

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK İŞ AKIŞ ATÖLYESİNDE ÖĞRENME ETKİSİ ALTINDA ÜRÜN
ÇİZELGELEME PROBLEMİ: SAVUNMA SANAYİSİNDE BİR UYGULAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeyda ILGAZ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr.Üyesi Salih TEKİN

Ağustos, 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALİOĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151311037 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Şeyda ILGAZ**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ESNEK İŞ AKIŞ ATÖLYESİNDE ÖĞRENME ETKİSİ ALTINDA ÜRÜN ÇİZELGELEME PROBLEMİ: SAVUNMA SANAYİSİNDE BİR UYGULAMA**” başlıklı tezi **09.08.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : Dr. Öğr.Üyesi Salih TEKİN
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : Dr. Öğr.Üyesi Gültekin KUYZU
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Kumru Didem ATALAY (Başkan)
Başkent Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Salih TEKİN
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Dr. Öğr.Üyesi Kürşad DERİNKUYU
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Şeyda Ilgaz

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ESNEK İŞ AKIŞ ATÖLYESİNDE ÖĞRENME ETKİSİ ALTINDA ÜRÜN
ÇİZELGELEME PROBLEMİ: SAVUNMA SANAYİSİNDE BİR UYGULAMA
Şeyda Ilgaz

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Salih TEKİN

Eş Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Gültekin KUYUZU

Tarih: Ağustos 2018

Atölyede yapılacak işler aynı makineleri aynı sırada takip ediyorsa bu ortam akış tipi olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda akış tipi çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Ancak literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların gerçek hayat problemlerine uygulanabilirlik konusunda yetersiz olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında elektronik parçalar üreten bir savunma sanayi firmasına ait üretim tesisindeki esnek iş akış tipi montaj hattı ele alınarak en küçük yayılım zamanını bulmayı hedefleyen çizelgeleme problemi çözülmüştür. Böylece teorik bilgilerin pratikte uygulanması konusuna katkı sağlaması hedeflenmektedir. Söz konusu problemde hattan sorumlu baş teknisyen tarafından işlerin istasyonlara atanması manuel olarak yapılmaktadır. Ancak hattaki bazı istasyonlara işler çokça yığılırken bazılarında da bekleme süreleri oldukça fazladır. Amaç, verilen haftalık üretim planı dahilinde ürün öncelik ilişkilerini göz önüne alarak yayılım zamanını en küçükleyen üretim çizelgesini oluşturmaktır. Ele alınan bu gerçek hayat probleminde operasyon süreleri deterministik kabul edilmiştir. Problemi klasik montaj hattı problemlerinden ayıran önemli bir fark istasyonlardan bazılarında ürünün boyutuna göre aynı üründen birden fazla üretilmesidir. Bu durum ürünlerin alt gruplar halinde üretilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Ürünlere ait alt grupların karıştırılarak ve karıştırılmadan üretimini sağlayan karma tam sayılı matematiksel modeller geliştirilmiştir. İncelenen problem NP-Zor olup, matematiksel model küçük boyutlu problemler için optimal sonuç verirken büyük boyutlu problemler için Excel VBA programında kodlanarak probleme uyarlanmış NEH sezgiseli çözdürülmüştür. Literatürde etkinliği kanıtlanmış NEH algoritması zaman kriteri açısından yüksek performans göstermekte ve optimale yakın sonuçlar üretmektedir. Bunun yanı sıra üretim hattındaki bazı istasyonlarda insan faktörünün çok olması sebebiyle pozisyona bağlı öğrenme etkisi modele ve algoritmaya eklenerek problem çözdürülmüştür.

Ürönlere ait alt grupların karıştırlarak üretildiği ve aynı ürüne ait alt grupların arka arkaya üretildiği durumlar için sonuçlar alınıp, analizler yapılmıştır. Öğrenme etkisinin de ürün sırasına etkisi araştırılmış ve sonucunda firma için üretimde kullanılmak üzere optimizasyon tabanlı bir karar destek sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen bu karar destek sistemi sayesinde ele alınan üretim hattı için haftalık üretim çizelgesi oluşturularak haftalık yayılım zamanında yaklaşık %21'lik bir iyileşme görölmüştür.

Anahtar Kelimeler: Esnek iş akış atölyesi, NEH Algoritması, Karma modellenli üretim hattı, Öğrenme etkisi, Deterministik operasyon süresi



ABSTRACT

Master of Science

PRODUCT SCHEDULING PROBLEM WITH LEARNING EFFECT IN A FLEXIBLE FLOW SHOP: AN APPLICATION IN DEFENSE INDUSTRY

Şeyda ILGAZ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Salih TEKİN

Co-Supervisor: Asst. Prof. Gültekin KUYZU

Date: August 2018

If the works to be done in the workshop follow the same machines in the same order, this is called the flow type production line. In recent years, work on flow type scheduling problems has been increasing. However, when the literature is examined, it is seen that there is a lack of studies which can be applicable to the real life problems. In this thesis, the scheduling problem which aims to find the minimum completion time is solved by examining the flexible workflow type assembly line belonging to a defense company which produces electronic components. Thus, it is aimed to contribute to the application of theoretical knowledge in practice. In this problem, the chief technician responsible for the production line has to manually assign jobs to the stations. However, while some stations on the line are heavily cluttered, waiting times are quite high. The goal is to automatically generate a production schedule that minimizes makespan, taking into account product priority relationships within the given weekly production schedule. In this real life problem, the durations of operation are considered deterministic. An important distinction that separates the problem from classical assembly line problems is that products can be produced more than one in the some stations according to their size, which causes that the products must be produced

in subgroups. A mixed integer mathematical model has been developed which allows the production of subgroups of products with mixing and without mixing. The problem is NP-Hard, and the mathematical model gives optimal results for small-sized problems, while large-scale problems are solved by adapted NEH Algorithm which shows high performance in terms of time and produces near-optimal results. The algorithm is coded in Excel VBA program. Additionally, as there is a significant involvement of humans in the scheduling environment, the number of activities subject to learning is high. Therefore, learning effects is examined in the production line. For the cases where subgroups of products are produced by mixing and without mixing, results were obtained and analyzed. After analyzing the learning effect on the product scheduling, the decision support system for the company was developed. Through the decision support system, the weekly production schedule creation process has been automated, which has resulted in an improvement of approximately 21% in the weekly makespan of the products.

Keywords: Permutation Flow Shop, Learning Effect, Lot Splitting, Lot Intermingling, NEH Algorithm

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bana her zaman destek olan, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, çalıőmaktan onur duyduğum hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYZU'ya,

Kıymetli zamanlarını ayırıp tezimi okuyan ve tavsiyelerde bulunan tez jürimin saygıdeğer üyelerine,

Yüksek Lisans eğitimim süresince bana burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne,

TOBB ETÜ'deki ilk günümde bu yana destekleri ve yardımlarıyla hayatıma değer katan Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

TOBB ETÜ'nün şüphesiz bana en büyük hediyesi olan kıymetli dostlarıma ve beni yetiştirip bugüne kadar benden sevgisini ve desteğini eksik etmeyen aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ÜRETİM ÇİZELGELEMENİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.1 İşlerin Geliş Şekli	3
2.2 İşlerin Görüleceği Tezgâh Sayısı	3
2.3 İş Akışı	4
2.4 Performans Ölçütü.....	4
3. LİTERATÜR TARAMASI	5
3.1. Ürünlerin Alt Gruplar Halinde Üretildiği Çizelgeleme Problemleri.....	5
3.2 Öğrenme Etkisi Altında Çizelgeleme Problemleri.....	7
3.2.1 Konum esaslı öğrenme etkisi	8
3.2.2 İşlem zamanlarının toplamı esaslı öğrenme etkisi	10
4. PROBLEM TANIMI	13
4.1 İncelenen Otomatik Dizgi Hattının Özellikleri	13
5. PROBLEM FORMÜLASYONU	19
5.1 Geliştirilen Matematiksel Modeller	19
5.1.1 Matematiksel model 1	19
5.1.2 Matematiksel model 2	22
5.1.2.1 Matematiksel Modellerin Johnson Algoritması ile Karşılaştırılması. 25	
5.1.3 Öğrenme etkisi formülasyonu	27
5.2 Geliştirilen Sezgisel Algoritmalar	28
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
6.1 Matematiksel Model İle Geliştirilen Sezgisel Algoritmanın Karşılaştırılması 35	
6.2 KDS Öncesi ve Sonrası Firmadaki Üretim Durumu	43
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	45
KAYNAKLAR	47
EKLER	49
ÖZGEÇMİŞ	50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.2	: Üretim Hattının Detaylı Görünüm.....	14
Şekil 5.1	: Uyarlanan ilk NEH yöntemini özetleyen algoritma.....	30
Şekil 5.2	: Uyarlanan ilk NEH algoritması iş akış şeması	31
Şekil 5.3	: Uyarlanan ikinci NEH yöntemini özetleyen algoritma	32
Şekil 5.4	: Uyarlanan ikinci NEH algoritması iş akış şeması	33



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 :Johnson Algoritmasının uygulandığı veri seti	26
Çizelge 5.2 :N=5, M=3,6, A=6 için sonuçlar.....	26
Çizelge 5.3 :Öğrenme Oranını Hesaplamak İçin Kullanılan Veriler	28
Çizelge 6.1 :Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi(N=2).....	35
Çizelge 6.2 :N=2, A=2,7,a=(-0,322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları.....	36
Çizelge 6.3 :Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi (N=5).....	38
Çizelge 6.4 :N=5, A=7,19, a=(-0,322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları	39
Çizelge 6.5 :Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi (N=10).....	40
Çizelge 6.6 :N=10, A=21,91, a=(-0.322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları	41
Çizelge 6.7 :KDS etkinliğini ölçmek için kullanılan ürünlere ait veriler	43
Çizelge 6.8 :KDS uygulandığında elde edilen sonuçlar.....	44
Çizelge 6.9 :KDS uygulandığı ve uygulanmadığı durum karşılaştırması.....	44

KISALTMALAR

NEH	: Nawaz Enscore, Ham (1983) Tarafından Geliştirilen Sezgisel Algoritma
U-NEH	: Uyarlanmış NEH Algoritması
CPU	: Merkezi İşlemci Birimi
VBA	: Visual Basic for Application
EKİZ	: En Küçük İşlem Zamanı
NP	: Non-Polinomial
Dk	: Dakika
LR	: Öğrenme oranı
WSPT	: Weighted Short Proses Time
EDD	: Earliest Due Date
SPT	: Shortest Process Time

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

N

M

G

Açıklamalar

Ürünler kümesi

İstasyonlar kümesi

Büyük sayı



1. GİRİŞ

Atölyede yapılacak işler aynı makineleri aynı sırada takip ediyorsa bu ortam akış tipi atölye olarak adlandırılmaktadır [1]. Son yıllarda akış tipi atölyelerde çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Ancak literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların gerçek hayat problemlerine uygulanabilirlik konusunda yetersiz olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada imalat sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan esnek iş akış atölyesinde öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemi ele alınacaktır. Bu kapsamda ele alınan konu; savunma sanayi sektöründe yer alan ve esnek iş akış tipi montaj hattına sahip firmadaki işlerin ve işlere ait operasyonların istasyonlara atanması ve son işin tamamlanma zamanını (C_{max}) en küçükleyecek şekilde işlerin istasyonlarda sıralanması problemi midir. Ele alınan problemi çözerek haftalık üretim çizelgesini oluşturacak optimizasyon tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte işletmelere rekabet avantajı sağlamak ancak müşteri isteklerine hızlıca yanıt vererek ve üretim kaynaklarını etkin kullanarak mümkün olmaktadır. Bu avantajı kazanabilmek için firmaların etkin bir çizelgeleme çalışması yapması gerekmektedir. Bu çalışmada çözümü oldukça zor bir problemin sezgisel bir yöntem sayesinde çözülerek işin yapıldığı güncel durumdan daha iyi sonuç elde edebilirliği gösterilmiştir. Haftalık üretim süresi içinde, son ürünün son istasyondan çıkış zamanının yaklaşık %21 oranında azalması sağlanmıştır. Sezgisel algoritmanın kodları VBA (Visual Basic for Application) kullanılarak MS Excel ara yüzünde yazılmıştır. Bu algoritma yardımıyla oluşturulan karar destek sistemi ile firma, üretim sürecini daha verimli kullanabilme ve gözlemlenebilirliğine sahip olmuştur. Haftalık üretim çizelgesini otomatik olarak belirleyip kaynak kullanımında önemli ölçüde kazanç sağlayacak olan bu çalışma firmada yer alan diğer üretim hatlarında yapılacak benzer çalışmalara da öncülük edecek niteliktedir.

Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir: ilk kısımda üretim çizelgelemenin nasıl sınıflandırıldığından bahsedilmiş, ikinci kısımda ele alınan problemle ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar anlatılmış ve bu çalışmalar gruplandırılarak detaylı

olarak incelenmiştir. Üçüncü kısımda problemin tanımından bahsedilmiş, bu tez çalışmasının motivasyonunu oluşturan gerçek hayat probleminden ve problemin bileşenlerinden detaylı olarak bahsedilmiştir. Dördüncü kısımda bu problemi çözmek için geliştirilen matematiksel modellerden ve sezgisel algoritmalar anlatılmıştır. Beşinci kısımda küçük ve büyük veri setleri için matematiksel model ve sezgisel algoritmanın sonuçları karşılaştırılmış ve eldeki gerçek veriler için gösterdikleri performanslar incelenmiştir. Altıncı kısımda ise genel olarak yapılan çalışmalar değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.



2. ÜRETİM ÇİZELGELEMENİN SINIFLANDIRILMASI

Genel olarak çizelgeleme problemleri dört farklı faktöre bağlı olarak sınıflara ayrılır. Bu faktörler: işlerin geliş şekli, işlerin yapılacağı tezgah sayısı, iş akışının tipi ve performans ölçütüdür.

2.1 İşlerin Geliş Şekli

İşler geliş şekline göre iki sınıfa ayrılmakta olup, bunlar statik ve dinamik problemlerdir. Statik problemlerde belirli bir zaman aralığı içindeki iş listesi bilinmektedir ve bu liste genellikle sabittir. Listedeki işler boş olan istasyonlara hemen işleme alınmak üzere gelirler. Bu tip problemlerde genel amaç, işlerin üretim sırasını belirlemektir. Bu çalışmada ele alınan problem, firmadaki mühendisler tarafından haftalık iş listesi önceden belirlendiği için statik problem kategorisine girmektedir.

Dinamik problemlerde işlerin atölyeye geliş zamanı belirsiz olup, iş listesi sürekli değişmektedir. Rastgele gelen işler, sıralamanın da sürekli değişmesine neden olmaktadır. Dinamik problemlerdeki amaçlardan bazıları istasyonların boş kalma zamanını en küçükmek, istenen teslim zamanlarına yetişmek veya üretim için bekleyen iş sayısını en azlamaktır.

