

**YAŞA VE CİNSİYETE BAĞLI FİZİKSEL İŞ YÜKÜ KAPASİTESİ VE
İŞLEM ZAMANI TEMELLİ MONTAJ HATTI ÇALIŞAN ATAMA VE
DENGELEME PROBLEMİ**

Burak EFE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2013
ANKARA**

Burak EFE tarafından hazırlanan YAŞA VE CİNSİYETE BAĞLI FİZİKSEL İŞ YÜKÜ KAPASİTESİ VE İŞLEM ZAMANI TEMELLİ MONTAJ HATTI ÇALIŞAN ATAMA VE DENGELEME PROBLEMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa KURT

Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ergün ERASLAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Başkent Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa KURT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Diyar AKAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 29/07/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burak EFE

**YAŞA VE CİNSİYETE BAĞLI FİZİKSEL İŞ YÜKÜ KAPASİTESİ VE
İŞLEM ZAMANI TEMELLİ MONTAJ HATTI ÇALIŞAN ATAMA VE
DENGELEME PROBLEMİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Burak EFE

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2013**

ÖZET

Bu tez istasyon sayısını minimize etmek için farklı yaş ve cinsiyetteki çalışanların bulunduğu montaj hattı çalışan atama ve dengeleme problemini incelemiştir. Çalışanlar istasyonlara atanırken çalışanların fiziksel iş yükü kapasiteleri (FİYK) ve buna bağlı olarak işleri yapabilme süreleri göz önünde bulundurulmuştur. Yaş - FİYK ilişkisini göstermek için erkek ve kadın çalışanlar için bir kuadratik bir fonksiyon belirlenmiştir. Yaş analizinin yapılabilmesi için çalışan üç farklı yaş sınıfında değerlendirilmiş ve bunlar üç farklı çevrim süresi için incelenerek toplamda dokuz farklı montaj hattı dengelenmiştir. Problem için 0-1 tam sayılı doğrusal programlama kullanılmış ve GAMS yazılım programında kodlanarak sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen modelin etkinliği Jackson test problemi üzerinde gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141
Anahtar Kelimeler : Montaj hattı çalışan atama ve dengeleme, yaş, fiziksel iş yükü kapasitesi, 0-1 tam sayılı doğrusal programlama
Sayfa Adedi : 67
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mustafa KURT

**AGE AND GENDER GRADIENT PHYSICAL WORKLOAD CAPACITY
AND PROCESSING TIME-BASED ASSEMBLY LINE WORKER
ASSIGNMENT AND BALANCING PROBLEM
(M.Sc. Thesis)**

Burak EFE

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
July 2013**

ABSTRACT

This thesis investigates Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem (ALWABP), subject to different ages and gender, for minimizing number of stations. Worker physical workload capacity (PWLC) and task times that depend on the PWLC have been taken into consideration when workers are assigned to stations. Two quadratic functions are determined to adequately show age – PWLC relationship for men and women, separately. Analyses included solutions of the ALWABP for three worker age categories and three different cycle times; in total, nine different assembly lines are balanced. 0-1 (binary) integer linear programming was used for solving the problem and results were achieved after the coding of the model in GAMS software program. Effectiveness of the proposed model is showed using the Jackson test problem.

**Science Code : 906.1.141
Key Words : Assembly line worker assignment and balancing, age,
physical workload capacity, 0-1 integer linear programming
Page Number : 67
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa KURT**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca tecrübelerinden faydalandığım, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Mustafa KURT'a, tez araştırması için bulunduğum ABD'de değerli görüşleri ve engin bilgisiyle beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Gül E. OKUDAN KREMER'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca manevi desteklerinden dolayı tüm dostlarıma, sevgili ağabeyime ve öğrenim hayatım boyunca bana en iyi imkânları sağlamak için hiçbir fedakârlıktan çekinmemiş olan aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. MONTAJ HATTI DENGEME PROBLEMİ.....	3
2.1. Üretim.....	3
2.2. Montaj Hatları	5
2.2.1. Montaj hatlarının sınıflandırılması	8
2.2.2. MHDP’de kullanılan temel kavramlar.....	11
2.2.3. Montaj hattı dengeleme problemlerinde işlem süreleri	17
2.3. Problemin Tanımı.....	18
2.4. Çalışmanın Amacı	18
2.5. Çalışmanın Kapsamı.....	19
2.6. Çalışmanın Özgün Katkısı.....	20
2.7. Çalışmanın Adımları	20
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	22
4. FİZİKSEL İŞ YÜKÜ YAŞ İLİŞKİSİ	29

Sayfa

5. 0-1 TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA	35
6. MATERYAL VE METOD	39
6.1. Materyal.....	39
6.2. Metod.....	39
6.2.1. Amaç fonksiyonu	39
6.2.2. Karşılaşılan kısıtlar	40
6.2.3. Problemin karakteristiği.....	40
6.2.4. Problemden kullanılan varsayımlar	41
6.2.5. Matematiksel programlama modeli: MHÇADP	41
7. MONTAJ HATTI ÇALIŞAN ATAMA VE DENGEME PROBLEMİNİN 0-1 (İKİLİ) TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA İLE ÇÖZÜMÜ	43
7.1. Test Problemindeki Veriler	43
7.2. Elde Edilen Bulgular ve Tartışma	47
8. SONUÇ	52
KAYNAKLAR	55
EKLER.....	58
EK-1 $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresinin 28 dakika olduğu durum için matematiksel modelin GAMS kodu.....	59
EK-2 $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresi 28 dakika durumu için matematiksel modelin GAMS özet çıktı raporu.....	61
EK-3 Erkek çalışanlar için yaş – FİYK ilişkisini gösteren veriler.....	65
EK-4 Kadın çalışanlar için yaş – FİYK ilişkisini gösteren veriler.....	66
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Örnek öncelik matrisi.....	15
Çizelge 3.1. MHDP'nin sınıflandırılması	27
Çizelge 4.1. Erkekler için yaşa göre fiziksel değişimler [Lynch ve ark., 1999]	32
Çizelge 4.2. Kadınlar için yaşa göre fiziksel değişimler [Lynch ve ark., 1999].....	32
Çizelge 4.3. Erkek çalışanlar için belirlenen fonksiyonun analizi	33
Çizelge 4.4. Kadın çalışanlar için belirlenen fonksiyonun analizi.....	34
Çizelge 7.1. Farklı cinsiyetteki ve yaş aralığındaki çalışanların FİYK'leri.....	44
Çizelge 7.2. Çizelge 7.1'deki farklı yaştaki 6 çalışanın 11 işi yapabilme süreleri	46
Çizelge 7.3. İşlerin fiziksel iş yükleri.....	47
Çizelge 7.4. Test problemi sonuçları.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Düz hat tasarımı (b) U tipi hat tasarımı	10
Şekil 2.2. Teknolojik öncelik diyagramı	14
Şekil 4.1. Kol kaslarında konsantrik kasılma [Lynch ve ark., 1999]	33
Şekil 4.2. Erkek için fiziksel iş yükü kapasitesi.....	34
Şekil 4.3. Kadın için fiziksel iş yükü kapasitesi.....	34
Şekil 7.1. Problemin Öncelik Diyagramı [Jackson, 1956].....	43
Şekil 7.2. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi - istasyon sayısı ilişkisi.....	50
Şekil 7.3. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi - hat etkinliği ilişkisi.....	51
Şekil 7.4. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi-FİYK kullanım oranı ilişkisi.	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a_i	i. istasyon açık ise 1, değilse 0
A_{jk}	j işi için çalışan talebinden kaynaklı iş yükünün k. risk faktörü
a_{jk}, b_{jk}, c_{jk}	Uygun ağırlıklar
B_h	h çalışanı kadın ise 1, değilse 0
B_{jk}	j işi için çevresel faktörlerden kaynaklı iş yükünün k. risk faktörü
C	Çevrim süresi
C^*	Ortalama iş istasyonu süresi
C_{jk}	j işi için çalışan vücut duruşundan kaynaklı iş yükünün k. risk faktörü
D	Denge kaybı
$D\bar{I}$	Düzensizlik indeksi
E	Esneklik oranı
e	Hattın verimliliği
E_h	h çalışanı erkek ise 1, değilse 0
H	Mevcut çalışanların kümesi
h	Çalışan
I	İş istasyonlarının kümesi
I_{rj}	r modeli j görevini içeriyorsa 1, değilse 0
i	İş istasyonu
j, t	Görev
N	Görevlerin kümesi
n_{enk}	Gerekli en az istasyon sayısı
O_h	h çalışanın yaşı

Simgeler	Açıklama
p_{hj}	h çalışanın j görevini gerçekleştirdiğindeki işlem zamanı
PW_{hj}	h çalışanı j görevini gerçekleştirdiğindeki fiziksel iş yükü
T	Toplam üretim süresi
t_i	i. işin işlem süresi
u_j	Çalışan talebinden kaynaklı fiziksel iş yükü
v_j	Çevresel faktörlerden kaynaklı fiziksel iş yükü
X_{ihj}	j görevi i istasyonunda h çalışanına atanırsa 1, diğer durumlarda 0
X_{irj}	r modelinin j görevi i istasyonunda ise 1, değilse 0
y_j	Çalışan vücut duruşundan kaynaklı fiziksel iş yükü
y_{ih}	h çalışanı i iş istasyonuna atanırsa 1, diğer durumlarda 0
ρ_1	Çalışan talebinin standart iş yükü
ρ_2	Çevresel faktörlerin standart iş yükü
ρ_3	Çalışan vücut duruşunun standart iş yükü
μ	Çalışanların ortalama yaşı
σ	Çalışanların yaşındaki standart sapma

