	0.53	2.64	0.43
P2	3.78	0.26	5.50	0.49	4.78	0.56	5.08	0.36	6.30	0.52	3.03	0.45
P3	4.58	0.31	4.17	0.58	12.59	0.60	28.38	0.41	41.34	0.58	8.53	0.50
P4	18.92	0.28	16.26	0.54	17.72	0.57	38.27	0.38	42.27	0.55	8.36	0.44
P5	28.67	0.34	31.59	0.59	110.30	0.64	330.91	0.43	515.75	0.60	41.58	0.52
P6	35.03	0.35	102.19	0.57	64.42	0.60	449.67	0.38	370.13	0.58	43.30	0.48
P7	114.22	0.46	222.98	0.69	522.52	0.73	2035.42	0.59	1349.13	0.69	61.23	0.55
P8	787.89	1.31	726.42	1.92	918.61	2.15	7200	1.34	7200	1.89	88.44	1.49
P9	3502.19	1.48	548.88	2.12	2409.12	2.13	7200	1.56	7200	2.15	485.80	1.79
P10	7200	1.28	7200	1.94	4567.70	2.02	7200	1.36	7200	1.91	436.75	1.55
P11	7200	1.58	1117.38	2.26	7200	2.14	7200	1.64	7200	2.29	7200	1.91
P12	7200	1.32	7200	1.90	7200	1.76	7200	1.42	7200	2.04	7200	1.75
P13	7200	1.61	7200	2.26	4088.97	2.01	7200	1.75	7200	2.28	7200	2.00
P14	7200	1.58	7200	2.00	7200	1.86	7200	1.52	7200	2.12	7200	1.87

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Gülhan TOĞA
Uyruğu: Türkiye (TC)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı	2012
Lisans	Gaziantep Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Nuh Mehmet Küçükçalık Anadolu Lisesi, Kayseri	2003

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2009- Halen	Erciyes Üniversitesi, Mühendisliği Bölümü	Endüstri Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

A. SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Toksarı M. D., Toğa G., Single Batch Processing Machine Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times and Multi Material Parts in Additive Manufacturing, CIRP Journal of Manufacturing Science And Technology, cilt.37, ss.302-311,2022.

Toğa G., Atalay B., Toksarı M. D., COVID-19 prevalence forecasting using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) and Artificial Neural Networks (ANN): Case of Turkey, Journal of Infection And Public Health, cilt.14, sa.7, ss.811-816, 2021.

Dursun Çapar T., Kavuncuoğlu H., Yalçın H., Toğa G., Rheological analysis for detection of extra virgin olive oil adulteration with vegetable oils: predicting oil type by artificial neural network, Quality Assurance And Safety of Crops & Foods, cilt.11, ss.687-699,2019.

B. Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Toğa M., Toğa G., Diffusion and Substitution Effect on Telecommunication Technologies in Turkey, Academic Platform-Journal of Engineering and Science, cilt.7, sa.3, ss.496-506,2019.

C. Kitap & Kitap Bölümleri

Zeydan M., Pala G., Reducing Mirror Slippage of Nightstand with Plackett-Burman DOE and ANN Techniques, Total Quality Management and Six Sigma, Aized T., Editör, Intech, Rijeka, ss.101-114,2012.

Ç. Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

Gürbüz F., Toğa G., Usage of the Facial Action Coding System to predict customer gender profile: A neuro marketing application in Turkey, 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Ankara, Türkiye, 19 -21 Ekim 2018.

- Toğa M., Toğa G., Türkiye’deki Sabit-Mobil İkame Etkisi Üzerine Bir Araştırma UMTEBI I-Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, Gaziantep, Türkiye, 21 -23 Haziran 2018, ss.378.
- Toğa M., Toğa G., Mobil İletişim Teknolojilerinin Türkiye’de Yayılımı ve Rekabeti UMTEBI I-Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, Gaziantep, Türkiye, 21 -23 Haziran 2018, ss.378.
- Toğa G., Gürbüz F. Usage of artificial neural network as a tool of technology diffusion modeling, ICENS-4. International Conference on Engineering and Natural Science, Kyiv, Ukrayna, 02 -06 Mayıs 2018, ss.1231.
- Gürbüz F., Akdal Ş., Toğa G., Gültepe M., A Neuromarketing Application in Turkey, ICENS-4. International Conference on Engineering and Natural Science, Kiev, Ukrayna, 02 -06 Mayıs 2018, ss.1232.
- Gürbüz F., Ertem A., Eren Y. E., Toğa G., Reverse Logistic Network Design for Recycling of Solid Wastes, ICENS-4. International Conference on Engineering and Natural Science, Kiev, Ukrayna, 02 -06 Mayıs 2018, ss.1233.
- Dereli T., Toğa G., Durmuşoğlu A., Effects of new payment regulations on mobile phone diffusion in Turkey, 44th International Conference on Computers and Industrial Engineering and 9th International Symposium on, Intelligent Manufacturing and Service Systems, İstanbul, Türkiye, 14 -16 Ekim 2014, ss.1883-1893.
- Dereli T., Toğa G., Durmuşoğlu A., On the bridges between two disciplines: Technology management-Industrial engineering, PICMET 2014, Kanazawa, Japonya, 27 -31 Ağustos 2014, ss.1515-1522.
- Dereli T., Toğa G., Durmuşoğlu A., An emerging trend in Industrial Engineering: Technology Management publications, YAEM 2014, Bursa, Türkiye, 25 -27 Haziran 2014, ss.117

Pala G., Zeydan M. Veri Madenciliği Teknikleri ile Stent İmplantasyonu Sonrası Ölümünün Tahmin Edilmesi YAEM 2012, İstanbul, Türkiye, 1 -04 Haziran 2012, ss.127 XI.

Zeydan M., Pala G., Reducing Variation of Dyeing Process in Textile Manufacturing Industry, International Conference on Industrial and Information Engineering, Venice, İtalya, 1 -04 Kasım 2011, ss.1626- 1634.

D. Projeler

Kalay N., Pala G., İnanç M. T., Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Koroner Arter hastalığında kardiyak olayların öngörülmesinde rolü olan yeni biyokimyasal parametrelerin yapay sinir ağları ile belirlenmesi, 2011-2014.

Zeydan M., Pala G., Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Halı Üretiminde Boya Renk Farklılığı Değişkenliğinin Deney Tasarımı ile Azaltılması, 2010-2012.