2.2 İşlerin Görüleceği Tezgâh Sayısı

Üretim atölyesinde bulunan tezgah sayısına göre bir tezgah ve birden çok tezgah olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Birden çok tezgah sınıfı da kendi içinde paralel tezgahlar ve seri tezgahlar olarak iki alt grupta incelenebilir. Paralel tezgahlarda işler tezgahlara dağıtılırken, seri tezgahlarda işler tüm tezgahlarda işlem görür.

Bu çalışmada incelenen üretim hattı birden çok tezgahın olduğu sınıfa dahildir.

2.3 İş Akışı

Atölyedeki işler eğer aynı sırayı takip ediyorsa akış tipi atölye, farklı sırayı takip ediyorsa sipariş tipi atölye kavramından söz edilir. Bu çalışmada, montaj hattına verilen işler aynı sırayı takip ettiği için akış tipi atölye olarak adlandırılmaktadır.

2.4 Performans Ölçütü

Çizelgeleme problemlerindeki performans ölçütleri işlerin sıralanmasındaki toplam etkinliği iyileştirme amacı taşır. Genellikle, bu etkinliğin en iyilenmesinde seçilen ölçüt bir siparişin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi olup diğer ölçütler şunlardır:

- Ortalama tamamlanma zamanının en küçüklenmesi
- Ortalama ağırlıklı tamamlanma zamanının en küçüklenmesi
- İş sırasının ortaya çıkardığı ortalama bekleme süresinin en küçüklenmesi
- Ortalama gecikme süresinin en küçüklenmesi
- Ortalama ağırlıklı gecikme süresinin en küçüklenmesi
- En büyük gecikme süresinin en küçüklenmesi
- Kuyrukta bekleyen ortalama iş sayısının yansıttığı üretim içi stok düzeyi (geciken iş sayısı, yarı işlenmiş ürün miktarı) değerinin en küçüklenmesi
- Ağırlıklı geciken iş sayısının en küçüklenmesi
- Tezgâh ve işgücü kullanım oranlarının en büyüklenmesi

Bu çalışmada performans ölçütü, son ürünün tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir. Bu şekilde haftalık üretim çizelgesine güncel durumdan daha çok iş dahil edilerek üretimin artırılması hedeflenmektedir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde ele alınan çizelgeleme problemlerine bakıldığında çok geniş bir yelpazede incelendikleri görülmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında ele alınan problemde atölyeye verilen işler esnek iş akış tipi bir atölyede alt gruplar halinde üretildiği ve öğrenme etkisi altında incelendiği için literatürde yer alan çalışmalar ürünlerin alt gruplar halinde ürettiği çizelgeleme problemleri ve öğrenme etkisi altındaki çizelgeleme problemleri olarak 2 kategoriye ayrılarak detaylı şekilde incelenmiştir.

3.1. Ürünlerin Alt Gruplar Halinde Üretildiği Çizelgeleme Problemleri

Geleneksel çizelgeleme problemlerinde ürünler alt gruplara ayrılırken ürünlerin ve bu ürünlere ait alt grupların büyüklükleri genelde sabit kabul edilir. Lee vd. (1997) alt gruplar halinde üretimi deterministik çizelgeleme problemlerinde güncel bir trend olarak sınıflandırmıştır [2]. Çalışmalarında gerçek hayat problemlerinin çözülmesinde kullanılan klasik algoritmaların geliştirilerek alt gruplar halinde üretimin de göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Alt gruplar halinde üretimi düşünerek çalışma yapan ve ilk resmi olarak sonuç alan çalışma Potts ve Baker tarafından 1989 yılında yapılmıştır [3]. Bu çalışma iki ve üç istasyonlu bir iş akış atölyesi için bir ürünün alt gruplar halinde çizelgelenmesi ile ilgilenmektedir. Çalışmanın son aşamasında iki istasyonlu bir üretim hattında iki ürünün alt gruplara ayrılarak üretimini konu alan bir probleme değinmişlerdir. Küçük bir örnek ile öncelikle işleri alt gruplara bölmeden, sonrasında ise her bir ürünü alt gruplara ayırarak üretimin optikale yakın alt çizelgelere neden olabildiğini göstermişlerdir. Fakat Potts ve Baker tarafından yapılan bu çalışmada birden fazla ürün için alt gruplar halinde üretimi içeren genel bir çözüm yöntemi sunulmamıştır.

Literatürde bulunan, ürünlerin alt gruplar halinde üretimi ile alakalı çalışmaların çoğunda genellikle tek bir ürün için model oluşturulmuş olup bu konu hakkında literatür araştırmaları olan Biskup ve Feldmann (2005) [4] ve Chang ve Chiu (2005) [5] tarafından yapılmış çalışmalar incelenebilir.

Alt gruplar halinde üretimi göz önünde bulunduran çalışmaların genelinde amaç, her bir ürün için alt grup sayısına, bu alt grupların büyüklüğüne ve sırasına karar vererek amaç değerini iyileştirmektir. Literatürde bu konuyla ilgilenen problemlerdeki amaç değeri genel olarak yayılım zamanını veya gecikmeyi en küçüklemektir.

Bu çalışmada ele alınan problemin çözümü için geliştirilen ilk matematiksel modelde alt grupları karıştırmadan yapılan çizelgeleme yapısına en çok benzeyen çalışma Ruiz ve diğerlerinin 2008 yılında yaptıkları çalışmadır [6]. Bu çalışmada gerçekçi bir üretim sistemi üzerinde çalışarak farklı koşulların ve karakteristiklerin problem konfigürasyonu ve sonucuna etkisi incelenmiştir. N tane iş, M tane istasyondan oluşan problemde bazı aşamalarda belirli sayıda paralel makineler bulunmaktadır. Aynı işe ait alt gruplar, karıştırılmalarına izin verilmeden arka arkaya üretilmektedir. Aynı zamanda bazı işler bazı aşamaları atlayabilmektedir. Bu da problemde incelenen atölyeye esneklik kazandırmıştır. İşlerin birbirlerine göre önceliği bulunmaktadır. Ayrıca sıralı ve bağımsız kurulum zamanları, makinelerdeki tamamlanma zamanları ve makinelerin uygunluk durumu göz önüne alınmıştır. Bu problem için karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir ve amaç fonksiyonu maksimum yayılma zamanını en küçüklemektir. Kurulan matematiksel modeldeki kümeler genel olarak N iş sayısını, M istasyon sayısını, M_i ise birbirinden bağımsız paralel makineleri ifade eder. Geliştirilen matematiksel model ile en karmaşık duruma sahip $N=15$, $M=3$, $M_i=1$ problemi 0.78 gap ile 300s CPU zamanında çözülürken, $M_i=3$ problemi ise 3.12 gap ile 300s bilgisayar zamanında çözülmüştür. Geliştirilen sezgisel model ise NEH algoritmasından yola çıkılarak geliştirilmiştir. Probleme uyarlanan NEH algoritmasıyla en karmaşık problem büyüklüğü $N=100$, $M=8$, $M_i=4$ olan problem 0.97 gap ile çözülmüştür. NEH algoritmasının probleme uyarlanmasının nedeni ise tüm iş sıralama kurallarından daha iyi sonuç vermesidir. Bu algoritma $M=4$ 'ten $M=8$ 'e kadar çalıştırılıp sonuç alınmıştır. Aşama sayısı arttıkça sonuçların kötüleştiği ancak her aşamadaki paralel makine sayısı arttıkça sonuçların iyileştiği görülmüştür. Feldmann ve diğerleri tarafından çalışılan permütasyon iş akış tipi atölyeyi ele alan problemde aynı işe ait alt grupların karıştırılmasına izin veriliyor. Sıralama kararı sadece bir kere verilip, tüm istasyonlarda bu sıra ile üretim yapılıyor.

İlk istasyonda üretim sırası belirlenen problemde karma tam sayılı doğrusal programlama ile ürünlere ait alt grupların parti büyüklüğüne karar veriliyor. Bu çalışmada oluşturulan model ile 3 veya daha fazla makinada yayılım zamanının en küçüklenmesi hedeflenmiştir [7].

3.2 Öğrenme Etkisi Altında Çizelgeleme Problemleri

Üretim sistemlerindeki çizelgeleme problemlerinin çoğunda, işlerin zamanları üretim sırasından bağımsız olarak ele alınmıştır. Fakat, gerçek durumlarda, personeller bir işi tekrar tekrar yaptığı için, aynı işi nasıl daha etkili ve hızlı yapacaklarını öğrenirler. Eğer bir iş veya ürün son sıralarda üretilmek üzere çizelgelendi ise, daha erken üretilenlere göre daha hızlı şekilde üretilmesi kaçınılmazdır. Bu olgu literatürde “öğrenme etkisi” olarak bilinir [8]. Öğrenme etkisinin birçok farklı tipleri çok farklı alanlarda çalışılmış olsa da, çizelgeleme literatüründe nadiren çalışılmış bir konudur.

Biskup (1999) öğrenme etkisini çizelgeleme problemlerinde araştıran ilk kişidir [8]. Bir operasyonun tamamlanma zamanının, operasyonun yapılma sayısının artışına bağlı olarak azaldığını varsaymıştır. Bir işin işlem zamanını o işin üretim sırasına bağlı bir fonksiyon olarak ele almıştır. Bu durumda, r 'inci sırada işlem gören j işinin işlem süresi, p_{jr} aşağıdaki formülle ifade edilmiştir:

$$p_{jr} = p_j * r^a \quad j, r = 1, \dots, n$$

Bu fonksiyonda p_j j işinin normal işlem zamanı, $a \leq 0$ öğrenme etkisi sabiti ve, n ise toplam iş sayısını göstermektedir.

Bu varsayımlar altında bir işin öğrenme etkisi yalnızca o işten önce üretilen işlerin sayısına bağlı olacaktır. Bu durum gösteriyor ki öğrenme oranı benzer işler için aynıdır. Ancak öğrenme etkisinin gerçeğe en uygun şekilde modellenebilmesi üretim ortamına bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Biskup 2008 yılında yaptığı bir çalışmada işlemlerin ayrı ayrı veya bir bütün halinde değerlendirilerek öğrenme etkisi kavramına iki farklı yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşımlardan ilki işleri ayrı ayrı değerlendiren “Konum Esaslı” öğrenme etkisi olarak tanımlanırken, diğer yaklaşım süreçteki işleri bir bütün olarak ele alan “İşlem Sürelerinin Toplamı Esaslı” öğrenme etkisidir. Literatürde bu iki yaklaşımın da geçerliliği bulunmaktadır [9].

3.2.1 Konum esaslı öğrenme etkisi

Literatür incelendiğinde çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisinin ilk kez Biskup tarafından incelendiği görülmektedir. Biskup, bir kalem üretiminin tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak üretim zamanındaki azalmayı öğrenme süreci olarak kabul etmiştir. Biskup, tek makineli problemler üzerinde çalışmış, akış zamanlarının ve teslim tarihinden sapmaların en küçüklenmesini amaç fonksiyonları olarak ele almış ve SPT(shortest process time) kuralını kullanarak polinom zamanlı çözümler sunmuştur [8].

Biskup [8] tarafından 1999'da öğrenme eğrisi formülü çizelgelemeye uyarlanarak $P_{ir} = P_i * r^a$ konum esaslı öğrenme etkisi, genel formül haline getirilmiştir. Eğer i işi r .pozisyonda yapılıyor ise işlem süresi P_{ir} olmaktadır ve bu işin işlem süresi konumuna bağlı olarak azalacaktır. Eğer tüm işlem süreleri aynı ise öğrenme eğrisi ile bu formül aynı olur. İşlem sürelerinin aynı olmadığı durumda ise formüller farklı olacaktır.

2000 yılında Cheng ve Wang, öğrenme etkisi neticesinde işlem sürelerinin azaldığı tek makineli çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Bu problemin amaç değeri maksimum gecikmenin en küçüklenmesi olup araştırmacılar öğrenme etkisini modellemek için üretim hacmine bağlı parçalı doğrusal işlem zamanı fonksiyonu kullanmışlardır. İnceledikleri problemin NP-Zor bir problem olduğunu göstererek polinom zamanda çözülebilecek iki durumu açıklamışlardır. Ele aldıkları problemi çözebilmek için geliştirdikleri iki ayrı sezgisel algoritma önermektedirler ve bu algoritmalar yardımıyla en kötü senaryo performansını analiz etmişlerdir [10].

Mosheiov yaptığı bir çalışmada öğrenme etkisi altında tek makine çizelgeleme problemlerini incelemiş ve bu problemlerin çözümü için bazı yöntemler göstermiştir: Performans kriteri maksimum gecikmeyi en küçüklemek olanlar için EDD (Earliest Due Date) yönetimi kullanırken, toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanını en küçüklemek için WSPT (Weighted Short Proses Time) yöntemini ve geciken iş sayısını en küçüklemek için ise Moore Algoritmasını kullanmıştır. Araştırmacı, incelediği klasik performans kriterli problemlerden bazıları için polinom zamanlı

çözümler elde ederken, öğrenme etkili bazı problemler için iyi çözümleri garanti etmediğini göstermiştir [11].

Mosheiov ve Sidney, 2003 yılında yaptıkları bir çalışmada öğrenme etkili tek makinede maksimum tamamlanma zamanı (C_{max}) ve toplam akış zamanının minimizasyonu problemi üzerinde çalışmışlardır. Ayrıca bu çalışmada paralel makineli durum için toplam akış zamanının en küçüklenmesi de incelenmiştir [12].

2004 yılında Bachman ve Janiak yaptıkları bir çalışmada 2 alternatif öğrenme etkisini çalışmışlardır. Birincisi konum esaslı öğrenme etkisidir. Onlar toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanlı tek makinenin bazı özel durumlarının polinom zamanlı çözümlerini göstermişlerdir [13].

Lee ve diğerleri tarafından 2004 yılında yapılan çalışmada, iki kriterli tek makine çizelgeleme probleminde öğrenme etkisi altında toplam tamamlanma zamanı ve maksimum geç bitirmeyi minimize etmek amaçlanmıştır. Bunun için Dal-Sınır algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma baskınlık kuralı esaslı olup, 30 işe kadar çözüm üretebilmektedir [14].

Lee ve Wu tarafından 2004'te yapılan bir çalışmada ise 2 makineli akış tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu problemde makinelerin ayrı ayrı öğrenme etkisi altında olduğu varsayımından yola çıkılarak toplam tamamlanma zamanı en küçüklenmeye çalışılmıştır. NP-zor kategorisindeki problemi baskınlık özelliklerini geliştirerek bir Dal-Sınır algoritmasıyla çözmüşlerdir. Bu algoritma makul sürede 35 işe kadar çözüm üretebilmektedir [15].