Kısaltmalar Açıklama

DGA	Diferansiyel gelişim algoritması
DİP	Dinamik programlama
DP	Doğrusal programlama
FİYK	Fiziksel iş yükü kapasitesi
GA	Genetik algoritma
GGA	Grup genetik algoritma
HP	Hedef programlama
İS	İstasyon sayısı

Kısaltmalar Açıklama

KGA	Kombinatoryal genetik algoritma
KK	Kas kalitesi
KSO	Kuş sürüsü optimizasyonu
KTDP	Karma tam sayılı doğrusal programlama
KTP	Karma tam sayılı programlama
MH	Montaj hattı
MHÇADP	Montaj hattı çalışan atama dengeleme problemi
MHD	Montaj hattı dengeleme
MHDP	Montaj hattı dengeleme problemi
NBKSO	Negatif bilgili kuş sürüsü optimizasyonu
OMS	Ortalama mutlak sapma
PGA	Problem uzayı genetik algoritması
Tİ	Toplam iş yükü
TSP	Tam sayılı programlama
TZÜ	Tam zamanında üretim

1. GİRİŞ

Birçok gelişmiş ülkede işgücü hızlı bir şekilde yaşlanmaktadır. Fiziksel iş talebi azalmamakla birlikte çalışanların fiziksel iş kapasitesi yaşla birlikte azalmaktadır. Yapılmış olan araştırmalarda 40 ve 60 yaş aralığında kas-iskelet sisteminin zayıflamasından dolayı fiziksel iş kapasitesinin yaklaşık olarak %20 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalmalar iş kapasitesinin azalmasına ve bunun sonucunda işle ilgili yaralanmaların ve rahatsızlıkların artmasına neden olmaktadır [Kenny ve ark., 2008].

Geleneksel montaj hattı dengeleme problemi (MHDP)'de modellenen üretim hattı düz olarak biçimlendirilmiştir. Geleneksel düz üretim hatları için incelenen MHDP çevrim zamanının azaltılması ve/veya istasyon sayısının azaltılması amaç olarak belirlenmiştir. İstasyon sayısının azaltılması veya çevrim zamanının azaltılması işçilere daha fazla yük atanması anlamına gelmektedir. Öncelik ilişkileri, işlem süreleri ve çevrim süresi temel alınarak hattın dengelenmesi gerekir. Dengeleme sonrasında hattın üretim hızının planlananla aynı olup olmadığı ve bunun sürdürülebilirliği tamamıyla işçilerin çalışma kapasitelerine bağlıdır.

Bir hattaki işçiye normalden fazla yük atandığında işçinin fizyolojik kapasitesinin aşılması yorgunluğa, yorgunluk ise insanın psikolojik özelliklerinin bozulmasına neden olur. Bu bozulma yapılan işe karşı bıkkınlık, bitkinlik, isteksizlik, beceriksizlik ve işten kaçma şeklinde yansıyabilir. Bir süre sonra hattın üretim hızında değişme, süreç içi stoklarda artma, üretilen üründe kalite problemleri, termin sürelerinde sapmalar ortaya çıkar. Bu nedenlerden ötürü düz montaj hatlarının dengelenmesinde ergonomik unsurlar göz ardı edilmemelidir [Güner ve Hasgöl, 2012].

Bu çalışmanın amacı, montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) için yaşa ve cinsiyete bağlı fiziksel iş yükü kapasitesi (FİYK) kriterini ve FİYK'ye bağlı işlem zamanlarını araştırmaktır. Fiziksel iş yükü kriteri önceki çalışmalarda MHDP

kapsamında incelenmesine rağmen, çalışanlar için FİYK kriteri incelenmemiştir. Bu çalışmada yaşa ve cinsiyete bağlı iş yükü ve işlem zamanı temelinde MHÇADP üzerinde çalışılmış ve önerilen modelin etkinliği Jackson test problemi üzerinde GAMS yazılım programı kullanılarak analiz edilmiştir.

İkinci bölümde MHDP ile ilgili tanımlar, temel kavramlar, ilgili formüller açıklanmıştır. Ayrıca çalışmanın ana problemi olan MHÇADP için ilgili tanımlar, açıklamalar, çalışmanın özgün katkısının neler olduğu ve çalışmanın adımları belirtilmiştir. Üçüncü bölümde üzerinde çalışılan konuyla ilgili önceki çalışmalar sunulmuştur. Dördüncü bölümde MHÇADP için incelenen yaş – fiziksel iş yükü kapasitesi hakkında açıklamalar verilmiş ve ayrıca erkek ve kadın çalışanlar için yaş – fiziksel iş yükü kapasitesi ilişkisini gösteren kuadratik fonksiyonlar elde edilmiştir. Beşinci bölümde ikili tam sayılı doğrusal programlama hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde kullanılan varsayımlar, ilgili matematiksel model, problemin özellikleri açıklanmıştır. Yedinci bölümde kullanılan test problemi ile ilgili veriler ve parametreler, verilerin nasıl elde edildiği, problemin çözümünden elde edilen sonuçların analizi yapılmıştır.

Son bölümde ise tez kapsamında yapılan çalışma genel olarak değerlendirilmekte ve gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

2.1. Üretim

Üretim, ekonomistler ve mühendisler tarafından farklı biçimlerde tanımlanmaktadır. Ekonomistler üretimi, “yarar yaratmak” şeklinde tanımlarlar. Mühendisler ise, fiziksel bir varlık üzerinde, onun değerini arttıracak bir değişiklik yapmayı veya hammadde ya da yarı ürünleri, kullanılabilir bir ürüne dönüştürmeyi üretim sayarlar. Sonuç olarak üretim; temel amacı topluma değer katmak olan ve insan gereksinimlerinin, doğa tarafından tam olarak karşılanmaması sonucu ortaya çıkan ve insanlar tarafından geliştirilen bir etkinliktir [Erkut ve Başkak, 1997].

Üretim sonucunda ortaya ürün ve/veya hizmet çıkarılır. Üretimin amacına ulaşabilmesi için, üretim etmenleri ve kaynaklarının istenen özelliklerde bir araya getirilmesi gerekir. Üretim kaynakları ekonomistler tarafından toprak, işçilik, sermaye olarak tanımlanırken; mühendisler tarafından hammadde kaynakları, insan gücü kaynakları ve sermaye adı verilen üç ana bölüm olarak ele alınmaktadır. Ama insan isteklerinin sınırsız ve mevcut kaynakların ise sınırlı olması nedeniyle, gelişen teknoloji, üretim sistemlerinin karmaşıklaşması ve üretim kaynaklarının verimli kullanılması gereksiniminin bir sonucu olarak yönetim ögesi de üretim kaynaklarına katılmıştır. Bir üretimde girdi olarak incelenen temel üretim kaynakları; hammadde, işçilik ve sermayedir [Acar, 1996]. Üretim ile bu girdiler, ürün ve/veya hizmet durumuna dönüştürülür. Yönetim etmeni ise, bu etkinliklerin düzenlenmesini ve yürütülmesini sağlar. Amacı, bir işletmenin elinde bulunan malzeme, makine ve insan gücü kaynaklarının, istenen kalite ve sürede, en düşük maliyette bir araya getirilmesi yani miktar, kalite, zaman ve maliyet parametrelerinin en uygun şekilde kullanımını sağlamaktır.

Üretimin tasarlanması, kontrolü ve sürdürülebilirliği, genel olarak, bir üretim yönetiminin etkinliğini yansıtır. Bu etkinlikte, üretilecek ürünü tespit etmek, üretim için kaynak gereksinimini saptamak ve ürünlerin yüksek kalitede ve düşük maliyette,

uygun sürede, doğru zamanda ve istenen miktarda sağlayacak çizelgeleme, programlama çalışmalarını yapmak, ana öğelerdir. Kısaca üretim tasarlama, kontrolü ve sürdürülebilirliği üretimden sorumlu yöneticilerin, kısa zamanda ve yüksek verimde üretim hedefine ulaşması için yol gösteren önemli bir üretim aracıdır. Üretim sistemlerinin tasarımı ile ilgili etkinlikleri içeren ve üretim etkinliklerinin sınırlarını belirleyen üretim işlevi olarak tanımlanan üretim tasarlama, kontrol ve sürdürülebilirliği çalışmalarında amaç, gerekli mal ve hizmetlerin oluşturulması için gerekli kaynakları bulmak, kaynakları garanti altına almak, gereksiz kaynak harcamalarını en düşük düzeye indirmek, istenen miktarda ürünü, kalite ve sürede, en iyi ve en ucuz yöntemlerle üretmek yoluyla en yüksek verimliliği sağlamaktır.

Üretim sistemleri, üç başlık altında incelenmektedir: siparişe göre üretim, parti tipi üretim ve seri üretim [Acar, 1996].