Chen ve diğerleri, 2006 yılında iki kriterli, iki makineli akış tipi çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma zamanı ve maksimum gecikme performans ölçütlerinin en küçüklenmesi üzerine çalışmışlardır [16]. Lee ve Wu tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi [15], NP-zor olan bu problemi çözmek için baskınlık özelliklerini geliştirerek bir Dal-Sınır algoritması ile çözmüşlerdir. Geliştirdikleri bu algoritma, 18 işe kadar optimal çözüm üretebilmektedir.

Eren ve Guner 2007'deki çalışmalarında öğrenme etkisi altında tek makineli bir problemde toplam geç bitirme problemini çalışmışlardır [17]. Bu problemin öğrenme etkisi olmayan durumunun NP-zor olduğunu Du ve Leung 1990'daki çalışmalarında göstermişlerdir [18]. Araştırmacılar bu çalışmalarında küçük boyutlu problemlerin çözümü için tam sayılı programlama modeli geliştirmişler ve büyük boyutlu problemler için ise sezgisel yöntemlerden Tabu Arama yöntemi ile uğraşmışlardır.

Bai vd. tarafından 2017'de tarafından çalışılan bir makalede öğrenme etkisi işlerin pozisyonuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Yaptıkları çalışmada 3 farklı amaç fonksiyonu en küçüklenmeye çalışılmıştır. Bu amaç fonksiyonları yayılma zamanı, toplam tamamlanma zamanı ve toplam ikilenik tamamlanma zamanıdır [19]. Bu çalışmada eğer bir iş eğer v 'inci sırada işlem görüyorsa o işin normal işlem zamanı aşağıdaki formül ile ifade edilmiştir:

$$p_{ijv} = p_{ij} * g(v), \quad i = 1, 2, \dots, m; v, j = 1, 2, \dots, n$$

Formülasyondaki $g(v)$ azalan bir fonksiyon olup $g: [1, +\infty) \rightarrow (0, 1]$ tanım aralığındadır.

Aynı zamanda $1 \leq v \leq n - 1$ aralığındaki her bir v değeri için, $0 < g(1) \leq 1$ ve $g(v) \geq g(v + 1)$ olmaktadır. Bu kısıtları da kullanarak problem karma tam sayılı doğrusal programlama ile modellenmiştir. Küçük veri setleri için dal sınır algoritması yardımıyla problem çözülürken, büyük veri setleri için en küçük işlem zamanı kuralını uygulayan sezgisel kullanılarak optimal sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

3.2.2 İşlem zamanlarının toplamı esaslı öğrenme etkisi

Konum esaslı öğrenme etkisinde işlerin işlem sürelerinin uzunluğuna bakılmadan sadece işin yapıldığı konuma dikkat edilir. Ancak insan faktörünün ve etkileşiminin önemli olduğu bir üretim hattında işlerin işlem süreleri üretim personelinin deneyimine eklenecek ve bu durum öğrenme etkisine sebep olacaktır. Bu durumlarda işlem zamanlarının toplamını göz önüne almak doğru olacaktır [8].

Öğrenme etkisini bu açıdan ele alan Kuo ve Yang, bir iş ne kadar çok yapılırsa o işte o kadar iyi performans gösterileceği ilkesinden yola çıkarak bir model geliştirmişlerdir [20]. Zamana bağlı öğrenme etkisini tek makineli çizelgeleme problemine uyarlayarak, toplam tamamlanma zamanı en küçüklenmeye çalışmışlardır. Ele aldıkları problemde tek makinede işlem görmeyi bekleyen n tane iş bulunmaktadır. Tüm işler $t = 0$ anında hazırdır. Bir işin normal işlem zamanı p_j ile ifade edilmektedir ve bu işlem zamanı sadece o iş ilk sırada işlem göreceyse hesaba katılmaktadır. İlk sırada yapılmadığında ise işlem zamanı değişmektedir. Kuo ve Yang'ın çalışmasında zamana bağlı öğrenme etkisi aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır. Bu formülasyonda bir işe ait zamana bağlı öğrenme etkisi aynı işe ait sıralanmış önceki işlerin toplamına bağlıdır.

$$p_{ir} = (1 + p_{[1]} + p_{[2]} + \dots + p_{[r-1]})^a * p_i = \left(1 + \sum_{k=1}^{r-1} p_{[k]}\right)^a * p_i$$

Üstteki formülde a öğrenme etkisi sabiti olup sıfırdan küçük veya eşittir ($a \leq 0$). Ayrıca formüldeki “1” sayısı bu işlemin öğrenme etkisini garanti etmektedir. Ayrıca en küçük işlem zamanı (EKİZ) kuralının bu problem için optimal sonuç verdiği gösterilmiştir.

Bazı pratik çözümlerde görülmüştür ki farklı işlerin farklı işlem zamanları olduğundan en uzun işlem zamanına sahip işlerde firmalar veya çalışanlar daha çok öğrenmektedirler. Bu sebepten, Mosheiov ve Sidney 2003 yılında yaptıkları bir çalışmada bazı işlerin diğerlerine oranla daha hızlı yapıldıklarına değinmişlerdir [12]. Böyle durumlarda öğrenme etkisinin işlere bağlı olduğu görülmüştür. Öğrenme etkisinin işlere göre değiştiği durumları aşağıdaki fonksiyon ile tanımlamışlardır.

$$p_{jr} = p_j * r^{a_j} \quad j, r = 1, \dots, n$$

Yukarıdaki formülasyonda a_j , j işine bağlı negatif bir parametre değeridir. Formülasyondaki r j işinin kaç kere yapıldığını gösteren bir değişkendir. İş türüne bağlı öğrenme etki parametresi farklı tür işlerin, farklı öğrenme etkisi oluşturduğu durumlar için kullanılmaktadır.

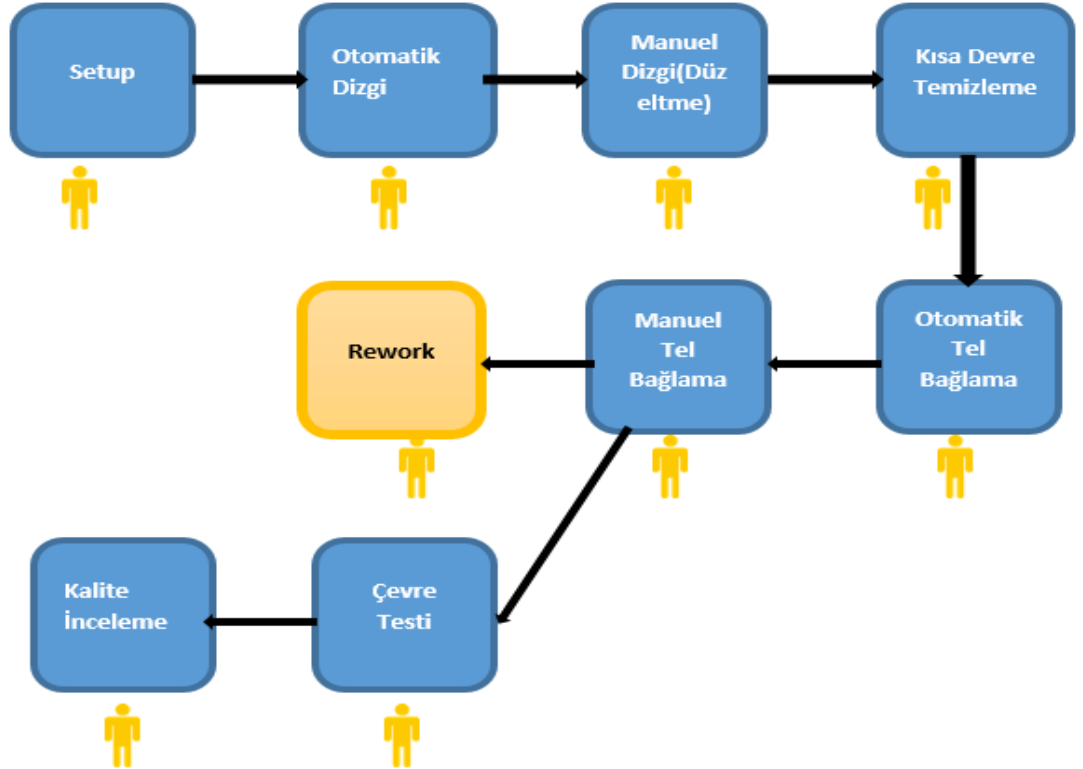


4. PROBLEM TANIMI

Bu tez çalışmasında Türkiye'nin önde gelen savunma sanayi kuruluşlarından biri olan bir firmaya ait üretim alanındaki otomatik dizgi montaj hattı ele alınmıştır. Söz konusu hatta üretim ihtiyaçlarına yönelik olarak mikro boyutlarda elektronik parça üretimi yapılmaktadır.

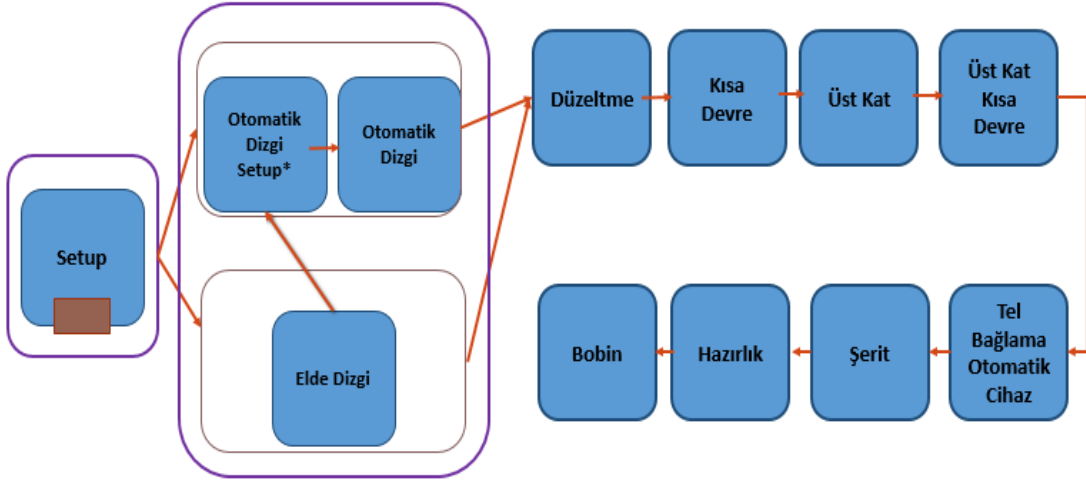
4.1 İncelenen Otomatik Dizgi Hattının Özellikleri

İncelenen otomatik dizgi üretim hattı karma modellenli montaj hattı olup bu hatta 4 tane ana istasyon vardır. Bu üretim hattının genel işleyişi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Probleme konu olan üretim hattının genel işleyişi.

4 ana istasyon kendi içinde alt istasyonlara ayrılmaktadır. Ürünlerin bazıları tüm alt istasyonlara uğrarken, bazıları birkaç istasyonda işlem görmeden üretilmektedir. Şekil 4.2’de hattın detaylı görünümü verilmiştir.



Şekil 4.2: Üretim hattının detaylı görünümü.

4 ana istasyondan ilki hazırlık istasyonudur. Her bir ürünü üretmek için gerekli alt malzemelerin istenip ayarlanması ve bilgisayarda işlemlerinin yapılması bu istasyonda gerçekleşmektedir.

2.istasyon otomatik dizgi makinasının olduğu istasyondur. Otomatik dizgi makinasında öncelikle programının ayarlanması, yani hazırlık aşaması gerekmektedir. Üretilen ürün için makinanın programı ayarlanmaktadır. Bu sebepten her ürün değişiminde programın (yazılımın) değiştirilmektedir. Ancak burada programın hazırlanması ürün sayısına bağlı değildir. Buradaki hazırlık cihazın yazılımının ayarlanmasını ve ürünlerin tablaya yerleştirilmesini, cihazın ürüne temas eden uçlarının ayarlanmasını içerir. Yazılım ayarlandıktan sonra malzemenin büyüklüğüne göre tabla adedi belirlenmekte ve bu tabla adedindeki miktara göre ürünler otomatik dizgi makinasında işlem görmektedir. Bu tez çalışmasında ele alınan problemde çözdürülen her ürün için tabla adedi bilinmektedir.

Ele alınan üretim hattında 4 ana istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonlardaki üretim incelendiğinde 2. ve 4. İstasyonlarda ürünlerin üretim için sıra beklediği görülmüştür. 2. İstasyonda bulunan otomatik dizgi makinasının her ürüne göre programının ayarlanmasının oldukça fazla vakit alması işlerin bu istasyonun önünde birikmesine neden olmaktadır. Aynı şekilde 4.istasyonda bulunan tel bağlama cihazında da elle şerit bağlamaların olması üretimi geciktiren ana sebeplerdendir. Yapılan simülasyon çalışmasıyla 2.ve 4. İstasyonun darboğaz olduğu kanıtlanmıştır. Bu iki ana istasyonun önünde işler beklemektedir.

Bu çalışmada ürünlerin üretim sırasını ayarlayarak olabilecek yığılmaların önüne geçmek, çözülmesi hedeflenen bir problemdir. Güncel durumda üretim sırası üretim hattından sorumlu personel tarafından rastgele ve manuel olarak yapılmaktadır. Her hafta üretim mühendislerinin atölye planlamacısı ile toplanarak o hafta içinde üretilmesini istediği ürünler konuşulur. Bu şekilde haftalık üretim planı oluşturulur ve üretim hattından sorumlu personele bu plan dahilinde üretim yaptırması istenir. Bu tez çalışması ile verilen haftalık üretim planı dahilinde ürün öncelik ilişkilerini göz önüne alıp montaj hattındaki yayılma zamanını en küçükleyecek şekilde işlerin istasyonlara atanmasını sağlayacak optimizasyon tabanlı karar destek sistemi geliştirildi.otomatik hale getirilecektir. Optimal ürün sırası belirlenerek, sonucunda her bir istasyonun boş kalma süresi en küçüklenecek ve 1 hafta içerisinde üretilen ürün sayısı artırılabilecektir. 1 günde 8,5 saat çalışıldığı göz önüne alındığında mesaiye kalmadan 5 günde: $5 \times 8,5 = 42,5$ saatte üretilen ürün sayısı en büyüklenmeye çalışılmıştır.

Son ürünün son istasyondan çıkış zamanının en küçüklemek için problem alt problemlere ayrılarak, aşama aşama çözülmüştür. Çözüm için izlenen yol şu şekildedir:

- 1) Üretim hattının ilk iki istasyonunda ürünler table adetlerine göre gruplar halinde üretildi.
- 2) İkinci istasyondan sonra ürünler son istasyonlara kadar teker teker üretildi.

- 3) Tel bağlamanın yapıldığı yedinci istasyondan önce ürünlerin karıştırılarak üretilmesine izin verildi.
- 4) Tel bağlamanın yapıldığı yedinci istasyonda öğrenme etkisi modele eklenerek çizelgeleme oluşturuldu.

İlk iki istasyonda ürünlerin alt gruplar halinde üretilmesine izin veren karma tamsayılı matematiksel model geliştirildi. Bu model çözdürülerek ikinci istasyonda en küçük tamamlanma zamanını verecek üretim sırası belirlendi. İkinci istasyondan 10.istasyona kadar ürünler tek tek üretileceği ve tel bağlama istasyonundan önce ürünlerin karıştırılmasına izin verildiği için önceki matematiksel modelden farklı bir karma tamsayılı matematiksel model oluşturuldu. Bu modelde de amaç en küçük tamamlanma zamanını verecek üretim sırası belirlenmesidir. Oluşturulan her iki model de problem çözümünde kullanıldığı için sonuçlarına bu çalışmada yer verilmiştir.

Tel bağlama işleminin yapıldığı yedinci istasyonda çok fazla insana bağlı iş olduğu için bu istasyonda öğrenme etkisi incelendi ve üretim sırası öğrenme etkisi altında tekrar oluşturuldu. Çıkan sonuçlar analiz edilerek, firma için en uygun haftalık üretim çizelgesi oluşturulmuştur.

Güncel durumda ikinci istasyondan çıkan ilk ürün beklemeden üçüncü istasyonda işleme alınmaktadır. Ancak problem çözdürüldüğünde görülmüştür ki tel bağlama istasyonundan önce ürünlerin sırası değiştirilerek üretildiğinde ikinci istasyondan çıkan ilk ürün her zaman tel bağlama istasyonunda işleme alınan ilk ürün olmamaktadır. Kısacası, ürünlerin üretim sırası değiştirilerek son ürünün son istasyondan çıkış zamanı azaltılabilmektedir.

Oluşturulan matematiksel modellerin ikisi de en fazla 20 farklı ürüne kadar hızlı sonuç verirken daha fazla ürün için modeller zaman kısıtı olarak belirlenen 60 dakikada sonuç vermediği için sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Sezgisel algoritma literatürdeki

çizelgeleme problemleri çözümünde kullanılan NEH(Nawaz,Enscore,Ham) algoritmasının [21] probleme uyarlanmasıyla oluşturulmuştur.

Problem çözümünde kabul edilen varsayımlar aşağıdaki gibidir:

1. İki istasyon arasında sınırsız stok alanı bulunmaktadır.
2. Her makine t anında yalnızca bir ürün üretebilir, her ürün t anında yalnızca bir makinede işlem görebilir.
3. Bazı ürünler bazı istasyonlara uğramamaktadır.
4. İstasyonlarda kesinti olmadan üretim devam edilmektedir. Yalnızca önceliği yüksek işler bekletilmeden sıradaki istasyona atanmalıdır.
5. Kurulum zamanları işlem zamanların dahil edilmemiştir.
6. Personel sıkıntısı bulunmamaktadır.
7. 2. istasyon olan otomatik dizgi makinasında ürüne göre değişen parti büyüklüğü bulunmaktadır.
8. Her iş bir önceki aşamada tamamlandıktan sonra işleme başlayabilir.
9. Önceliği yüksek olan işler bulunmaktadır ve bu işler bekletilmeden üretime alınmalıdır.



5. PROBLEM FORMÜLASYONU

5.1 Geliştirilen Matematiksel Modeller

Problemi çözerken üretim hattı darboğaz istasyonlara göre ikiye ayrılarak farklı model geliştirilmiştir. Bunun sebebi ise ilk iki istasyonda ürünlerin otomatik dizgideki tabla adedi sayısına göre, 2. istasyondan sonra ise teker teker üretiliyor olmasıdır.

5.1.1 Matematiksel model 1

Geliştirilen ilk matematiksel modelde aynı ürüne ait alt grupların arka arkaya üretildiği varsayımından yola çıkılmıştır. Bu aşamada problem daha basit ve genel hatlarıyla ele alınmıştır.

2.istasyon olan otomatik dizgide ürünler tabla adedine göre üretime alındığı için oluşturulan modelde ürünler tabla adetlerine göre alt gruplara ayrılmıştır. Buna göre, ürünlerin her bir istasyonda alt gruplar halinde işleme alındığı varsayılmıştır. Amaç, son ürünün son istasyondan çıkış zamanını (yayılım zamanını) en küçüklemdir.

Kümeler

N: ürün kümesi	$N = (1, \dots, n)$
M: istasyon kümesi	$M = (1, \dots, m)$

Parametreler

R_j : j ürününün sipariş miktarı	$\forall j \in N$
L_j : j ürününün max subplot büyüklüğü	$\forall j \in N$
O_j : j ürününden olabilecek en fazla subplot sayısı	$\forall j \in N$
p_{ij} : j ürününün 1 adedinin i istasyonundaki işlem süresi	$\forall j \in N, \forall i \in M$
F_j : j ürününün otomatik dizgi istasyonundaki işlem süresi	$\forall j \in N$
$b_j = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ işi öncelikliyse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$	$\forall j \in N$
$Q = \sum_j b_j$ (öncelikli işler sayısı)	$\forall j \in N$
G = büyük sayı	

Karar Değişkenleri

C_{max} : hattan çıkacak son ürünün bitiş süresi

X_{ijs} : i istasyonunda j ürünü s subplot'unun

$$\forall i \in M, \forall j \in N$$

tamamlanma zamanı

$$s = 1..O_j$$

U_{js} : j ürününün s subplot'unun büyüklüğü

$$\forall j \in N, s = 1..O_j$$

$$Y_{js} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } j \text{ ürününün } s' \text{ inci subplot miktarı} > 0 \\ & \text{ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall j \in N, s = 1..O_j$$

$$Z_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } j \text{ ürünü } k \text{ ürününden sonra} \\ & \text{işlem görüyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall j \in N, \forall k \in N$$

$$W_{jr} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } j \text{ işi } r' \text{ inci sırada işlem görüyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall j \in N, \forall r \in N$$

Min C_{max}

(1)

Öyle ki;

$$C_{max} \geq X_{ijs} - (1 - Y_{js}) \cdot G$$

$$\forall i \in M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (2)$$

$$U_{js} \leq Y_{js} * L_j$$

$$\forall j \in N, s = 1..O_j \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^{O_j} U_{js} = R_j$$

$$\forall j \in N \quad (4)$$

$$X_{ijs} \geq X_{ij(s-1)} + U_{js} * P_{ij}$$

$$\forall i \in M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (5)$$

$$X_{1js} \geq F_j + U_{js} * P_{1j}$$

$$\forall j \in N, s = 1..O_j \quad (6)$$

$$X_{ijs} \geq X_{ikl} + F_j - (1 - Z_{jk}) * G$$

$$\forall i \in M, \forall j \in N, \quad (7)$$

$$s = 1..O_j, l = 1..O_k$$

$$\sum_{j=1}^n W_{jr} = 1$$

$$r = 1..n \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^n W_{jr} = 1 \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n Z_{jk} + W_{j1} = 1 \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^n (W_{jr} * r) - \sum_{t=1}^n (W_{kt} * t) - 1 \geq (Z_{jk} - 1) * G \quad \forall j \in N, \forall k \in N \quad (11)$$

$$\sum_{r=1}^n (W_{jr} * r * b_j) \leq Q \quad \forall j \in N \quad (12)$$

$$X_{ijs} \geq 0 \quad \forall s = 1..Oj, \forall j \in N, \forall i \in M \quad (13)$$

$$U_{js} \geq 0 \quad \forall s = 1..Oj, \forall j \in N \quad (14)$$

$$X_{max} \geq 0 \quad (15)$$

$$Y_{js} \in \{0,1\} \quad \forall s = 1..Oj, \forall j \in N \quad (16)$$

$$b_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N \quad (17)$$

$$Z_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall k \in N, k \neq j \quad (18)$$

$$W_{jr} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall r \in N \quad (19)$$

Yukarıdaki modelde 2. kısıt yayılım zamanının işlere ait tüm alt grupların tamamlanma zamanından büyük veya eşit olmasını sağlayan kısıttır. 3. Kısıtta ürünlerin alt grup miktarının alt grup büyüklüğünden küçük veya eşit olmasını sağlar. 4. kısıt bir işe ait tüm alt grupların toplamının sipariş miktarına eşit olmasını sağlayan kısıttır. 5. kısıt bir ürüne ait s'inci alt grubun tamamlanma zamanının aynı ürünün (s-1)'inci alt grubundan daha sonra tamamlanma kısıtıdır. 6. kısıt ilk istasyonda bir işe ait alt grubun tamamlanma zamanının otomatik dizgideki hazırlık zamanı ile 1.istasyondaki hazırlık süreleri toplamından büyük veya eşit olma durumudur.

7. kısıt ise eğer j işi k işinden hemen sonra yapılıyorsa i istasyonunda k işinin tamamlanma zamanından büyük olması gerektiğini gösteren kısıttır. 8. ve 9. kısıtlar atama kısıtları olup, 8. kısıt her sıraya yalnızca bir ürün atama kısıtı iken 9. kısıt her işin sadece bir sıraya atanmasını belirleyen kısıttır.

10. kısıt öncelik ilişkisi kısıtıdır. Burada aynı ürüne ait alt gruplar arka arkaya gönderiliyor. Modelin diğer aşamalarında alt gruplar karışık olarak da gönderilecektir. 11. kısıt ürünlerin sırasını doğrulamak için kullanılmıştır. Eğer $Z_{jk} = 1$ ise $r - t = 1$ lmalı. 12. kısıt eğer bir iş öncelikli ise işlem görme sırasının öncelikli olan işlerin toplamından küçük olmasını sağlar. Son olarak (13)-(19) kısıtları karar değişkenleriyle ilgili kısıtlardır.

5.1.2 Matematiksel model 2

Birinci matematiksel modelden alınan sonuçlar ikinci modelin girdisi olarak kullanılmıştır. Önceden de değinildiği gibi birinci modelde ürünler gruplar halinde üretilirken, ikinci istasyondan sonra istasyonlarda alt gruplar halinde üretimi zorunlu kılan bir makine olmadığı için geliştirilen ikinci modelde ürünler tek tek üretilmiştir. Problem çözümündeki ikinci aşamada aynı ürüne ait alt gruplar karıştırılarak optimal bir üretim sırası bulunmaya çalışılmıştır. Bu modelde tel bağlama istasyonunda (7.istasyon) üretim sırasının değişebilmesine izin verilmiştir. Amaç, son ürünün son istasyondan çıkış zamanını (yayılım zamanını) en küçüklemeektir.

Kümeler

N: ürün kümesi	$N = (1, \dots, n)$
M: istasyon kümesi	$M = (1, \dots, m)$

Parametreler

R_j : j ürününün sipariş miktarı	$\forall j \in N$
L_j : j ürününün max subplot büyüklüğü	$\forall j \in N$
O_j : j ürününden olabilecek en fazla subplot sayısı	$\forall j \in N$
r_{ij} : j ürününün 1 adedinin i istasyonundaki işlem süresi	$\forall j \in N, \forall i \in M$
G : büyük sayı	

Karar Değişkenleri

C_{\max} : hattan çıkacak son ürünün bitiş süresi

b_{ijs} : i istasyonunda j ürünü s subplot'unun başlama zamanı $\forall i \in M, \forall j \in N$
 $s = 1..O_j$

U_{js} : j ürününün s subplot'unun büyüklüğü $\forall j \in N, s = 1..O_j$

$X_{jskl} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } j \text{ ürünü } s \text{ alt grubu } k \text{ ürünü } l \text{ alt} \\ & \text{grubundan sonra işlem görüyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall k \in N$

$W_{jsr} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } j \text{ işi } s \text{ alt grubu } r' \text{ inci sırada} \\ & \text{işlem görüyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall r \in N$

$$\text{Min } C_{\max} \quad (20)$$

Öyle ki;

$$p_{ijs} = r_{ij} * U_{js} \quad \forall i \in M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (21)$$

$$X_{\max} - b_{ijs} - p_{ijs} \geq 0 \quad \forall i \in M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (22)$$

$$U_{js} - L_j \leq 0 \quad \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (23)$$

$$\sum_{s=1}^{O_j} U_{js} = R_j \quad \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (24)$$

$$b_{ijs} - b_{(i-1)js} - U_{js} * p_{(i-1)j} \geq 0 \quad i = 2..M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (25)$$

$$b_{ijs} + p_{ijs} \leq b_{ikl} + (1 - X_{jskl}) * G \quad \forall i \in M, \forall j, k \in N, j < k, \\ s = 1..O_j, l = 1..O_k \quad (26)$$

$$b_{ikl} + p_{ikl} \leq b_{ijs} + X_{jskl} * G \quad \forall i \in M, \forall j, k \in N, j < k, \\ s = 1..O_j, l = 1..O_k \quad (27)$$

$$b_{ijs} - b_{ij(s-1)} - p_{ij(s-1)} \geq 0 \quad \forall i \in M, \forall j \in N, s = 2..O_j \quad (28)$$

$$X_{jsk(l-1)} - X_{jskl} \leq 0 \quad \forall j, k \in N, j < k, s = 1..O_j, \\ l = 2..O_k \quad (29)$$

$$\sum_{r=1}^A W_{jsr} = 1 \quad \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (30)$$

$$\sum_{s=1}^{O_j} \sum_{j=1}^N W_{jsr} = 1 \quad r = 1..A \quad (31)$$

$$W_{jsr} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, s = 1..O_j, r = 1..A \quad (32)$$

$$X_{jskl} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in N, s = 1..O_j, l = 2..O_k \quad (33)$$

$$Y_{js} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (34)$$

$$U_{js} \geq 0 \quad \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (35)$$

$$b_{ijs} \geq 0 \quad \forall i \in M, \forall j \in N, s = 1..O_j \quad (36)$$

$$X_{\max} \geq 0 \quad (37)$$

Ürünlere ait alt grupların karıştırıldığı ikinci matematiksel modelde amaç fonksiyonu (20) son ürünün son istasyondan çıkış zamanının en küçüklenmesini ifade eder. 21. kısıt bir ürünün istasyonlardaki işlem süresinin o ürüne ait alt grup büyüklüğü ile bir adedinin o istasyondaki işlem süresinin çarpımına eşitleyen kısıttır. 22. kısıt işlerin tamamlanma zamanının başlama ve işlem sürelerinin toplamından daha büyük olduğunu gösteren kısıttır. 23. kısıt bir ürüne ait alt grup büyüklüğünün izin verilen toplam alt grup büyüklüğünden (tabla adedi) küçük olmasını sağlayan kısıttır. 24. kısıt bir işe ait alt gruplardaki ürünlerin toplamının o işin sipariş miktarına eşit olmasını sağlar. 25. kısıt j ürününün s'inci alt grubunun i istasyonundaki başlama zamanının (i-1). İstasyondaki başlama zamanı ile (i-1). istasyondaki işlem sürelerinin toplamından büyük veya eşit olmasını zorlayan kısıttır. 26. kısıt eğer j işi s'inci alt grubu, k işi l'inci alt grubundan hemen önce yapılıyorsa i istasyonundaki j işinin s alt grubunun başlama zamanı ve i istasyonundaki işlem süresi toplamının k işinin l alt grubunun istasyonundaki başlama zamanından küçük olmasını sağlayan kısıttır. 27. kısıt eğer j işi s'inci alt grubu, k işi l'inci alt grubundan hemen önce yapılmıyorsa, j işinin s'inci alt grubunun i'inci istasyondaki başlama zamanının k işi l'inci alt grubunun başlama zamanı ve i istasyonundaki işlem zaman toplamından büyük olmasını zorlayan kısıttır. 28. kısıt j işi s'inci alt grubunun üretim hattında tüm istasyonlarda tamamlanma zamanının aynı işe ait (s-1)'inci alt gruptan büyük olmasını zorlayan kısıttır.