Siparişe göre üretim, ürün çeşidinin müşteri talepleri doğrultusunda fazla olduğu ancak üretim hacminin az olduğu sistemlerdir. Sisteme giren farklı siparişler, seçenek makinelerden boş olanlarında veya boş yoksa makineler arkasında kuyruğa alınmak yoluyla üretime sokulur. Atölye tipi üretim sistemi olarak da adlandırılan bu sistemde daha çok, genel amaçlı (üniversal) takım tezgâhları kullanılır. Parti tipi üretim sistemlerinde ise, belirli bir talebi karşılamak için benzer veya aynı cinsten ürünler partiler halinde üretilir. Bu sistemin en temel özelliği, genellikle bir parti bitmeden diğerinin üretimine geçilmemesidir. Seri üretim sistemlerinde ise, ürün çeşidi az olmakla birlikte üretim hacmi çok fazladır [Acar, 1996]. Seri üretimde ürün, akış halindedir ve tesisin üretilecek ürüne göre tasarlanması gerekir. Bu sistemde üretilen ürünler özel ekipmanlar aracılığı ile belirlenen bir sırada farklı bölümlerde üretilir. Böylece üretilen ürüne uygun bir tesis dönüşümü gerçekleştirilir. Hat üretimindeki beklemler, gecikmeler ve ara depolardaki stoklar; işlem süreleri arasındaki farklardan dolayı oluşur. Bu farkları gidermek için, “üretim hattı dengelemesi” yapılır. Seri üretim, kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Eğer üretilecek ürünler doğal yapıları itibarıyla kendiliğinden akıyorsa (çimento, şeker, petrokimya, vb.), sürekli seri üretim adını almaktadır. Aksi takdirde, büyük miktarlarda üretim

için özel akış sistemlerinin tasarımı gerekiyorsa, (beyaz eşya, motorlu taşıtlar, vb.) kesikli seri üretim adını almaktadır [Ağpak, 2001].

Seri üretim yöntemlerinden günümüzde en çok tercih edilen, montaj hatlarıdır. Montaj hattı, ilk kez Amerikan otomobil sanayi öncüsü Henry Ford (1863-1947) tarafından ortaya atılmıştır. Öncelikle işin verimini ve malların standartlaştırılmasını amaçlayan Ford, geliştirdiği yeni sistemde, işin olabildiğince çok parçaya ayrıştırılıp her parçanın standartlaştırılmasını; bunların büyük çapta ve seri olarak üretimini amaçlamıştır. Burada, işçilerin becerilerine olan bağımlılığın “yürüyen (akan) bant” kullanılarak azaltılacağı düşünülmüştür. Üstünde üretilecek ürünün parçaları bulunan hat, üretim sürecindeki görev sırasına göre sıralanmış makine ve iş istasyonları boyunca akmaktadır. Makine ve iş istasyonlarında bulunan işçilere ise, bir kolu çekmek ya da bir pedala basmak düşmektedir. Böylece küçük parçalara ayrılan işler, yapılış sırasına göre sıralanmakta, üretim sürecinde, işin gereği parça almak ya da makineler arasında gidip gelmeler (zaman kaybı) önlenmiş olmaktadır.

2.2. Montaj Hatları

Sanayileşme sürecinde, toplam işin öğelerine ayrılarak, her bir ögenin işçiler arasında dağıtılmasıyla daha hızlı ve kitlesel ve daha ucuz üretim yapılabileceği görüşü ortaya çıkmıştır. Bunun sonucu olarak üretim, üzerinde farklı iş istasyonlarının bulunduğu belirli bir hat üzerinden parçaların geçirilmesi yoluyla yapılır.

Montaj hattı, malzemelerin bir hat boyunca işgücü yardımıyla ya da otomatik olarak transfer edilmeleri ve parça üzerindeki işlemlerin de bir hat boyunca sıralı iş istasyonlarında yapılması olarak tanımlanabilir. Montaj hatlarının tasarımıındaki ana amaçlardan biri, her iş istasyonuna eşit miktarda iş dağıtımını yapabilmektir [Kalender ve ark., 2008].

Hat üzerindeki iş istasyonlarında bulunan çalışanlar, son ürünü elde ederken, ürünle ilgili bir veya birkaç işi yapmaktadırlar. Bu işlem sonucunda, hatta giren parça ve yarı ürünler, gereken tüm işler yapılmış şekilde, hattın sonundan ürün olarak çıkarlar. Montaj hatlarının işletmelere sağladığı pek çok fayda vardır. Bunlardan birkaçı sayılacak olursa, montaj hatları:

- *Montaj hattı üzerindeki iş istasyonu sayısını en aza indirir,
- *İnsan gücü ve tezgâh kapasitelerinin en üst düzeyde kullanımını sağlar,
- *Beklemeleri en aza indirmeyi amaçlar,
- *Hattaki çalışanların az iş yüküne sahip olmasından dolayı meydana gelen boş beklemleri, iş istasyonları arasında düzgün şekilde dağıtır, ve
- *Üretim maliyetlerini en aza indirir.

Montaj hatlarının pek çok avantajı olmakla birlikte, dikkat edilmesi gereken önemli noktalar da vardır. Montaj hatlarında çalışan işçiler düşük beceriye sahip çalışanlardır ve sürekli aynı işleri yapmaktan dolayı monotonluk söz konusudur. Ayrıca, talepteki değişimler üretim sisteminin verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bir hat tasarlanırken ortaya çıkan temel problem, üretim hattındaki iş istasyonlarına dengeli görev dağılımının yapılmasıdır. Dengenin sağlanamadığı durumlar, bazı istasyonlarda diğerlerinden daha fazla iş yükü olmasına ve çevrim süresinin olması gerekenden daha uzun olmasına böylece sürece içi stoklarda artış, çalışanlara fazla iş yüklenmesinden dolayı yorgunluk, dikkatsizlik ve iş kazaları meydana gelmektedir.

Bir veya birkaç ürün için yapılacak montaj hattı üretimi tasarlandığında, üretim hattındaki iş istasyonlarına ilişkin işlem sürelerinin dengelenmesi sorunu ortaya çıkar. Buradaki amaç, kurulan montaj hattının verimli olarak çalışabilmesi için, üretim süresi içinde her bir montajcıya çok az süre bırakılacak veya hiç boş zaman bırakılmayacak şekilde işlemlerin istasyonlara dağılması, yani var olan kısıtlar altında iş istasyonları arasındaki işlem süresi farklarının en küçüklenmesidir. Sorunun bu noktasında, sürekli üretim yapan sistemlerin yerleşim düzeninin kurulmasında, hat dengeleme problemi ortaya çıkmaktadır [Başkak, 1998].

Ürün oluşumu sırasında yerine getirilmesi gereken görevlerin, iş istasyonlarına, kayıp süreleri en aza indirecek şekilde atanması olayına, bir başka ifadeyle iş öğelerinin iş istasyonlarına özgülenmesine, “montaj hattı dengeleme” veya kısaca “hat dengeleme” denir. Üretim hızının arttırılması, sağlıklı bir tasarlama yapılması ve işletmenin ekonomik problemlerine çözüm sunmaya yönelik olmasından dolayı, montaj hattı dengeleme problemi, endüstri dünyasında büyük öneme sahiptir. Montaj hattı dengeleme problemi, üretim hatlarının tasarımında ve işletmesinde her zaman ortaya çıkabilen bir konudur. Gerçekte hat dengeleme problemleri, çeşitli sıralarda ve üretim hızlarında çalışıldığında, hatta oluşabilecek ve istasyonların verimliliğini etkileyecek başlıca etkenlerden olan atıl kaynak kullanımını en alt seviyede tutmak için en uygun çözümün atanmasında ortaya çıkmıştır.

Kaliteli ve yüksek hızlı bir üretim seviyesini gerçekleştirmek, aslında hat dengeleme çalışmalarının detaylı ve iyi bir şekilde yapılması ile sağlanır. Günümüzde ise üretim miktarları, rekabetçiliğin ve piyasa koşullarının zorlaşmasından dolayı üretim hatlarını tasarlamak ve bu hatlara, oluşan çeşitli dalgalanmalar karşısında yeterli üretim esnekliğini verebilmek için girilen çalışmalar, bilgisayar desteği ile geliştirilen simülasyon programları ile oldukça kolay olmaktadır.

Üretimde, güncel montaj araçları kullanıldığı zaman, göreceli olarak kısa bir sürede daha çok üretim sağlanmaktadır. Ürün şeması veya montaj hatlarının kullanılması ile bir kez üretim veya montaj hatlarına atama yapılmasıyla, büyük hacimdeki mallar verimli bir şekilde üretilebilir.

Montaj hatları alt parçaların birleştirilerek bir son mamul şekline getirilmesi için kullanılmaktadır. İş parçaları (görevler) sıralı olarak hat boyunca başlatılır ve bir istasyondan diğerine aktarılır. Her istasyonda çevrim zamanı dikkate alınarak belirli görevler tekrarlanır. MHDP, montaj maliyetlerini en küçük hale getirecek, talepleri karşılayacak ve montaj sürecindeki kısıtları karşılayacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına atamasını kapsamaktadır [Simaria ve Vilarinho, 2009].

Montaj işleminin yapılabilmesi için bazı iş öğelerinin bazı iş öğelerinden önce ve sıraya uyarak yapılması gerekmektedir. Söz konusu iş öğelerinin istasyonlara atanmaları, bu öncelik ilişkileri gözetilerek yapılmalıdır aksi takdirde montaj işlemi eksik veya yanlış sırada işlerin yapılması nedeniyle gerçekleşemez.

2.2.1. Montaj hatlarının sınıflandırılması

Montaj hatlarını sınıflandırmada birçok yol vardır:

İşin Yapısına Göre Montaj Hatları:

İşin yapısına göre, iki çeşit montaj hattı vardır; otomatik ya da manuel montaj hatları. Günümüzde otomasyon vb. sistemler gelişmesine rağmen bir çok işletmede hala insan gücüne dayalı montaj hatları bulunmaktadır. Manuel hatlarda son ürün elde edilinceye kadar yarı ürünler birçok istasyondan geçmektedir. Her istasyonda toplam iş yükünün bir bölümü, bir veya daha çok çalışan tarafından yapılmaktadır. İnsan faktörünün dikkate alındığı bu tür montaj hatlarında dengeleme yaparken, otomatik hatlara göre daha çeşitli faktörleri dikkate almak gerekmektedir. İşçilere atama yapılırken ergonomik faktörler göz önünde bulundurulmazsa bir süre sonra hatta bozulmalar meydana gelebilmektedir. Otomatik hatlarda, istasyonlardaki işler ve istasyonlar arası geçişler otomatik olarak yapılmaktadır. İstasyonlar arası iş geçişinin de iki yolu vardır: (1) mekanik olmayan hatlar, (2) hareketli hatlar. Mekanik olmayan hatlarda parçalar bir istasyondan diğerine elle geçerler. Diğerlerinde ise hareketli konveyörlerle geçiş sağlanır.

Model Çeşitlerine Göre Montaj Hatları:

Model çeşitlerine göre üç çeşit montaj hattı vardır:

Tek Modelli Hatlar: Tek tip ürün ya da modelin üretiminde kullanılırlar. Müşterilerin farklı ürünleri talep etmesinden dolayı günümüzde bu hatlar çok değildir.

Çok Modelli Hatlar: Bu hatlarda farklı modeller üretilir. Farklı modellerin üretimi partiler halinde ayrı ayrı yapılır. Bir ürün parti halinde üretildikten sonra diğer modellerin üretimine geçilir. Modeller farklı ürünler ya da aynı ürünün farklı modelleri olabilirler. Çok modelli hatlarda dengeleme yapılırken, hazırlık zamanı ve hazırlık maliyetlerinin dikkate alınması gerekir. Bu nedenle hattın dengelenmesi öncesinde hazırlık maliyetlerini dikkate alarak parti büyüklüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Her iki durumda da ürünler aynı olmayan fakat benzer üretim ihtiyaçları gösterirler.

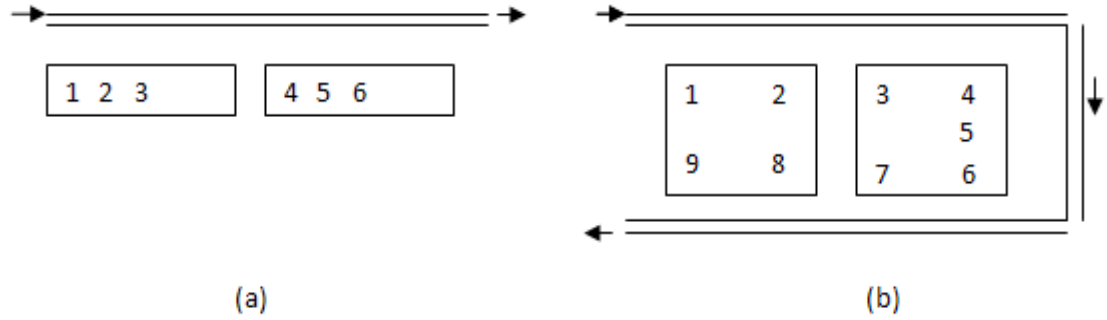
Karışık Modelli Hatlar: Aynı anda çok sayıda benzer tipteki modellerin karışık olarak üretildiği hatlardır. Karışık modelli üretimin en önemli faydası, müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin sürekli olarak üretilmesi ve büyük bitmiş ürün stoklarını gerektirmemesidir. Tek modelli hatlardan farklı olarak karışık modelli hatlarda, kısa dönem model sıralama ve çizelgeleme problemi ortaya çıkmaktadır.

İstasyonların Yerleşimine Göre Montaj Hatları:

Üretilen ürün ve hattın kurulacağı yerin fiziksel yapısı, montaj hattının şeklini belirlemede yardımcı olur. Genelde düz hatlar yeğlenir, ama kimi aygıtların birden fazla istasyonda kullanılması, hacmin fiziksel özelliklerinin düz hatta izin vermemesi gibi çeşitli nedenlerden ötürü, farklı biçimlerde hat şekilleri de yeğlenebilir. Fiziksel montaj hatları düz, dairesel, rassal, değişik açılı, U-şekilli ve zig-zag gibi değişik biçimlerde tasarlanabilir [Bayraktaroğlu, 2007].

Geleneksel hat dengeleme probleminde modellenen üretim hattı “düz” olarak organize edilmiştir. Toyota’nın tam zamanında üretim (TZÜ) prensiplerinin uygulanabilmesi için üretim hattını “U” tipinde organize etmesiyle yeni bir hat tasarımı ortaya çıkmıştır. Geleneksel hatlardan farklı olarak U-tipi montaj hatlarında yerleşim U şeklinde olup, hattın giriş ve çıkışı aynı pozisyonda bulunmaktadır.

Şekil 1.1’de iki istasyonlu bir düz hat (a) ve iki istasyonlu basit bir U hattı (b) verilmektedir [Ağpak ve ark., 2002].



Şekil 2.1. (a) Düz hat tasarımı (b) U tipi hat tasarımı

Eğer bazı işlerin işlem zamanları, çevrim zamanını aşarsa paralel veya çoklu istasyonlar dengeleme için kullanılabilir. Paralellik ile daha az istasyonla daha dengeli hatlar elde edilebilir.

Gecikmeli veya Gecikmesiz Montaj Hatları:

Bir montaj hattı tasarlanırken gecikmeli veya gecikmesiz bir hat tasarımı arasında bir seçim yapılmalıdır. Çünkü hattın sürdürülebilirliği buna bağlı olarak gerçekleşecektir. Gecikmesiz hatta her bir iş istasyonuna bir ürünü üretebilmek için eşit zaman miktarı verilir ve buna çevrim zamanı denilir. Bu çevrim zamanı bittiğinde ürünün otomatik olarak sıradaki istasyona geçtiği varsayılır. İş parçası istasyondan geçerken operatörde onunla birlikte hareket etmekte, işlemi gerçekleştirmekte ve istasyonun başlangıç noktasına geri dönmektedir. Kesikli transferde ise parça istasyonda beklemekte ve işlem biter bitmez bir sonraki istasyona sevk edilmektedir. Transferdeki gecikmeyi önlemek için, malzemenin hareketinin çok hızlı olması gerekmektedir. Tamamlanmamış işler varsa, bu işler hattın sonunda yeni bir istasyonda tamamlanabilmektedir. Gecikmeli hatta ise, bir iş tamamlandığı sürede yeni bir iş alınır. Bu tip hatlarda istasyonlar arasında tampon bulunmaktadır. Tampon, takip eden istasyonda bir önceki işlem devam ederken iş parçasının tutulduğu yer olarak tanımlanır. Tampon kapasiteleri kısıtlı olduklarından, eğer takip eden tampon tam doluysa istasyon tıkanır. Bu durumda istasyon, tampon

da alan müsait olana kadar boş bekleyecektir. İşlerin tamamlanmasına izin verilir ancak bu durumda hattın gecikme miktarı da iyice incelenmelidir.

İşlem Zamanlarına Göre Montaj Hatları:

Montaj hattı dengeleme problemlerinde, işlem zamanları incelendiğinde, iki farklı durum söz konusudur:

İşlem zamanlarının belirli olması (Deterministik MHD)

Deterministik MHDP’de, işlem sürelerinin verilmiş olduğu ve bu sürelerinin bir birimden diğerine herhangi bir farklılık göstermediği varsayılmaktadır. Bu varsayım özellikle robot teknolojisinin uygulama alanı bulabildiği, ileri teknoloji sanayilerinde geçerlidir.

İşlem zamanlarının değişken olması (Stokastik MHD)

Stokastik MHD problemlerinde ise, işlem süreleri, belirli bir dağılımla ifade edilir. İnsan faktörü, işlem sürelerinin değişken olmasına sebep olmaktadır. Söz konusu değişkenliğin nedenleri arasında iş tatminsizliği, yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, araç/gereç bozulmaları, hatalı girdiler sayılabilir. Bu nedenlerden dolayı çalışanlar kendilerine atanan işleri istasyonlarda gerçekleştirirken çevrim süresini aşabilmekte ve dolayısıyla hatta aksamalara yol açabilmektedir.

2.2.2. MHDP’de kullanılan temel kavramlar

MHDP’de kullanılan temel kavramlar aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Montaj: Son ürün elde etmek amacıyla değişik parçaların bir araya getirilip birleştirilme işlemidir. Ürünü oluşturan parçalar, parçaların montaj sıraları ve parçaları birleştirmek için ihtiyaç duyulan süreler öncelik diyagramları ile gösterilir.

Operasyon/görev: İşler, temel hareketlerden veya iş parçacıklarından oluşur. Operasyon, bir montaj işleminin bölünemeyen en küçük parçasıdır. Toplam işin kaç aşamada tamamlanacağını ortaya koyan işlemlerdir. Bir iş ögesini yerine getirmek için ihtiyaç duyulan süreye işlem süresi denir.

İş istasyonu: Montaj hattı üzerinde bir veya daha fazla operasyonun çalışan tarafından yapıldığı birimdir. İstasyonlarda genellikle bir kişi çalışır. Operasyon ihtiyacına bağlı olarak bir iş istasyonunda birden fazla kişinin çalışması da mümkündür. Montaj hatlarında kurulacak istasyon sayısının belli olduğu durumlarda bu sayının altında istasyon kurulamayacağı varsayılır.