29. kısıt eğer j işi s'inci alt grubu k işi l 'inci alt grubundan önce yapılmıyorsa, k işine ait (l-1)'inci alt gruptan da önce yapılmamasını sağlar. Bu kısıt ile birlikte gereksiz eşitsizlikler elenmiş olur ve model daha hızlı çalışır. 30. ve 31. kısıtlar atama kısıtlarıdır. 30. kısıt ile her ürünün her bir alt grubunun yalnızca bir sıraya atanması zorlanır. 31. kısıt ile her sıraya yalnızca bir ürün atanmasını sağlayan kısıttır. Son olarak 32-37 kısıtları ikili değişken kısıtlarıdır.

5.1.2.1 Matematiksel modellerin Johnson Algoritması ile karşılaştırılması

Çalışmanın 4.bölümünde anlatıldığı gibi üretim hattının iki uç noktasında darboğaz istasyon bulunmaktadır. Üretilecek ürünlerin darboğaz istasyonların arasında bulunan istasyonlardaki işlem süreleri diğer istasyonlara göre daha azdır. Ortadaki istasyonun işlem süresi yanındaki istasyonların işlem süreleri tarafından baskılanan akış tipi çizelgeleme problemi literatürde daha önce Johnson Algoritması ile çözülmüştür [23]. Geliştirilen matematiksel modellerin etkinliğini araştırmak amacıyla literatürde sıklıkla adı geçen Johnson Algoritması ile modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Normalde Johnson algoritması n tane işin iki makinede sırayla üretilmesi durumunda yayılma zamanını en küçükleme için optimum çözümü verir ve çalışma prensibi şu şekildedir:

- Birinci makineye n tane işin içinden birinci makinedeki işlem süresi en kısa olan işler atanırken, ikinci makinedeki işlem süresi en kısa olanlar da en sona atanarak amaç fonksiyonu en küçüklemiş olur.

Bunun yanında bazı özel şartlar sağlandığında n tane iş, 3 tane makine olan bir akış tipi çizelgeleme probleminde de Johnson Algoritması kullanılabilir. Bu şartlar şunlardır:

$$\text{Min}_{i=1}^n \{P_{i1}\} \geq \text{Max}_{i=1}^n \{P_{i2}\} \quad \text{veya}$$

$\text{Min}_{i=1}^n \{P_{i3}\} \geq \text{Max}_{i=1}^n \{P_{i2}\}$ olmalıdır. Yani, 2.makinede darboğaz olmamalı ve 1. ve 3. Makineler tarafından domine edilmelidir [23].

Bu çalışmada ele alınan üretim hattında otomatik dizgi hattından tel bağlama istasyonuna kadar olan istasyonlarda genelde kısa devre temizleme gibi işlem süresi küçük işlemler yapılmaktadır. Bu sebeple 9 istasyon 3 istasyona indirilirken ürünlerin kitlerinin hazırlanması ve otomatik dizgideki işlemleri 1. İstasyona, otomatik dizgi hattından tel bağlama istasyonun kadar olan istasyonların işlem süreleri toplanıp 2.

İstasyona, tel bağlama istasyonundan son istasyona kadar olan istasyonlar da 3. İstasyona atanmıştır.

Veriler 3 istasyonlu üretim hattı yapısına göre ayarlanmış olup, Johnson Algoritması için aşağıdaki veri seti kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 : Johnson Algoritmasının uygulandığı veri seti.

ÜRÜNLER (N)	GELEN MİKTAR (R _j)	TABLA ADEDİ (L _j)	1.istasyon		2.istasyon	3.istasyon
			Dizgi Hazırlık Süresi	Dizgi İşlem Süresi	Kısa Devre	Tel Bağlama
A	10	5	70	2	7	19
B	5	5	50	3,5	5	21
C	2	2	90	9	19	22
D	4	4	90	9	9	23
E	3	3	100	5,5	5	20

Yukarıdaki çizelgede ilk sütun ürünleri, ikinci sütun ürünlerden üretilecek toplam miktarı, 3.sütun bu ürünlerden otomatik dizgi makinasındaki tablaya sığabilecek toplam ürün sayısıdır. Diğer sütunlar her bir ürünün bir tanesinin istasyonlardaki işlem zamanını göstermektedir.

Sonuçlar Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : N=5, M=3,6, A=6 için sonuçlar.

N: Ürün sayısı,		M:istasyon sayısı		A: Toplam alt grup sayısı	
Yöntem	N	M	A	X_{max}	Üretim sırası
Johnson Algoritması	5	3	6	930	2_1/4_1/1_1/1_2/3_1
Matematiksel Model	5	10	6	894	2_1/4_1/1_1/1_2/3_1

Çizelge 5.2’deki sonuçlar oluşturulan matematiksel modelin Johnson Algoritmasına göre %3,8 daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Bu sebepten problemi çözmek için Johnson Algoritması yerine matematiksel model tercih edilmiştir.

5.1.3 Öğrenme etkisi formülasyonu

İncelenen problemde tel bağlama istasyonunda tel ve şerit bağlama konusunda yüksek beceriye sahip personeller çalıştırılmaktadır. Bu kişiler aynı işten gelecek işleri arka arkaya yaptıkları zaman o ürünün yapılışı hakkında pratiklik kazanacağından dolayı bu istasyonda öğrenme etkisi incelenmiştir.

Probleminde çözümünde kullanılan pozisyona bağlı öğrenme etkisi için Biskup [8] tarafından yapılan çalışma temel alınmıştır. Aşağıdaki formülasyonu ikinci matematiksel modele eklenerek problem çözdürülmüştür.

$$P_{ijs} = r_{ij} * U_{js} * (s)^a \quad \forall i \in M, \forall j \in N, s = 2..O_j, \quad (38)$$

P_{ijs} : i istasyonunda j. ürünü s'inci alt grubunu yapmak için gerekli zaman

P_{ij1} : i istasyonunda j ürününe ait 1. birimi yapmak için gerekli zaman

U_{js} : j ürününe ait s'inci alt gruptaki toplam ürün sayısını ifade etmekte olup ikinci matematiksel modelde ürünler tek tek üretildiği için her ürünün her bir alt grubunda en fazla 1 tane ürün olmaktadır.

s: İlgili ürüne ait alt grup indisi olup ikinci matematiksel modelde ürünler tek tek üretildiği için $s = 1$ olmaktadır.

LR: Öğrenme oranı ve LR küçüldükçe öğrenme etkisi artar.

Öğrenme etkisi parametresi a için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$a = \log(LR)/\log(2) \quad [8]$$

Bu çalışmada öğrenme oranı için firmadan alınan iş süreleri ile gözlemlenen iş süreleri arasındaki farklara bakılarak öğrenme oranı hesaplanmıştır. Bu oran için firmadan alınan veriler ve gerçekleşen üretim süreleri kullanılarak bir hesaplama yapılmıştır.

Firmadan alınan veriler Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3'te tek bir ürün için hesaplama gösterilmiştir. Ancak diğer ürünlerin üretimi de düşünüldüğünde %88 olan öğrenme oranı $(LR) = 0,8$ olarak alınmıştır.

Çizelge 5.3'teki değerlere bakıldığında öğrenme oranı: $24/27 = \%88$, $21,3/24 = \%88$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.3 : Öğrenme oranını hesaplamak İçin kullanılan veriler.

Bir Üründen Üretilen Miktar	Üretilen Toplam Ürün Sayısı	Üretim İçin Harcanan Süre	Kümülatif üretim süresi(dk)	Her bir ürünü üretmek için gereken süre (dk)
1	1	27	27	27
1	2	21	48	24
1	3	16	64	21,3

Öğrenme parametresi a'nın öğrenme oranı (0.8) için değeri:

$a = \log(0.8)/\log(2) = -0.322$ olarak bulunmaktadır.

5.2 Geliştirilen Sezgisel Algoritmalar

İş akışı çizelgeleme problemlerinde, zaman kriterine göre yüksek performansa sahip ve en çok bilinen algoritmalarından birisi Nawaz, Enscore ve Ham'in 1983 yılında önerdiği NEH sezgisel yöntemidir [21]. Makine sayısı m, iş sayısı n olan problemlerin çözümü için NEH algoritması 3 temel adımdan oluşur:

Adım 1: Sıralamaya dahil edilecek tüm ürünlerin tüm istasyonlardaki toplam işlem zamanları hesaplanır.

$$P_j = \sum_{i=1}^m P_{ij}$$

Adım 2: İşleri azalan toplam tamamlanma zamanları sırasına göre sırala.

Adım 3: $j = 1, \dots, n$ olmak üzere j işi alınır ve sıralanmış işler arasındaki tüm olası pozisyonlara yerleştirilerek en iyi sıralama bulunur.

Bir örnekle açıklayacak olursak, n tane iş içinden toplam işlem zamanı en yüksek iki iş seçilir. Seçilen iki iş kendi içinde sıralanarak toplam tamamlanma zamanları bulunur. Kısmi olarak bulunan bu sürelerden en küçük süreyi veren iş sırası seçilerek bu iki işin birbirine göre öncelikleri belirlenir.

Daha sonra toplam işlem zamanı en büyük olan diğer iş seçilir. Bu iş olası tüm pozisyonlara konularak her bir pozisyonu için toplam tamamlanma zamanı bulunur. En küçük tamamlanma zamanını veren sıra sabitlenir ve bütün işler sıralanana kadar aynı işlemler uygulanır [22].

NEH algoritması ile yapılan toplam iterasyon sayısı: $n(n+1)/2 - 1$. Örneğin $n=4$ için $(4*(4+1)/2)-1 = 9$ iterasyon yapılması gerekiyor. Normal şartlar 4 farklı ürün $4! = 24$ farklı şekilde sıralama olurken bu algoritma işlerin yerini sabitleyerek problemi çözdüğü için optimal sonucu garanti etmez. Ancak zaman kriterine göre yüksek performans göstermekte ve optimale yakın sonuçlar vermektedir. NEH algoritması n tane işin m tane makinadaki en iyi üretim sırasını bulmaya çalışır.

Bu çalışmada incelenen problemde, son istasyondan çıkan ürünün tamamlanma zamanını en küçüklemek amacıyla haftalık üretim planında yer alan ürünlerin sırasını bulmak için NEH algoritması probleme uyarlanmıştır. Ele alınan üretim hattındaki ilk iki istasyonda ürünlerin alt gruplar halinde üretilip ikinci istasyondan sonra tek tek üretilmesi sebebiyle NEH algoritmasında ufak değişiklikler yapılarak 2 tane algoritma yazılmıştır. Aralarındaki farklar şunlardır: İlk algoritmada, ürünler tabla adetleri kadar alt gruplara bölünerek üretildiği için ilk istasyondaki işlem süreleri tabla adedi sayısıyla çarpılarak bulunmuştur. Ayrıca otomatik dizgide aynı ürüne ait alt gruplar arka araya geliyorsa makinanın hazırlık süresinin sadece bir kere hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın sonucu ikinci algoritmanın girdisi olmaktadır. İkinci algoritmada ise üçüncü istasyondan son istasyona kadar ürünler tek tek üretilir ve ürünlerin istasyonlardaki üretim sırasını değiştirerek son ürünün son istasyondan çıkış zamanını en küçükleyecek üretim sırasını bulmaya çalışır.

Uyarlanmış 1. NEH algoritmasının (U-NEH) adımları şu şekildedir:

Adım 1: Haftalık üretim listesindeki tüm ürünlerin ilk iki istasyonda tabla adetlerine göre toplam işlem zamanları toplamını bul. $P_{ijs} = \sum_{i=1}^2 \sum_{s=1}^{O_j} P_{ij} * U_{js}$

Adım 2: İşleri toplam tamamlanma zamanlarına göre azalan sıraya göre sırala.

Adım 3: İlk iki işi alıp en küçük kümülatif toplam zamanını verecek şekilde kendi içinde sırala.

Adım 4: $j = 3, \dots, N$ için 5. Adımı uygula.