Çevrim zamanı: Çevrim zamanı, montaj hattında ürünün bir istasyonda kalabileceği en büyük süre veya bir iş istasyonundaki çalışanın o istasyonda yapılması gerekli işleri tamamlaması için gerekli süre olarak tanımlanabilir. Çevrim süresi; üretim planlaması sonucunda ortaya çıkan üretim miktarına göre belirlenir. MHDP’de bir istasyona iş öğeleri atanırken çevrim süresini aşmayacak şekilde atama yapılmaktadır. Bu yüzden bir istasyondaki işlem süresi çevrim süresinden küçük olabilmektedir. Bir istasyonun işlem süresi çevrim süresinden büyükse istasyona başka çalışanlar dahil edilmek zorundadır. Çevrim süresi teorik olarak Eş. 2.1’de gösterilmektedir.

$$C = \frac{T}{\bar{U}S} \quad (2.1)$$

Burada, C Çevrim süresi, T toplam üretim süresi, $\bar{U}S$ üretilmek istenen ürün sayısıdır.

Toplam iş zamanı: Hattaki tüm iş öğelerinin yapıldığındaki geçen toplam süredir. Her bir iş ögesinin işlem süresi t_i , işlem sayısı n ile gösterilirse toplam iş zamanı Eş. 2.2’deki gibi hesaplanabilir.

$$\text{Toplam iş zamanı} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.2)$$

İstasyon zamanı: İstasyonda atanması gereken görevlerin tamamlanması için geçen toplam süredir. İstasyonlar arasında gecikme olmaması için bu süre istasyonda bulunan en uzun işlem süresi olan adımdan küçük ve hattın çevrim süresinden büyük olamaz.

İstasyon Gecikme Zamanı/Boş zaman: Çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki fark negatifse istasyon gecikme zamanı ya da pozitifse boş zaman olarak adlandırılır. İstasyonlar arasında denge sağlanmaya çalışıldığı için fark tüm istasyonlarda mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılır.

Gerekli En Az İş İstasyonu Sayısı: Bir ürünün belirli çevrim süresinde yapılabilmesi için gerekli olan minimum iş istasyonu sayısını ifade etmektedir. Montaj hattındaki işlemleri, her istasyona, çevrim süresini tamamen veya en az bir tanesi haricinde tamamen dolduracak şekilde atandığı düşünülürse gerekli en az iş istasyonu sayısı Eş. 2.3'te gösterilmektedir:

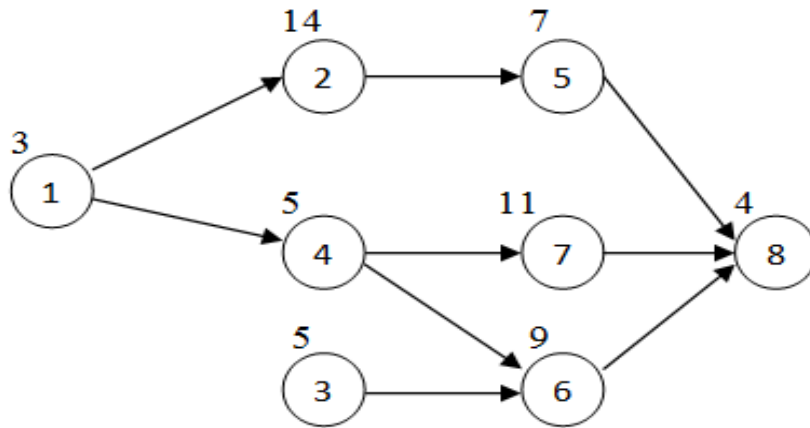
$$n_{enk} = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{C} \right\rceil^+ \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemdeki n_{enk} minimum iş istasyonu sayısını göstermekte ve $[x]^+$; x 'e eşit veya x 'ten büyük en küçük tamsayıyı ifade etmektedir.

Teknolojik Öncelik Diyagramı: Montajın teknik özelliklerinden dolayı bazı iş öğelerinin birbirlerini izlemesi gerekebilmektedir. Bu özelliklerin tümü, genellikle öncelik ilişkileri adı altında toplanmaktadırlar. Bu ilişkilerin gösterilmesinde genellikle teknolojik öncelik grafik diyagramından faydalanılmaktadır. Bu diyagram, bir okla birbirine bağlanmış iki operasyondan okun ucunda olan işlemin yerine getirilebilmesi için okun çıkmış olduğu işlemin daha önceden gerçekleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Dairelerin içerisinde yer alan numaralar ya da harfler operasyonu gösterirken, dairelerin sol üstündeki rakamlar ise işlem süresini

göstermektedir. Teknolojik öncelik diyagramlarına ilişkin bir örnek Şekil 2.2’de verilmiştir.

Öncelik Diyagramı: Görevler arasındaki ilişkilerin ifade edilmesini sağlayan diyagramdır. Teknolojik öncelik diyagramının üst üçgensel matris durumuna dönüştürülmüş halidir. Bu matriste, aralarında doğrudan veya dolaylı öncelik ilişkisi bulunan işlemler için, matriste önde gelen işlem satırıyla, izleyen işlemin sütununun kesiştiği hücreye “1” değeri, diğer hücrelere ise “0” değeri yerleştirilir. Bu grafiksel gösterimi hat dengeleme sistemlerinde öncelik ilişkilerinin belirtilmesinde çok yaygın olarak kullanılan öncelik diyagramıdır. Çizelge 2.1’de, Şekil 2.2’de gösterilen teknolojik öncelik diyagramına ilişkin olarak hazırlanan öncelik matrisi sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Teknolojik öncelik diyagramı

Esneklik Oranı: Bir montaj işleminde elde edilebilen uygun sıralama sayısının değerlendirilmesinde kullanılan bir ölçüttür. Esneklik oranı (E) Eş. 2.4’teki gibi bulunur.

$$E = \frac{2*Y}{N*(N-1)} \quad (2.4)$$

Burada Y öncelik matrisinde “0” değerine sahip hücre sayısıdır. Bu oran, teknolojik tüm işlemlerin birbiri ardına öncelik ilişkilerine bağlı ise 0 değerine, öncelik ilişkisi bulunmayan bir ürüne ilişkin bir montaj hattı ise 1 değerine eşittir. E oranının sıfıra yakın olması, iş istasyonlarına işlemlerin atanması sırasında esnekliğin az olduğunu göstermektedir.

Hattın verimliliği: Etkinlik ölçütü olarak da bilinir. Değeri 1’e ne kadar yakınsa hat o kadar verimlidir. Toplam istasyon zamanlarının çevrim zamanı ile istasyon sayısına bölümüyle bulunur. Hattın verimlilik formülü Eş. 2.5’te verilmiştir.

$$e = \frac{\sum_{k=1}^K S_k}{K * c} \quad (2.5)$$

Çizelge 2.1. Örnek öncelik matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1	0	1	0	0	0	0
2	0	-	0	0	1	0	0	0
3	0	0	-	0	0	1	0	0
4	0	0	0	-	0	1	1	0
5	0	0	0	0	-	0	0	1
6	0	0	0	0	0	-	0	1
7	0	0	0	0	0	0	-	1
8	0	0	0	0	0	0	0	-

Birden fazla işgücünün bir istasyonda çalıştığı durumlarda çevrim zamanı, çevrim süresi ile o istasyona atanan işgücü sayısının çarpımıyla hesaplandığından hattın

verimliliği Eş. 2.6 ile belirlenebilir. MHDP’de çalışan ataması kriteri incelendiği durumlarda aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$e = \frac{\sum_{k=1}^K S_k}{\sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^K L_{bk} * c} \quad (2.6)$$

Ortalama İş İstasyonu Süresi: Ürünün hatta üretilmesi sırasında kullanılan iş istasyonlarının ortalama işlem süresidir. Ortalama iş istasyonu süresi Eş. 2.7’deki gibi hesaplanır.

$$c^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n} \quad (2.7)$$

Burada c^* ortalama iş istasyonu süresini göstermektedir. Eşitlikte ayrıca $n \geq nenk$, $C \geq C^*$ olmak zorundadır.

Denge Kaybı: İşlerin veya çalışanların iş istasyonlarına dağıtılmasındaki dengesizliğin gösterilmesi amacıyla kullanılan bir ölçüttür. Denge kaybının “0” (tam denge durumu) olması istenilen durumdur. Bir birim üretim için ayrılan toplam süreyle gereken süre arasındaki farkın montaj süresine bölünmesi ile bulunur, genellikle sıfırdan büyüktür. Denge Kaybı Eş. 2.8’deki gibi bulunur.

$$D = (N * c - \sum t_i) * \frac{100}{N * c} \quad (2.8)$$

Düzgünlük İndeksi: Montaj hatlarındaki iş istasyonlarına atanan işlem sürelerinin düzgünlüğünün gösterilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Düzgünlük indeksinin küçük olması, hat üzerinde iyi bir dengenin sağlanmış olduğunu göstermektedir. Düzgünlük indeksi Eş. 2.9’deki gibi bulunur.

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Enb} - T_i)^2}}{n * c} * 100 \quad (2.9)$$

Burada T_i i. iş istasyonu süresini, T_{Enb} iş istasyonu sürelerinin en büyüğünü ifade eder.

2.2.3. Montaj hattı dengeleme problemlerinde işlem süreleri

Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP), işlem sürelerinin kesin olarak bilinmesine bağlı olarak üç ana başlık altında aşağıda ayrıntılı şekilde incelenmektedir: (1) işlem sürelerinin belirli olması (Deterministik MHDP), (2) işlem sürelerinin değişken olması (Stokastik MHDP), ve (3) işlem sürelerinin belirsiz olması (Bulanık MHDP) [Çakır, 2006].

Deterministik MHDP: Deterministik MHDP’de, işlem sürelerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım, montaj hattında makinelerin ve robotların kullanıldığı hatlarda geçerli olmakla birlikte insanların çalıştığı hatlarda çok geçerli değildir. Çünkü çalışanlar fiziksel ve zihinsel birçok etmenden etkilenmektedir.

Stokastik MHDP: Stokastik MHDP’de ise, işlem sürelerinin kesin olarak bilinmediği varsayılmakta ancak işlem süreleri belirli bir olasılık dağılımı ile modellenebilmektedir. İşlem süresindeki değişiklik, çalışandan ve/veya süreçten kaynaklanmaktadır. Yorulma, dikkatsizlik, kalifiye olmayan işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, hatalı montaj, makine arızaları değişkenliğin temel sebeplerini oluşturmaktadır. Bu durum, istasyonlara atanan işlerin toplam zamanının, çevrim süresini aşmasına ve dolayısıyla bazı görevlerin bitirilememesine, aynı zamanda bazı istasyonların da boş kalmasına sebep olmaktadır [Erel, 1991].

Bulanık MHDP: Bulanık MHDP, işlem sürelerine ilişkin sabit ya da olasılık dağılımları kullanılarak sürelerin belirlenemediği durumlarda, işlem sürelerinin bulanık sayılar kullanılarak ifade edildiği problemlerdir. Bulanık zamanlı montaj hattı dengeleme problemleri genellikle hattın ilk tasarımı aşamasında ortaya çıkmaktadır. Örneğin, hat tasarlanırken, işlem sürelerine ilişkin veriler elde mevcut değilse, tecrübeye dayanarak ve sezgisel olarak işlem süreleri belirlenebilir. Bu

aşamada bulanık sayıların kullanılması daha doğru olacaktır. Literatürde, MHDP ile ilgili olarak yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları, ele alınan problemin yapısına ve çözüm yaklaşımlarına göre değişik şekillerde sınıflandırmak mümkündür [Polat, 2008].

2.3. Problemin Tanımı

Çalışma kapsamında, tek modelli montaj hattı için farklı fiziksel iş yükü kapasitelerine sahip çalışanların istasyonlara ataması yapılmaktadır. Literatürde tek modelli montaj hatlarının dengelenmesinde yaş ve cinsiyet faktörünün dikkate alındığı çalışan atamasını eş zamanlı olarak inceleyen bir probleme rastlanmamıştır. Problemden farklı cinsiyet ve yaştaki çalışanlar incelenerek minimum sayıda çalışan, minimum sayıda istasyona atanmaya çalışılarak montaj hattının dengelenmesi sağlanacaktır.

2.4. Çalışmanın Amacı

Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP), seri üretim yapan işletmeler için büyük önem taşımaktadır. Artan rekabet koşulları problemi işletmeler için önemli kılmaktadır. Literatürde uzun süredir araştırılan bir konu olmasına rağmen halen çalışmaların farklı şekillerde ele alınarak devam etmesi konunun önemini göstermektedir. Önceki çalışmalarda çalışanların fiziksel ve zihinsel özellikleri incelenmezken son dönemlerde montaj hattı dengelemede çalışanın etkisi yoğun olarak incelenmiştir.

Çalışmada montaj hattı dengelenmesinde çalışan faktörünün göz önüne alınması amaçlanmıştır. Bu sayede eldeki işlemler, istasyonlara çalışan kısıtlamaları göz önüne alınarak minimum istasyona dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. İncelenen montaj hattının tek modelli olmasıyla ve farklı özelliklere sahip çalışanların düşünülmesiyle gerçek sanayi uygulamalarında kullanılabilecek bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2.5. Çalışmanın Kapsamı

Çalışma kapsamında montaj hattı problemine ek olarak çalışan atama problemi de ilave edilerek MHÇADP olarak incelenmiştir. İncelenen problem aşağıdaki özelliklere sahip olarak tanımlanmıştır:

**Montaj hattı tek modellidir:* Tek modellenli montaj hatları sadece tek tip ürünün üretildiği montaj hatlarıdır.

**İncelenen montaj hattı düz hattır:* Çalışmada incelenen montaj hattı düz montaj hattı yerleşimine sahiptir.

**Deterministik işlem süreleri vardır:* Deterministik işlem sürelerinin kullanılması problemin çözümünü kolaylaştıracağı için bu çalışmada deterministik işlem süreleri dikkate alınmıştır.

**Çevrim süresi belirlidir:* Problemin çözümü için gerekli olan çevrim süresi önceden belirlenerek montaj hattı dengelenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada göz önüne alınan çalışan atamaları için tanımlanan problemin özelliği aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

**Belirli yaşlara sahip çalışanlar bulunmaktadır:* Problemden farklı yaşlara sahip çalışanlar bulunmaktadır.

**Her çalışan sadece bir istasyonda çalışabilmektedir:* Çalışan sadece bir istasyonda çalışmaktadır. Çalışanlar arasında iş rotasyonu yapılmamaktadır.

**Cinsiyetler arasında fiziksel iş yükü kapasitesi farklıdır:* Çalışanların cinsiyetlerine göre yaş-fiziksel iş yükü kapasitesi kuadratik fonksiyon olarak belirlenmiştir.

Problemin özelliği göz önüne alındığında bazı kısıtlamalar konularak varsayımlar belirtilmiştir. Problemden varsayımlar şunlardır:

**Her bir çalışan bütün işleri yapabilme yeteneğindedir.*

**Çalışanların öğrenme/unutma yetenekleri göz ardı edilmiştir.*

**İşlem süreleri birbirinden bağımsızdır.*

*Günlük çalışma süresi 6 saattir.

2.6. Çalışmanın Özgün Katkısı

Çalışmanın özgün katkıları şunlardır:

- *Çalışma ile işlerin istasyonlara çalışanların kapasiteleri göz önüne alınarak dengeli bir şekilde atanması sağlanmıştır.
- *Çalışma ile çalışanların istasyonlara atanması ve verimli kullanılması sağlanmıştır.
- *Gerçek sanayi koşullarının sağlanması açısından tek modellenli montaj hattı düşünülmüştür.
- *Farklı fiziksel iş yüküne sahip çalışanlar olduğu varsayılmıştır. MHDP’de genellikle çalışanların aynı işi aynı sürede yaptıkları düşünülse de uygulamada bu şekilde olmamaktadır. Bu çalışmada uygulamaya yakınlık olması açısından çalışanların farklı fiziksel iş yükü kapasitesi ve işlem sürelerine sahip olduğu varsayılmıştır.
- *Deterministik işlem zamanları düşünülmüştür. İşlem zamanlarının deterministik alınması problemin çözümünü kolaylaştırmıştır.
- *Matematiksel modelin farklı koşullar altında vereceği sonuçların analizi için farklı yaş aralığına sahip çalışanlar incelenmiştir.

2.7. Çalışmanın Adımları

- **Problemin Belirlenmesi:* İncelenecek problemin belirlenmesi sürecidir. Problemde kullanılacak gerekli bilgilerin toplandığı adımdır.
- **Önceki Çalışmaların İncelenmesi:* Montaj hattı dengeleme ve çalışan atamasıyla ilgili geçmiş çalışmaların incelendiği süreçtir. Literatürde bulunan problem formülasyonları ve çözüm yaklaşımlarının incelendiği adımdır.
- **Problemin Tanımlanması:* Çalışma kapsamında çözülecek problemin tanımlanması sürecidir. Problemle ilgili gerekli parametreler, karar değişkenleri ve kısıtların belirlendiği adımdır.

**Matematiksel Modelin Geliştirilmesi:* Problemin çözümü için matematiksel modelin geliştirildiği ve kullanılacak GAMS paket programına entegre edildiği adımdır.

**Matematiksel Modelin Çözümü:* 0-1 Tamsayılı Doğrusal Programlama yöntemiyle hazırlanan modelin çözümünün yapıldığı adımdır.

**Sonuçların Analiz Edilmesi:* Problemin çözümünden elde edilen sonuçların analiz edildiği ve gelecek çalışmalar için önerilerin sunulduğu adımdır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez kapsamı içerisinde MHDP üzerine çalışılmıştır. MHDP’de yaşa ve cinsiyete bağlı fiziksel iş yükü ve işlem zamanının birlikte incelenerek iş istasyonu sayısının optimize edildiği bir 0-1 tamsayılı doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Bu modelin çözümü, MHDP için literatürde önerilmiş olan yaklaşımlardan yola çıkılarak belirlenmiştir.

Choi (2009), hat dengeleme için işlem zamanı ve fiziksel iş yükünü birlikte inceleyen yeni bir matematiksel model sunmuştur. Yazar, çeşitli risk elemanlarıyla fiziksel iş yükü ve işlem zamanını bütünleştiren 0-1 tamsayılı programlamayı önermiştir. Çözüm teknikleri için hedef programlama yaklaşımını ve uygun algoritma sürecini tasarlamıştır. Çalışmada iki varsayım incelenmiştir ve optimal sonuçtan sapmaları değerlendirilmiştir. İlk varsayım, çeşitli modellerdeki aynı görev aynı iş istasyonunda yapılmalıdır. İkinci varsayım, çeşitli modellerdeki aynı görev farklı iş istasyonlarında yapılabilir. Çeşitli test problemleri kullanılarak modelin etkinliği incelenmiştir [Choi, 2009].

Kara ve ark. (2009), ikili bulanık hedef programlama yaklaşımını montaj hattı dengelemeye uygulamışlardır. Bulanık hedefli (iş istasyonu sayısı ve çevrim zamanı hedefleri) düzgün ve U tipi montaj hattı dengelemesi için modeller önermişlerdir. İkili bulanık hedef programlama modelleri Chang tarafından önerilen yaklaşım [Chang, 2007] kullanılarak çözülmüştür. Açıklayıcı bir örnek önerilen modelin geçerliliğini göstermek için düz ve U tipi montaj hattı yapılandırmalarının performansları karşılaştırılmıştır [Kara ve ark., 2009].