Adım 5: j işi olası pozisyonlara yerleştirilirken aynı işe ait alt gruplar arka arkaya sıralandıysa ikinci istasyondaki işlem süresini bu alt gruplar için sadece bir kere hesapla

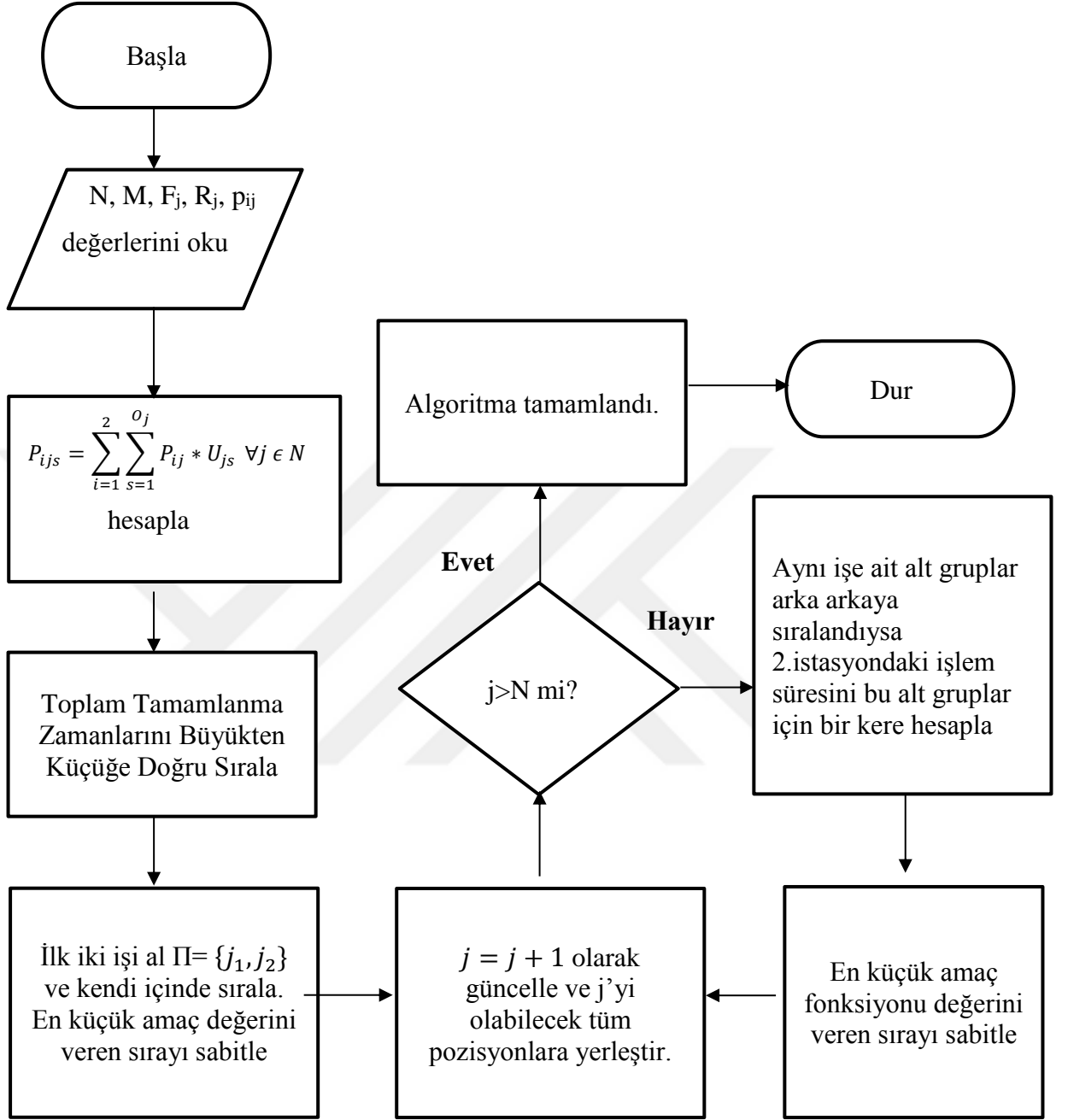
Adım 6: j işini sıralanmış işlerin arasında tüm olası pozisyonlara yerleştirerek en küçük kümülatif tamamlanma zamanını verecek iyi pozisyonu bul.

Uyarlanan birinci NEH algoritmasını özetleyen sözde kod Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

1: Başla
2: $P_{ijs} = \sum_{i=1}^2 \sum_{s=1}^{O_j} P_{ij} * U_{js} \quad \forall j \in N$ hesapla;
3: P_j 'yi azalan sıraya göre sırala;
4: İlk işi al. $\Pi = \{j_1\}$;
5: Döngü ($i=1$ to 2 Step 1)
6: j işi için Π 'nin tüm olası pozisyonlarını dene;
7: j işinin olabilecek tüm bu pozisyonları için aynı işe ait alt gruplar arka arkaya sıralandıysa ikinci istasyondaki işlem süresini bu alt gruplar için sadece bir kere hesapla;
8. π 'deki j işini en düşük C_{max} değerini veren p pozisyonuna yerleştir
9: Yeni sırayı oluştur, $\Pi \leftarrow \Pi, \cup j_i$;
10: Döngüyü Bitir
11: Π , değerini döndür;
12: Dur

Şekil 5.1: Uyarlanan ilk NEH yöntemini özetleyen algoritma.

Uyarlanan birinci NEH algoritmasının iş akış şeması Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Uyarlanan ilk NEH algoritması iş akış şeması

Uyarlanmış 2. NEH algoritmasının (U-NEH) adımları şu şekildedir:

Adım 1: İlk algoritma sonuçlarına göre ürünlerin ikinci istasyondan çıkış zamanını al.

Adım 2: Sıralamaya dahil edilecek tüm ürünlerin üçüncü istasyondan son istasyona kadar olan istasyonlardaki toplam işlem zamanları toplamını bul. $P_j = \sum_{i=3}^m P_{ij}$

Adım 3: İşleri toplam tamamlanma zamanlarını azalan sıraya göre sırala.

Adım 4: İlk iki işi alıp en küçük kümülatif toplam zamanını verecek şekilde kendi içinde sırala.

Adım 5: $j = 3, \dots, n$ için 5. Adımı uygula.

Adım 6: j işi olası pozisyonlara yerleştirilirken aynı işe ait alt gruplar arka arkaya sıralandıysa ikinci istasyondaki işlem süresi bu alt gruplar için sadece bir kere hesapla

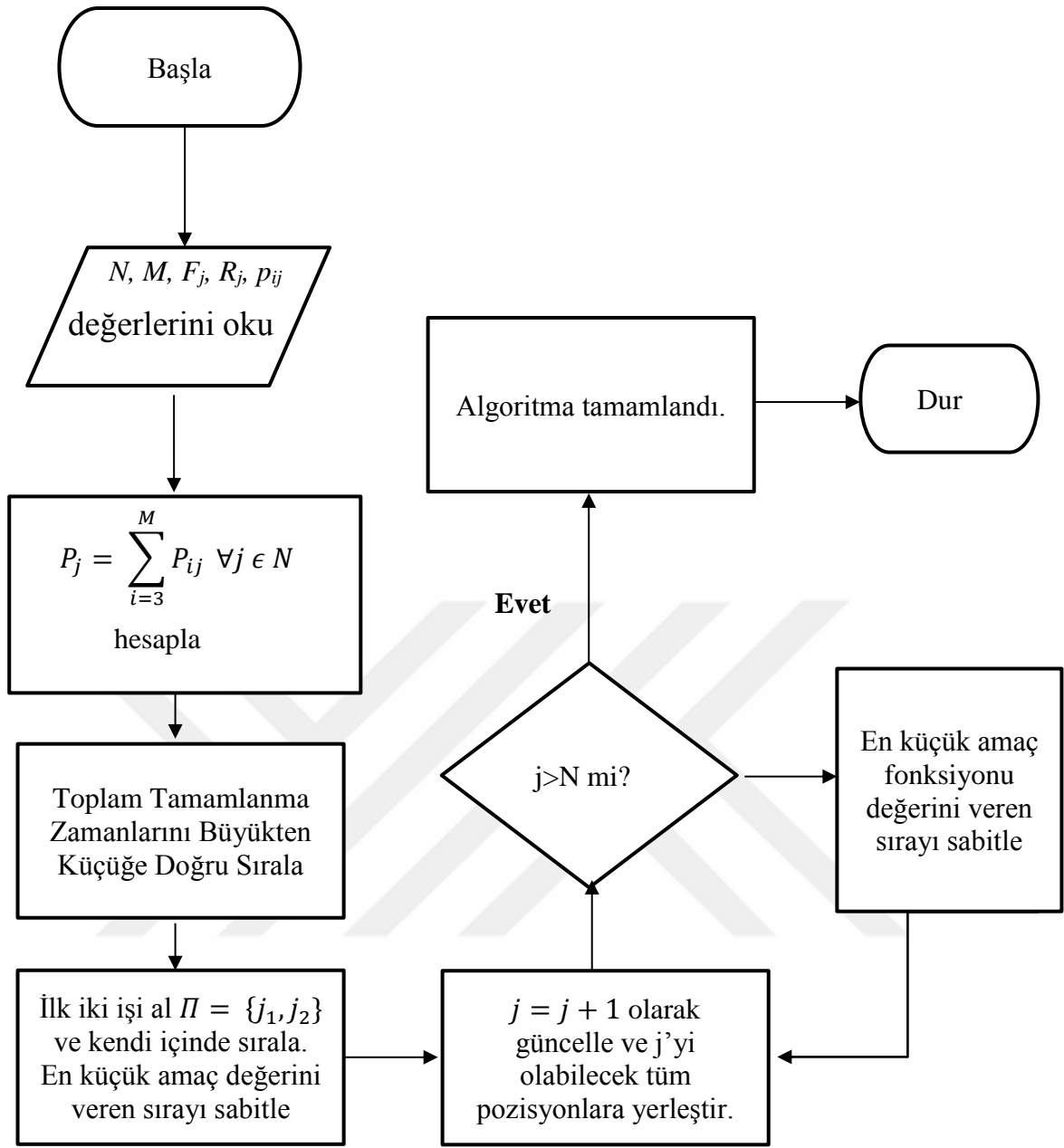
Adım 7: j işini sıralanmış işlerin arasında tüm olası pozisyonlara yerleştirerek en küçük kümülatif tamamlanma zamanını verecek iyi pozisyonu bul.

Uyarlanan ikinci NEH algoritmasını özetleyen sözde kod Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

1: Başla
2: Ürünlerin ilk algoritmada hesaplanan ikinci istasyondan çıkış zamanını alıp bu algoritmada kullan
3: $P_j = \sum_{i=3}^M P_{ij} \forall j \in N$ hesapla;
4: P_j 'yi azalan sıraya göre sırala;
5: İlk işi al. $\Pi = \{j_1\}$;
6: Döngü ($i=3$ to M Step 1)
7: j işi için Π 'nin tüm olası pozisyonlarını dene;
8: π 'deki j işini en düşük C_{max} değerini veren p pozisyonuna yerleştir
9: Yeni sırayı oluştur, $\Pi \leftarrow \Pi, \cup j_i$;
10: Döngüyü Bitir
11: Π , değerini döndür;
12: Dur

Şekil 5.3: Uyarlanan ikinci NEH yöntemini özetleyen algoritma.

Uyarlanan ikinci NEH algoritmasının iş akış şeması Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Uyarlanan ikinci NEH algoritması iş akış şeması.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Matematiksel Model İle Geliştirilen Sezgisel Algoritmanın Karşılaştırılması

Probleme uyarlanan NEH algoritmasının etkinliğini anlayabilmek için firmadan alınan küçük veri seti için matematiksel model ile U-NEH algoritmasının sonuçları karşılaştırılmıştır.

2 farklı ürün için veri seti aşağıdaki gibidir:

Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi(N=2).

ÜRÜNLER (N)	GELEN MİKTAR (R _j)	TABLA ADEDİ (L _j)	İSTASYONLARDAKİ İŞLEM SÜRELERİ									
			1	2.1	2.2	3	4	5	6	7	8	9
A	3	3	2,5	60	10	2	3	0	27	0	5	12
B	2	2	7	45	50	3	3	5	13	12	5	12

Çizelge 6.1'deki değerler tartışıldığında A ürününden 3 tane, B ürününden 2 tane üretileceği ve bu ürünler için otomatik dizgideki tabla adetlerinin 3 ve 2 olduğu görülmektedir. Tabla adedinin 3 olması aynı anda 3 ürünün de tablaya yerleşebilmesi ve aynı anda işlem görmesi anlamına gelir. Bu durumda ilk iki istasyonda A ve B ürününden sadece 1 adet alt grup üretim sırasına girecektir. Ancak üçüncü istasyondan 9.istasyona kadar ürünler tek tek üretileceği için A ürününden 3 adet alt grup, B ürününden de 2 adet alt grup sıralanacaktır. Tablo 3'teki 1'den 9'a kadar olan numaralar, istasyonların numarasını temsil etmektedir. Burada 2.1 numaralı istasyon 2.istasyonda bulunan otomatik dizgi makinasının hazırlık istasyonunu, 2.2 numaralı istasyon ise makinada işlemin yapıldığı istasyona işaret etmektedir.

Üretim hattı ikiye ayrılarak ikinci istasyona kadar ve ikinci istasyondan sonrası için matematiksel modeller ve U-NEH algoritması çözdürülmüştür.

Matematiksel modeller IBM CPLEX 12.6 ile Intel (R) Core (TM) i5-3230M CPU @ 2.60GHz işlemcisiyle, U-NEH algoritmaları da Excel VBA’de çözdürülerek elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : N=2, A=2,7,a=(-0,322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları.

N: Ürün sayısı		A: Toplam alt grup sayısı						
M: İstasyon sayısı		CPU: İşlem süresi						
Çözüm Yöntemi	İzlenen Yol	X _{max}	N	M	A	CPU (dk)	Gap	Üretim Sırası
Karma Tamsayılı Matematiksel Model	2. İstasyonuna (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretim	129	2	2	2	0.08	%0	2_1 / 1_1
	7.istasyondan (Tel Bağlama) alt grupların karıştırılarak üretimi	233		7	5	0.08	%0	2_1 / 2_2 / 1_1 / 1_3 / 1_2
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretimi	217,5		7	5	0.08	%0	2_1 / 2_2 / 1_1 / 1_3 / 1_2
U-NEH Algoritması	2. İstasyonuna (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretimi	129	2	2	2	0.03	%0	2_1 / 1_1
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra alt grupların karıştırılarak üretimi	233		7	5	0.03	%0	2_1/2_2/1_1/1_2/1_3
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretimi	217,5		7	5	0.03	%0	2_1/2_2/1_1/1_2/1_3

Çizelge 6.2’deki sonuçlar değerlendirildiğinde; ilk sütunda çözüm yöntemine değinilmiştir. Bu çalışma kapsamında karma tamsayılı matematiksel modeller ve U-NEH Algoritması geliştirilmiştir. İncelenen istasyonların sahip olduğu özelliklerden dolayı problemi çözmek için üretim hattı ikiye bölünmüştür. İlk aşamada, ürünler ilk iki istasyonda otomatik dizgideki tabla adetlerine göre alt gruplar halinde üretilmiş olup, ikinci istasyondan son istasyona kadar tek tek üretilmişlerdir. Bu durum 2 farklı matematiksel model geliştirilmesine sebep olmuştur. Oluşturulan ilk modelin sonuçları alınarak ikinci modele eklenmiş ve böylece son ürünün son istasyondan çıkış zamanını en küçükleyecek bir üretim sırası oluşturulmuştur.

Aynı zamanda bu çalışma kapsamında üretim sırası üzerinde öğrenme etkisi ni incelemek için ikinci matematiksel modelde insan faktörünün etkili olduğu tel bağlama (7. istasyon) istasyonuna öğrenme etkisi eklenmiştir. Matematiksel modellere benzer şekilde istasyonlardaki bu farklılıktan dolayı 2 tane U-NEH algoritması geliştirilmiştir. İlki ürünlerin gruplar halinde üretilmesi bilgisine dayanmaktadır, ikincisinde ürünlerin tek tek üretilmesine izin verecek hesaplamalar yapılmıştır. Matematiksel modelde olduğu gibi geliştirilen ikinci NEH algoritmasına da öğrenme etkisini incelemek için öğrenme etkisi kısıtları eklenmiştir.