Xu ve ark. (2012), montaj hattı tasarım problemlerinde üst sınır ergonomik ölçüleri bütünleştirebilen bir metot önermişlerdir. Doğrusal modeller, ergonomik ölçülere göre işçi ataması için geliştirilmiştir. Bu doğrusal modeller, 0-1 tamsayılı programlamayla bütünleştirilerek ergonomik ve verimlilik ölçülerine izin verilebilir. Bu çalışma, önemsiz derecede azalan hat etkinliğine karşın üst uçlardaki maruziyet

seviyelerinin etkili bir şekilde dengelenebilir ve kontrol edilebilir olduğunu göstermiştir [Xu ve ark., 2012].

Güner ve Hasgöl (2012), U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için, işçilerin performans değerlerini, harcadığı enerji miktarlarını ve görevler arasındaki uyumsuzluk ilişkilerini dikkate alan yeni bir matematiksel model sunmuşlardır. U-tipi MHDP ile ilgili çoğu araştırma çevrim zamanı ve/veya istasyon sayısını azaltmayı amaçlamaktadır. Yazarlar sürdürülebilir dengeyi sağlamak için ergonomik faktörleri de içeren yeni bir tam sayılı programlama modeli önermişlerdir. Ergonomik faktörleri dikkate alan çeşitli model varyasyonları literatürden alınmış test problemleri üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, önerilen modelin U-tipi montaj hatlarında işçilere görev atama kararlarının verilmesinde yararlı olacağı sonucuna varılmıştır [Güner ve Hasgöl, 2012].

Otto ve Scholl (2011), ergonomik risk tahmin metotlarının doğrusal olmayan fonksiyonları kapsayarak montaj hattı dengelemede düşük maliyetle bütünleştirilmesini önermişlerdir. Hesaplama sonuçlarının montaj hattı dengelemenin ergonomik riskleri önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. Ergonomik kısıt olarak kaldırma denklemleri (NIOSH denklemi), duruş pozisyonu denklemleri (OCRA indeksi denklemi) gibi denklemler bir montaj hattı üzerinde incelenmiştir. Çeşitli varsayımlar altında elde edilen çözümler yorumlanmıştır [Otto ve Scholl, 2011].

Chen ve ark. (2012), giyim sanayisinde farklı işçilik yeteneklerine sahip dikiş hatlarının montaj hattı dengelemesi için grup genetik algoritmayı (GGA) önermişlerdir. GGA işçilik yetenek seviyeleri için makineler arasında iş yükünü dağıtabilir. Böylece, ortalama mutlak sapmalar minimize edilmiştir. Giyim sanayisinden gerçek veri ve deneysel tasarım GGA'nın performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Yazarlar, üretim yöneticilerinin kısa çevrim zamanı ve yüksek işçilik kullanımı gibi önemli hedefler için dikiş hatları tasarımına araştırma sonuçlarını kullanabileceğini belirtmişlerdir [Chen ve ark., 2012].

Bautista ve Pereira (2011), zaman ve alan kısıtlı MHDP çözmek sınırlı dinamik programlama (DİP) metodunu önermişlerdir. Basit bir örneğin farklı alt sınırları sınırlı DİP desteklemek için genişletilmiştir. Böylece elde edilen çözümlerin kalitesi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen sınırlar ve çözüm süreçlerinin literatürde bulunan diğer yaklaşımlardan üstün olduğunu göstermiştir [Bautista ve Pereira, 2011].

Becker ve Scholl (2009), basit MHDP'ye ek olarak esnek paralel işyerlerini de ele alarak incelemişlerdir. Problem tanımlanmış ve tamsayılı doğrusal programlama (DP) ile modellenmiştir. Yazarlar, çözüm yaklaşımı olarak bir sezgisel olan dal-sınır metodunu önermişlerdir. Sonuç olarak, sürecin çözüm yeterliliklerini gösteren hesaplama sonuçları rapor edilmiştir [Becker ve Scholl, 2009].

Cheshmehgaz ve ark. (2012), montaj işçileri duruşlarını dikkate alarak yeni bir MHD problemini önermişlerdir. Geleneksel MHD'ye ek olarak duruş çeşitliliğinin yeni bir kriteri tanımlanmış ve modele ilave edilmiştir. Geleneksel kriterlerdeki belirsizliği gidermek için bulanık hedef programlama (HP) kullanılmış ve uygun bir GA modeli çözmek için geliştirilmiştir. Kriterler üzerinde değişiklik yapılarak farklı modeller üzerinde çeşitli hesaplama testleri yapılmıştır [Cheshmehgaz ve ark., 2012].

Costa ve Miralles (2009), MH çalışanlarının atanması ve dengelenmesi probleminde iş rotasyonu programlamayı incelemişlerdir. Yazarlar KTDP modelini ve bir sezgisel ayrıştırma metodunu yeni bir iş rotasyon problemini çözmek için önermişlerdir. Hesaplama sonuçları önerilen sezgiselin etkinliğini göstermiştir [Costa ve Miralles, 2009].

Bautista ve Pereira (2009), montaj hattı dengelemede sınırlı DİP problemini çözmek için yeni bir prosedür önermişlerdir. Sınırlı teriminin kullanımı sadece işletme alanı ile ilgili değil ayrıca sezgisel temelli alanın azaltılmasıyla da ilgilidir. Bu çalışmada önerilen metot, literatürdeki önerilmiş metotlarla karşılaştırılmış ve daha az hesaplama süresine sahip olduğu gözlenmiştir [Bautista ve Pereira, 2009].

Chutima ve Chimklai (2012), çok amaçlı iki taraflı karma modelli MHDP'leri çözmek için negatif bilgili KSO (NBKSO) algoritmasını önermişlerdir. NBKSO yeni çözümler üretiminde farklı parçacıkların ilgili pozisyonlarının bilgisini kullanır. Zayıf çözümlerin bilgisi, zayıf çözümlerdeki bitişik görev çiftlerinden sakınmak için kullanılır. Deneysel sonuçlar NBKSO'nun rekabet edebilir bir algoritma olduğunu göstermiştir [Chutima ve Chimklai, 2012].

Moreira ve Costa (2013), iş rotasyonu çizelgelerini incelerken heterojen özellikli çalışanların olduğu MHD problemini incelemiştir. Yazarlar, sezgisel yapıli çözümlerin havuzundan uygun çizelgeleri seçmek için yerel arama temelli KTP kullanan bir hibrid algoritma önermişlerdir. Sonuçlar, önerilen metodun mevcut metotlarla karşılaştırıldığında hızlı, esnek ve doğru olduğunu göstermiştir [Moreira ve Costa, 2013].

Mozdgir ve ark. (2013), MHD probleminde iş yükü düzgünlük indeksini minimize etmek için diferansiyel gelişim algoritmasını (DGA) önermişlerdir. Algoritmanın parametreleri Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Önerilen modelin geçerliliğini ölçmek için önerilen model mevcut sezgisellerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma önerilen algoritmanın etkinliğini göstermiştir [Mozdgir ve ark., 2013].

Nearchou (2011), MHDP çözümü için KSO temelli yeni bir metot önermiştir. İki kriter optimizasyon için eş zamanlı olarak incelenmiştir: üretim oranını maksimize etmek(çevrim zamanını minimize etmek), iş yükü düzgünlüğünü maksimize etmek. Önerilen KSO algoritması ve iki mevcut çok amaçlı populasyon sezgiselleri arasındaki karşılaştırmalar önerilen yaklaşımın oldukça yüksek performans sağladığını göstermiştir [Nearchou, 2011].

Miralles ve ark. (2008), istasyonlara görevleri ve istasyonlara mevcut çalışanları atamak için eş zamanlı bir çözüm sağlayan MHÇADP'yi incelemiştir. Yazarlar MHÇADP'yi çözmek için dal-sınır metodunu önermişlerdir. Deneysel çalışma, tam

düğüm gelişim stratejili derinlikli ilk arama algoritmasının, minimum alt sınırlı en iyi ilk aramaya göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir [Miralles ve ark., 2008].

Carnahan ve ark. (2001), montaj görevlerinin fiziksel iş talebi ve çevrim zamanını inceleyen MHDP üzerine çalışmıştır. Yazarlar, problemi çözebilmek için üç sezgisel geliştirmişlerdir: (1) sıralama sezgiseli, (2) kombinatoriyal genetik algoritma (KGA) ve (3) problem uzayı genetik algoritması (PGA). Sonuçlar, hat dengelemede çevrim zamanı ve fiziksel iş yükünü eş zamanlı olarak minimize eden en iyi metodun PGA olduğunu göstermiştir [Carnahan ve ark., 2001].

Çizelge 3.1’de MHDP’yi inceleyen çalışmalar gösterilmektedir.

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi MHDP çözümü için çeşitli yön eylem araştırması teknikleri önerilmiştir. Çevrim zamanı, işlem zamanı ve fiziksel iş yükü sık olarak kullanılan kriterler arasındadır.

Önceki çalışmalarda, fiziksel iş yükü bir çalışana atanan görevlerin toplam işlem zamanı olarak ifade edilebilir. Çalışanlar arasındaki farklılıklar hesaplamada ele alınmaktadır.