Çizelge 6.2'deki 2. sütun ele alınan çizelgeleme problemini çözerken izlenen yolu göstermektedir. Daha öncede değinildiği gibi ele alınan üretim hattında 2 tane dar boğaz istasyon bulunmaktadır. İlki otomatik dizgi makinası, ikinci ise tel bağlama istasyonudur. Otomatik dizgi makinasında ürünler gruplar halinde üretimi zorunluğu olduğu ve her bir ürün için makinanın yazılımı ve üretilecek ürünlere göre makinanın uçlarının değişmesinden kaynaklı olarak ilk iki istasyon için alt grupların karıştırılmasına izin veren karma tam sayılı model geliştirildi. Ancak makinanın hazırlık süresinin her bir ürün için farklı ve uzun olması toplam tamamlanma zamanını artıracığından dolayı alt grupların karıştırılmadan üretilmesini sağlayacak bir karma tam sayılı model geliştirildi.

Çizelge 6.2'deki 3. sütun problemin çözdürüldüğü istasyon sayısını, 4. sütun ise ürünlere ait toplam alt grup sayısını, A'yı göstermektedir. Son sütunda yer alan üretim sırasındaki gösterim şekli bir örnekle açıklanacak olursa; 1_1, 1. ürüne ait 1.alt grup anlamına gelmektedir. Ürünler üçüncü istasyondan itibaren son istasyona kadar tek tek üretildiği için nihai üretim sırasındaki ürün sayısı, ürünlere ait toplam sipariş miktarına değerine eşittir. Üretim hattındaki ilk istasyonda otomatik dizgideki tabla adetlerine göre üretim yapıldığından, 2 farklı ürün için 2 tane alt grup oluşmuş olup otomatik dizgi makinesinin bulunduğu istasyondan sonra ürünler tek tek üretildiği için alt gruplardaki ürün sayısı 1 olup toplam alt grup sayısı ürünlerin sipariş miktarına eşit

olmaktadır. Çizelge 6.2'deki sonuçlara göre 2 ürünlü bir çizelgeleme probleminde 9 istasyonun sonunda matematiksel model ve algoritma aynı amaç değerini vermiştir. İkisinde de sonuç optimaldir.

5 farklı ürün için kullanılan veri seti Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi (N=5).

ÜRÜNLER (N)	GELEN MİKTAR (R _j)	TABLA ADEDİ (L _j)	İSTASYONLARDAKİ İŞLEM SÜRELERİ									
			1	2.1	2.2	3	4	5	6	7	8	9
A	3	3	2,5	60	10	2	3	0	27	0	5	12
B	4	2	7	45	50	3	3	5	13	12	5	12
C	3	3	8	45	50	3	3	3	5	27	0	8
D	3	3	3,5	80	16	3	3	3	19	0	2	7
E	6	3	1,5	30	50	3	3	3	11	7	0	0

5 farklı ürün, toplam 19 alt ürün için matematiksel model ve algoritma çözdürülmüştür ve sonuçları Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

Geliştirilen ilk karma tamsayı matematiksel model ilk iki istasyon için çalıştırıldığında amaç fonksiyonunun değeri 310,5 dk olarak bulunmuştur. Bu modelden alınan sonuçlar geliştirilen 2. matematiksel modelde kullanıldı. İkinci matematiksel model 5 farklı ürüne ait toplam 19 alt ürünün sıralamasıyla ilgilendiği için 60 dakika zaman limitinde %26'lık GAP ile son ürünün son istasyondan çıkış zamanını 464,5 dakika olarak bulmuştur. Daha uzun süre matematiksel model çalıştırıldığında GAP yüzdesini az da olsa düşürmek mümkündür. Ancak problemin optimal çözüme ulaşabilmek için 19! (faktöriyel) kadar hesaplama yapılacağı için bu problemi makul zamanda çözmek oldukça zordur. Bu sebepten geliştirilen sezgisel algoritmaların çözüme ihtiyaç duyulmuştur.

Çizelge 6.4 : N=5, A=7,19, a=(-0,322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları.

N: Ürün sayısı		CPU: İşlem süresi							
M: İstasyon sayısı		A: Toplam alt grup sayısı							
Çözüm Yöntemi	İzlenen Yol	X _{max}	N	M	A	CPU (dk)	Gap	Üretim Sırası	
Karma Tamsayılı Matematiksel Model	2. İstasyona (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretim	310,5	5	2	7	0.08	%0	5_1 / 5_2 / 2_1 / 2_2 / 4_1 / 3_1 / 1_1	
	7.istasyondan (Tel Bağlama) alt grupların karıştırılarak üretilmesi	464,5	5	7	19	60	%26	5_1 / 5_2 / 5_3 / 5_4 / 5_5 / 5_6 / 2_1 / 2_2 / 2_3 / 2_4 / 4_1 / 4_2 / 3_1 / 3_2 / 1_2 / 1_1 / 3_3 / 1_3 / 4_3	
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretilmesi	453,5	5	7	19	60	%26	5_1 / 5_2 / 5_3 / 5_4 / 5_5 / 5_6 / 2_1 / 2_2 / 2_3 / 2_4 / 4_1 / 4_2 / 4_3 / 3_1 / 3_2 / 1_2 / 1_1 / 3_3 / 1_3	
U-NEH Algoritması	2.İstasyona (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretim	310,5	5	2	7	0.03	%0	5_1 / 2_2 / 2_2 / 3_1 / 5_2 / 1_1 / 4_1	
	7.istasyondan (Tel Bağlama) alt grupların karıştırılarak üretilmesi	426,5	5	7	19	0.03	~ <%26	5_4 / 5_2 / 5_3 / 5_1 / 2_2 / 2_1 / 5_5 / 5_6 / 2_4 / 2_3 / 4_1 / 4_2 / 4_3 / 3_2 / 3_3 / 1_1 / 1_3 / 3_1 / 1_2	
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretilmesi	413,5	5	7	19	0.03	~ <%26	5_3 / 5_2 / 5_1 / 5_6 / 5_5 / 5_4 / 2_1 / 2_2 / 2_3 / 1_2 / 1_1 / 3_2 / 2_4 / 3_1 / 4_1 / 4_2 / 3_3 / 5_2 / 1_3 / 4_3	

Aynı veriler U-NEH algoritmasıyla çözüldüğünde ilk iki istasyon için matematiksel model ile algoritma aynı amaç fonksiyon değerini verirken, 2.istasyondan sonraki istasyonlar için alt grupların karıştırılarak üretimine izin veren algoritma çözdürüldüğünde amaç fonksiyonu 426,5 dk bulunmuştur. Bu sonuç matematiksel modelin bulduğu sonuçtan daha iyi bir değer olup 0,03 dakikada sonuca ulaşmıştır. Algoritma yardımıyla üretim hattında öğrenme etkisi incelendiğinde, yayılım zamanı 413,4 dk olarak hesaplanmıştır. Ayrıca üretim sırasının öğrenme etkisinin incelenmediği senaryoya göre değiştiği görülmektedir.

N=5 ürünlü bir veri seti çözümünde de görüldüğü üzere ürün sayısı ve ürünlere ait sipariş miktarları arttıkça matematiksel modeller makul zamanda sonuç bulamamaktadır. N=10 ürün, A=91 için Çizelge 6.5'teki değerler için matematiksel modeller ve algoritma sonuçları incelenerek büyük veriler için sezgisel bir algoritma geliştirmenin gerekliliği gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 :Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği veri kümesi (N=10).

ÜRÜNLER (N)	GELEN MİKTAR(R _j)	TABLA ADEDİ(L _j)	İSTASYONLARDAKİ İŞLEM SÜRELERİ									
			1	2.1	2.2	3	4	5	6	7	8	9
A	3	3	2,5	60	10	2	3	0	27	0	5	12
B	4	2	7	45	50	3	3	5	13	12	5	12
C	3	3	8	45	50	3	3	3	5	27	0	8
D	3	3	3,5	80	16	3	3	3	19	0	2	7
E	6	3	1,5	30	50	3	3	3	11	7	0	0
F	10	2	2	42	35	2	4	3	18	5	6	4
G	30	6	4	50	42	4	3	4	21	6	7	7
H	10	10	5,5	26	30	3	3	6	30	9	8	6
I	8	8	6	38	40	3	3	4	27	3	8	6
J	14	7	3	46	38	4	2	3	26	2	3	2

Çizelge 6.5'teki değerler için matematiksel modeller ve U-NEH algoritmaları çözdürüldüğünde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 : N=10, A=21,91, a=(-0.322) için matematiksel modeller ve önerilen algoritma sonuçları.

N: Ürün sayısı		M: İstasyon sayısı						
CPU: İşlem süresi		A: Toplam alt grup sayısı						
Çözüm Yöntemi	İzlenen Yol	X _{max}	N	M	A	CPU Gap (dk)	Üretim Sırası	
Karma Tamsayılı Matematiksel Model	2. İstasyona (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretim	841,5	10	2	21	80	%0	5_1/5_2/3_1/6_1/6_2/6_3/6_4/6_5/7_1/7_2/7_3/7_4/7_5/2_1/2_2/8_1/4_1/9_1/10_1/10_2/1_1
	7.istasyondan (Tel Bağlama)sonra alt grupların karıştırılarak üretilmesi	-	10	7	91	240	%55	Çözemedi
	7.istasyondan (Tel Bağlama)sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretilmesi	-	10	7	91	240	%55	Çözemedi
U-NEH Algoritması	2.İstasyona (Otomatik Dizgi) kadar alt gruplar halinde üretim	841,5	10	2	21	0.03	%0	5_2/2_1/3_1/7_2/7_3/7_4/7_5/7_1/8_1/2_2/4_1/10_1/10_2/5_1/6_5/6_1/6_2/6_3/6_4/1_1/9_1
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra alt grupların karıştırılarak üretilmesi	2057,5	10	7	91	0.13	-	5_3/5_2/5_1/2_1/2_2/3_3/3_2/3_1/7_2/7_1/7_6/7_5/7_4/7_3/7_8/7_7/7_12/7_11/7_10/7_9_7_14/7_13/7_18/7_17/7_16/7_15/7_20/7_19/7_24/7_23/7_22/7_21/7_26/7_25_7_30/7_29/7_28/7_27/8_2/8_1/8_10/8_9_8_8/8_7/8_6_8_5/8_4/8_3/2_4/2_3/4_2/4_1/4_3/10_2/10_1/10_9/10_8/5_6/5_5/5_4/6_2/6_1/6_4/6_3/6_6/6_5/6_8/6_7/6_9/1_1/1_3/9_1/9_2/9_3/9_4/9_5/9_6/9_7/9_8/1_2/6_10/10_10/10_11/10_12/10_13/10_14/10_3/10_4/10_5/10_6/10_7
	7.istasyondan (Tel Bağlama) sonra öğrenme etkisi altında alt grupların karıştırılarak üretilmesi	1372,02	10	7	91	0.13	-	5_3/5_2/5_1/10_7/10_6/10_5/10_4/10_3/10_2/10_1/5_5/5_4/5_6/2_1/2_2/3_2/3_1/3_3/7_1/7_6/7_5/7_4/7_3/7_2/7_7/12/7_11/7_10/7_9/7_8/7_13/7_18/7_17/7_16/7_15/7_14/7_19/7_24/7_23/7_22/7_21/7_20/7_25/7_30/7_29/7_28/7_27/7_26/8_5/8_4/8_3/8_2/8_1/8_10/8_9/8_8/8_7/8_6/2_4/2_3/4_1/4_3/4_2/10_14/10_13/10_11/10_10/10_9/10_8/6_2/6_1/6_4/6_3/6_6/6_5/6_8/6_7/6_10/6_9/1_2/1_1/1_3/9_1/9_2/9_3/9_4/9_5/9_6/9_7/9_8/10_12

Çizelge 6.6'daki sonuçlar değerlendirildiğinde; 10 farklı ürün için 21 tane alt grup ilk iki istasyonda karıştırılmadan üretildiğinde matematiksel modelin optimal sonucu verdiği görülmektedir. Burada otomatik dizginin hazırlık süresi her ürün için farklı ve uzun bir zaman aldığından alt gruplar karıştırılmadan, aynı ürüne ait alt gruplar arka arkaya üretilmiştir. Bu sebepten matematiksel model ilk iki istasyon için optimal sonuç verebilmektedir. Son ürünün son istasyondan çıkış zamanı 841,5 olmaktadır. Ancak ikinci istasyondan sonra 10 farklı ürüne ait toplam 91 adet ürün tek tek 3.istasyondan 9.istasyona kadar üretildiğinde matematiksel model 240 dakika boyunca çalıştırılmasına rağmen bir sonuç bulamamıştır. Aynı şekilde bu modele öğrenme etkisi eklendiğinde 240 dakikada sonuç alınamamıştır. Optimalden %55 sapma olmakla birlikte matematiksel modeller daha uzun süreler çalıştırılınca bu sapma az da olsa düşürülebilir. Matematiksel modeller ile problem makul sürede çözülemeyen geliştirilen NEH algoritmaları 0,13 dakikada sonuç vermektedir.

Tel bağlama istasyonunda çalışan personel aynı ürünü arka arka ürettiğinde o iş hakkında alışkanlığa sahip olup, işin üretimine olan yatkınlığı artacağı için üretim süresinin düşmesi kaçınılmaz olacaktır. Öğrenme etkisi olmadan X_{max} değeri 2057, 5 dakika bulunurken öğrenme etkisi altında amaç değeri 1372 dakika bulunmuştur. Ek olarak, öğrenme oranı %80 olarak hesaplandığı için öğrenme etkisi = -0,322 olarak bulunmuştu. Bu değerler ile problem çözüldüğünde öğrenme etkisinin olduğu modeldeki üretim sırası ile öğrenme etkisinin olmadığı modeldeki üretim sırasının da farklı olduğu görülmektedir.

Problemin yaşandığı firmada güncel durumda haftalık üretim listesinde bulunan ürünler en baştan başlanarak, aynı ürüne ait tüm siparişler arka arkaya üretim hattına alınarak üretim yapılmaktadır. Çizelge 6.5'teki veriler kullanılarak en baştan üretim yapıldığında son ürünün son istasyondan çıkış süresi 2809,5 dakika olurken, bu çalışma kapsamında geliştirilen NEH algoritması ile problem çözüldüğünde amaç değeri 2057,5 olmaktadır. Bir haftalık zaman diliminde yayılma zamanının bu veriler için yaklaşık %26 azaldığı görülmektedir (Bu sonuçta öğrenme etkisi bulunmamaktadır). Sonuçlar incelendiğinde, son ürünün son istasyondan çıkış zamanı azaltmak için farklı ürünleri karıştırarak üretmenin daha etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.5'teki veriler kullanılarak, öğrenme etkisinin incelendiği ve incelenmediği durumlar için U-NEH algoritmalarının verdiği üretim sırası ve rastgele üretim olduğunda alınan sonuçlar EK-1'de yer almaktadır.

6.2 KDS Öncesi ve Sonrası Firmadaki Üretim Durumu

Bu çalışma kapsamında geliştirilen KDS (Karar Destek Sistemi) çalışmanın yapıldığı savunma sanayii firmasında küçük veri seti için kullanılarak sonuçlar karşılaştırıldı ve yapılan iyileştirme gözlemlendi.

Öncesinde istasyondaki işlem süreleri hesaplanıp kaydı tutulan 3 ürün karar destek sisteminin uygulanacağı hafta da üretim planına dahil edildiği için bu üç ürün temel alınarak gözlem yapıldı. Aşağıdaki tabloda bu üç ürün için probleme uyarlanan NEH algoritması sonucu ve bu algoritmanın verdiği üretim sırası ile firmada üretim yapılarak gerçekleşen toplam tamamlanma zamanı verilmiştir.

Çizelge 6.7 : KDS etkinliğini ölçmek için kullanılan ürünlere ait veriler.

ÜRÜNLER (N)	GELEN MİKTAR(R _j)	TABLA ADEDİ(L _j)	İSTASYONLARDAKİ İŞLEM SÜRELERİ									
			1	2.1	2.2	3	4	5	6	7	8	9
A	3	3	2,5	60	10	2	3	0	27	0	5	12
B	2	2	7	45	50	3	3	5	13	12	5	12
C	2	2	3	55	25	3	3	4	29	13	6	13

Çizelge 6.7'de üretimi yapılan 3 ürüne ait istasyonlardaki işlem süreleri ve üretim miktarları verilmiştir. Bu veriler kullanılarak U-NEH algoritması ile en küçük toplam tamamlanma zamanını veren üretim sırası belirlenerek firmada bu sıra ile üretim yapılmıştır. Aşağıdaki çizelgede U-NEH algoritmasının verdiği sonuçlar ve firmada bu algoritma sonucuna göre üretim yapıldığında gerçekleşen toplam tamamlanma zamanları gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 incelendiğinde, U-NEH algoritmasının verdiği amaç değerinin , toplam tamamlanma zamanı, 184 dk olduğu görülmektedir. Fakat firmada bu algoritmanın verdiği sıra ile üretim yapıldığında 2. istasyondaki toplam tamamlanma zamanı 189 dk olmuştur. Üretim istasyonlarında çalışan personellerin farklı hız ve beceride olması amaç değerinde gözlenen bu farkın en büyük nedenlerindedir.

Çizelge 6.8 : KDS uygulandığında elde edilen sonuçlar.

N: Ürün sayısı, M: İstasyon sayısı, A: Toplam alt grup sayısı					
Otomatik Dizgi İstasyonu olan 2.İstasyona kadar alt gruplar halinde üretim	Amaç Değeri	N	M	A	Üretim sırası
U-NEH algoritması ile bulunan üretim sırası	184	3	3	3	2_1 / 3_1 / 1_1
Firmada U-NEH algoritmasının verdiği üretim sırasına göre üretim yapıldığında	189	3	3	3	2_1 / 3_1 / 1_1

Firmada KDS uygulanmadan ürünler haftalık üretim planındaki sırasına göre üretilirse ürünlerin 2.istasyon olan otomatik dizgi makinasından çıkış süreleri aşağıdaki gibi olacaktır.

Çizelge 6.9 : KDS uygulandığı ve uygulanmadığı durum karşılaştırması.

N: Ürün sayısı, M: İstasyon sayısı, A: Toplam alt grup sayısı					
Otomatik Dizgi İstasyonu olan 2.İstasyona kadar alt gruplar halinde üretim	Amaç Değeri	N	M	A	Üretim sırası
U-NEH algoritması ile bulunan üretim sırası	184	3	3	3	2_1 / 3_1 / 1_1
Firmada U-NEH algoritmasının verdiği üretim sırasına göre üretim yapıldığında	189	3	3	3	2_1 / 3_1 / 1_1
Firmada sırasıyla üretim yapıldığında	192,5	3	3	3	1_1 / 2_1 / 3_1

Çizelge 6.9'da görüldüğü üzere, firmada haftalık üretim planına göre rastgele üretim yapıldığında 3 ürünün 2.istasyondaki tamamlanma zamanı 192,5 dk olmaktadır. Buradaki sonuçlardan yola çıkarak, ilk iki istasyonda dahi algoritmanın verdiği üretim sırasına göre üretim yapıldığında ürünlerin tamamlanma zamanı %1,18 azalmaktadır.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada savunma sanayi sektöründe yer alan ve esnek iş akış tipi montaj hattına sahip firmadaki işlerin ve işlere ait operasyonların istasyonlara atanması ve son işin tamamlanma zamanını (C_{max}) en küçükleyecek şekilde işlerin istasyonlarda sıralanması problemi ele alınmıştır. 9 istasyondan oluşan üretim istasyonunda ilk iki istasyonda ürünler otomatik dizgi makinasındaki tabla adetlerine göre gruplanarak üretildiği için bu iki istasyonda ürünler alt gruplar halinde üretilmiştir. İkinci istasyondan sonra ise ürünler tek tek üretileceği için problem çözümü iki aşamadan oluşmuştur.

İlk aşamada, ürünlerin alt gruplar halinde üretimini sağlayarak en küçük toplam tamamlanma zamanını veren bir üretim sırası elde etmek için karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model çözdürülerek, sonuçları oluşturulan ikinci karma tamsayılı matematiksel modele verilmiştir. İkinci modelde, üçüncü istasyondan en son istasyona kadar ürünlerin tek tek üretimi sağlanarak en küçük tamamlanma zamanını veren bir üretim sırası bulunması hedeflenmiştir. Bu iki modele ek olarak, 7.istasyonda yapılan tel bağlama operasyonunda insan becerisinin ve el alışkanlığının öneminden dolayı bu istasyonda öğrenme etkisi incelenmiştir.

Problemin karmaşıklığından dolayı küçük veriler için matematiksel modeller makul sürelerde sonuç verirken ürünlerin üretim miktarı arttıkça matematiksel modeller optimal sonuçlardan uzaklaşmışlardır. 5 farklı ürün, 19 alt grup ve daha fazlası için sezgisel algoritma geliştirilme ihtiyacı duyulmuştur.

Geliştirilen sezgisel algoritma literatürdeki NEH algoritmasından ilham alınarak probleme uyarlanmıştır. Excel VBA'da kodlanan algoritmanın etkinliğini doğru analiz edebilmek için gerçek veriler kullanılarak problem çözdürülmüştür. Daha sonra, bu

algoritma ile probleme konu olan üretim hattı için optimizasyon tabanlı karar destek sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen karar destek sistemi sayesinde haftalık üretim planı dahilinde üretilecek ürünlerin üretim sırası belirleniyor olup, üretilecek ürünlerin haftalık yayılım zamanında yaklaşık %21'lik bir iyileştirme görülmüştür.

Bu çalışmada ele alınan problemde yapılacak değişiklikler ve iyileştirmeler gelecekte yapılacak çalışmalar olarak nitelendirilebilir. Güncel durumda 2.istasyonda 2 farklı paralel makine bulunmaktadır. Bunların hızları farklı olup işlem süreleri ürünlere göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada bu durum göz önüne alınmadan problem çözülmüştür, ancak ileriki çalışmalarda paralel makinalar düşünülerek model çözülebilir. Yapılan çalışmada ürünlerin istasyonlardaki işlem sürelerinin deterministik olduğu varsayımından yola çıkılmıştır. Yapılacak yeni çalışmalarda bu sürelerin stokastik olduğu durum ele alınabilir. Bunlara ek olarak literatürdeki farklı öğrenme etkisi kısıtları modele uyarlanarak problem çözülebilir. Örneğin ürünlerin toplam işlem sürelerine bağlı olarak değişen öğrenme etkisi modele eklenerek sonuçları üretim sırasına bağlı öğrenme etkisi sonuçlarıyla karşılaştırılarak analiz yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Nawaz, M., Ensore, E., Ham, I.** 1983. A heuristic algorithm for the m machine, n job flow shop sequence problem, *OMEGA*, 11, 1, 91-95.
- [2] **Lee, C.-Y., Lei, L. ve Pinedo, M.,** Current trends in deterministic scheduling. *Ann. Oper. Res.*, 197, **70**, 1-41.
- [3] **Zhang, W., Changyu, Y., Liu, J. ve Linn, R.J.** 2005. Multi-job lot streaming to minimize the mean completion time in m-1 hybrid flowshops. *Int. J. Prod. Eco.*, **96**, 189-200.
- [4] **Biskup, D. And Feldmann, M.** 2005. Lot streaming with variable sublots: an integer programming formulation. *J. Oper. Res. Soc.*, **57**, 296-303.
- [5] **Chang, J.H. ve Chiu, H.N.** 2005. A comprehensive review of lot streaming. *Int. J. Prod. Res.*, **43**, 1515-1536.
- [6] **Ruiz, R., Şerifoğlu, F. S. ve Urlings, T.** 2008. Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems, *Computers & Operations Research*, c.35, sayı 4, ss. 1151–1175.
- [7] **Feldmann, M. ve Biskup, D.** 2008. Lot streaming in a multiple product permutation flow shop with intermingling, *International Journal of Production Research*, 46:1,197-216.
- [8] **Biskup, D.,** 1999. Single-machine scheduling with learning considerations. *European Journal of Operational Research* 115, 173–178.
- [9] **Biskup, D.,** 2008. A State-Of-The-Art Review on Scheduling with Learning Effects, *European Journal Of Operational Research*, 188, 315-329.
- [10] **Cheng, T.C.E. ve Wang, G.** 2000. Single Machine Scheduling with Learning Effect Considerations, *Annals Of Operations Research*. (98), 273-290.
- [11] **Mosheiov, G.** 2001a. Scheduling problem with learning effect, *European Journal Of Operational Research*. (132), 687-693.
- [12] **Mosheiov, G. ve Sidney, J.B.** 2003. Scheduling with General Job-Dependent Learning Curves, *European Journal Of Operational Research*. (147), 665- 670.
- [13] **Bachman, A. ve Janiak, A.** 2004. Scheduling Jobs with Position-Dependent Processing Times, *Journal of the Operational Research Society*. (55), 257-264.
- [14] **Lee, W.C., Wu, C.C. ve Sung, H.J.** 2004. A Bi-Criterion Single-Machine Scheduling Problem with Learning Considerations, *Acta Informatica*. (40), 303- 315.

- [15] **Lee, W.C. ve Wu, C.C.** 2004. Minimizing Total Completion Time in A Two-Machine Flowshop with A Learning Effect, *International Journal of Production*. (88), 85-93.
- [16] **Chen, P., Wu, C.C. ve Lee, W.C.** 2006. A Bi-Criteria Two Machine Flowshop Scheduling Problem with A Learning Effect, *Journal of The Operational Research Society*. (57), 1113-1125.
- [17] **Eren, T. ve Guner, E.** 2007. Minimizing Total Tardiness in A Scheduling Problem with A Learning Effect, *Applied Mathematical Modelling*. (31), 1351-1361.
- [18] **Du, J. ve Leung, Y.T.** 1990. Minimizing Total Tardiness on One Machine is NP-hard, *Mathematics of Operations Research*. (15), 483-495.
- [19] **Bai, D., Tang, M., Zhang, Z. ve Santibanez- Gonzalez, E. D.** 2017. Flow shop learning effect scheduling problem with release dates, *Omega*, 000, ss.1-18.
- [20] **Kuo, W.-H., Yang, D.-L.** 2006. Minimizing the total completion time in a single-machine scheduling problem with a time-dependent learning effect. *Eur. J. Oper. Res.* 174 (2), 1184–1190.
- [21] **Nawaz M, Ensore Jr EE, Ham I.** 1983. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science* ;11(1):91–5.
- [22] **Kurnaz, M.S., Kart, Ö.,** 2010. İş Akış Çizelgeleme Problemi Üzerinde NEH, FRB3 ve FRB4 Sezgisellerinin Karşılaştırılması, *Muğla Üniversitesi Akademik Bilişim'10 -XII. Akademik Bilişim Konferansı, Muğla*, 625-630.
- [23] **Johnson, S. M.** 1954. Optimal Two-and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included, *Naval Research Logistic Quarterly*, Volume 1, pp. 61- 68.

EKLER

EK 1

N=10, A=91 için firmada güncel durumdaki üretim sırası ve algoritma çözümü sonucunda elde edilen üretim sırası

Çözüm Yöntemi	İzlenen Yol	X_{max}	N	M	A	CPU (dk)	Üretim Sırası
U-NEH Algoritması	Haftalık üretim listesindeki sıra ile ürünler karıştırılmadan üretim yapıldığında	2809,5	10	9	91	0.14	1_1/1_2/1_3/2_1/2_2/2_3/2_4/3_1/3_2/3_3/4_1/4_2/4_3/5_1/5_2/5_3/5_4/5_5/5_6/6_1/6_2/6_3/6_4/6_5/6_6/6_7/6_8/6_9/6_10/7_1/7_2/7_3/7_4/7_5/7_6/7_7/7_8/7_9/7_10/7_11/7_12/7_13/7_14/7_15/7_16/7_17/7_18/7_19/7_20/7_21/7_22/7_23/7_24/7_25/7_26/7_27/7_28/7_29/7_30/8_1/8_2/8_3/8_4/8_5/8_6/8_7/8_8/8_9/8_10/9_1/9_2/9_3/9_4/9_5/9_6/9_7/9_8/10_1/10_2/10_3/10_4/10_5/10_6/10_7/10_8/10_9/10_10/10_11/10_12/10_13/10_14
	U-NEH Algoritması ile en küçük tamamlanma zamanını veren sıra ile üretim yapıldığında	2057,5	10	9	91	0.14	5_6/5_5/5_4/2_1/2_2/10_2/10_1/10_10/10_9/10_8/3_1/3_3/2/7_12/7_11/7_10/7_9/7_8/7_7/7_18/7_17/7_16/7_15/7_14/7_13/9_8/9_7/9_6/9_5/9_4/9_3/9_2/9_1/7_22/7_21/7_20/7_24/7_23/7_28/7_27/7_26/7_25/7_30/7_29/7_4/7_3/7_2/7_1/7_6/7_5/8_10/8_9/8_8/8_7/8_6/8_5/8_4/8_3/8_2/8_1/2_4/2_3/4_1/4_3/4_2/5_1/5_3/5_2/6_10/6_9/6_8/6_7/6_2/6_1/6_4/6_3/6_5/1_1/1_2/1_3/6_6/10_11/10_12/10_13/10_14



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Şeyda ILGAZ
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.10.1992, SEYHAN/ADANA
E-posta : ilgazseyda@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2016	SİGNUM TTE	İş Analisti
2016-2017	TOBB ETÜ	Tam Burslu Y.L. Öğrencisi
2017-	ASELSAN	Üretim Planlama Müh.

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Ilgaz, Ş., Tekin, S., Kuyzu, G., Scheduling jobs to minimize makespan in a multiple product permutation flow shop with intermingling and learning effects, *29th European Conference on Operational Research*, 08-11 July 2018, Valencia, 122-123, 64-42.