Örneğin, Nearchou (2011) iş yükü düzgünlüğünü belirlemek için iş yükünün ortalama mutlak sapmasını önermektedir. Hesaplamalar Eş. 3.1 ve Eş. 3.2’de gösterilmektedir. İstasyondaki çalışanların ortalama iş yükü T olarak gösterilmektedir. Her bir çalışanın sahip olduğu iş yükünün (St_z) bu T değerinden sapması hesaplanmaktadır. Toplam sapma miktarı çalışan sayısına (m) bölünerek ortalama mutlak sapma bulunmaktadır. t_i , i . iş istasyonunun iş yükünü göstermektedir.

$$OMS = \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m | St_z - T | \quad (3.1)$$

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (3.2)$$

Cheshmehgaz ve ark. (2012), rassal olarak 1-10 arasında bir tamsayı değeri belirlemişlerdir. Yazarlar, her j iş istasyonundaki i görevlerinin iş yükünün toplamı

Çizelge 3.1. MHDP'nin sınıflandırılması

Yaklaşımlar	Yazarlar,Yıl	Karar Verme Teknikleri	Kullanım Alanı
Kesin Yaklaşımlar	Choi (2009)	HP	İşlem zamanı ve fiziksel iş yükü optimizasyonu
	Kara ve ark.(2009)	HP	İkili bulanık HP, Düz ve U tipi MHD
	Xu ve ark.(2012)	DP, KTP	MH tasarım problemlerinde üst sınır ergonomik ölçüleri
	Güner ve Hasgöl (2012)	0-1 Tamsayılı programlama	U tipi MH'deki farklı performansa sahip çalışanlar
Sezgisel Yaklaşımlar	Otto ve Scholl (2011)	DP,Tavlama benzetimi	MH'de ergonomik risk
	Chen ve ark.(2012)	GGA	Giyim sektöründe farklı işçi yeteneklerindeki dikiş hattı
	Bautista ve Pereira (2011)	DP, DİP	Sınırlı DİP
	Becker ve Scholl (2009)	DP, Dal-sınır metodu	Paralel montaj hatları
	Cheshmehgaz ve ark. (2012)	Bulanık HP, GA	Montaj işçilerinin vücut duruş riskleri
	Costa ve Miralles (2009)	KTDP, SAM	İş rotasyonu programlama
	Bautista ve Pereira (2009)	DİP	Sınırlı DİP
	Chutima ve Chimklai (2012)	KSO	NBKSO
	Moreira ve Costa(2013)	KTP	Yerel arama temelli KTP
	Mozdgir ve ark.(2013)	DGA	Taguchi metot temelli DGA
	Nearchou (2011)	KSO	Üretim oranı ve iş yükü düzgünlük maksimizasyonu
	Miralles ve ark. (2008)	Dal-sınır metodu	MHÇADP
	Carnahan ve ark. (2001)	Sıralama sezgiseli, KGA, PGA	Çevrim zamanı ve fiziksel iş talebi

$(\sum_{i \in T_j} T\dot{I}_i)$ ve bunların ortalama (ρ) değeri arasındaki maksimum sapmanın minimize edilmesini araştırmaktadırlar. Eş. 3.3'te gösterilen Tİ toplam iş yükünü, İS ise istasyon sayısını göstermektedir:

$$Max \{ \sum_{i \in T_j} T\dot{I}_i - \rho \}_{1 \leq j \leq IS} \quad (3.3)$$

Choi (2009), fiziksel iş yükünü etkileyen kriterler olarak çalışan talebi, çevresel faktörler, uygun olmayan çalışan duruşlarını belirlemiştir. Fiziksel iş yükü formülü aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$PW = \lambda_1 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (u_j I_{rj} X_{irj} - \rho_1) + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (v_j I_{rj} X_{irj} - \rho_2) + \lambda_3 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (y_j I_{rj} X_{irj} - \rho_3) \quad (3.4)$$

$$u_j = \sum_{k=1}^4 a_{jk} A_{jk} \quad (3.5)$$

$$v_j = \sum_{k=1}^5 b_{jk} B_{jk} \quad (3.6)$$

$$y_j = \sum_{k=1}^4 c_{jk} C_{jk} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlerle ilgili notasyonlar simgeler başlığı altında verilmektedir. Bu denklemler yardımıyla istasyondaki çalışanların yaptığı işlerden dolayı maruz kalacağı fiziksel iş yüklerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir. Eş. 3.4'te belirtilen λ_1 , λ_2 , λ_3 fiziksel iş yükünü etkileyen kriterlerin ağırlıklarını ifade etmektedir. u_j , v_j , y_j sırasıyla çalışan talebinde, çevresel faktörlerden, çalışan vücut duruşundan kaynaklı fiziksel iş yükünün değerini ifade etmektedir. Bu değerler belirlenirken her bir işin yapıldığı durumdaki risk faktörleri ele alınmaktadır. Sonuç olarak istasyondaki çalışanın etkilendiği fiziksel iş yükünün dengelenmiş hattaki çalışanların maruz kaldığı ortalama iş yükünden sapması belirlenmektedir.

4. FİZİKSEL İŞ YÜKÜ YAŞ İLİŞKİSİ

Yaşlanan nüfus küresel bir problemdir. Doğum oranlarındaki azalış ve ortalama yaşam süresinin uzamasıyla dünya nüfusu önümüzdeki yıllarda, eskisinden daha hızlı yaşlanacaktır. Nüfusun yaşlanması, aynı zamanda işgücünün de yaşlanması anlamına gelmektedir. Yaşlanmanın çeşitli ekonomik boyutlarından söz edilebilir. Yaşlanmanın, bu çalışmada ele alınan konusu çalışma çağındaki nüfusun azalması ve işgücünün yaşlanmasıdır.

Dünya tarihsel olarak bir demografik geçiş sürecinin ortasındadır. 1900 yılından önceki süreçte bütün ülkelerde nüfus büyüme hızı yavaş seyretmiş, nüfus oranı büyük oranda sabit kalmış ve insanların ortalama ömürleri 65 yaşın altında gerçekleşmiştir. Bu durum yirminci yüzyılın ilk yarısında değişmeye başlamış, doğuşta yaşam beklentisinin artması nüfus artışını hızlandırmıştır. Yirminci yüzyılın ikinci yarısında ise başka bir geçiş süreci yaşanmıştır. Birçok ülkede doğum oranı önemli ölçüde düşmüş, bu durum nüfus büyümesinin yavaşlamasına ve yaşlı nüfusun artmasına neden olmuştur. Gelişmiş ülkelerde yaşlı nüfusun yüzde 20 olan payının 2050 yılında yüzde 33'e yükselmesi öngörülmektedir. Bu ülkelerde halihazırda 60 yaş ve üstü nüfus sayısı, 15 yaş altının nüfus sayısını geçmiştir. 2050 yılında iki grup arasındaki farkın iki katına çıkması beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde ise nüfusun yaşlanması süreci daha yavaştır. Bununla birlikte bu ülkelerin büyük bir çoğunluğunda da yaşlanma süreci başlamıştır. Nitekim 60 yaş ve üstü nüfusun toplam nüfus içindeki yüzde 8 olan payının, 2050 yılında yüzde 20'ye yükseleceği tahmin edilmektedir [Erdönmez, 2007].

Çalışan nüfusun yaşlanmasından kaynaklanan birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Avrupa Birliği (AB-27) ülkelerini kapsayan bir araştırma, 50-64 yaş arası çalışan işgücü sayısının 2025 yılından önce, 25 ve altındaki yaş grubunda çalışan işgücü sayısının iki katından fazla olacağını ortaya koymaktadır (sırasıyla %35 ve %17). Konunun Türkiye açısından da önemli bulunduğu, Haziran 2012'de Başbakanlık tarafından yayımlanan Onuncu Kalkınma Planı Hazırlıkları konulu genelge ile

“Yaşlanma” konusunda özel ihtisas komisyonu kurulmasından anlaşılmaktadır. Türkiye’de sigortalı aktif çalışanların yaş gruplarına göre analizi yapıldığında, “35 yaş altı” grubundaki çalışanların oranında azalma, “45-54” ve “55 ve üzeri” yaş gruplarındaki çalışanların oranında artma eğilimi gözlenmektedir [“http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=25”, (Erişim Tarihi: 20.12.2012)]. Bu süreç, Türkiye’de yürürlüğe giren 5510 sayılı kanun ile daha hızlanacaktır. Yakın geçmişe kadar 40’lı yaşlarda emekli olabilen bir toplumdan, emekliliğe hak kazanmak için 65 yaşına kadar çalışacak bir işgücü yapısına geçilmektedir. Bu durum ise yaşlı ve genç çalışanların bir arada çalıştırılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. TÜİK’in veri tabanı incelenip yaş gruplarına göre istihdam edilenlerin 45 yaş altı ve üstü olmak üzere iki gruba ayrılması sonucunda, 45 yaş altı grubun 2000 yılında istihdam edilenlerin %76.16’lık kısmını oluştururken, 2011 yılında %72.66’lık kısmını oluşturduğu gözlenmiştir. 45 yaş üstü istihdam edilen grubun ise 2000 yılında istihdam edilenlerin %23.85’lik kısmını oluştururken 2011 yılında %27.34’lük kısmını oluşturduğu görülmüştür. Türkiye geçiş döneminde olduğu için emeklilik çağına gelmiş çalışanların çoğunun emekli olduğu yaş 5510 sayılı kanunda belirtilen yaşlardan düşüktür. Şu anda otuz yaşın altında olan çalışanların çoğu 60 ve üstü yaşlarda emekli olacaktır. Önümüzdeki 20-30 yıllık süreçte Türkiye’de işgücünün yaşlanması durumuyla karşı karşıya kalınacaktır [“http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=25”, (Erişim Tarihi: 20.12.2012)].

İşgücünün yaşlanmasıyla verimlilik düzeyinin de düşeceği birçok araştırma sonucunda belirlenmiştir. Yapılan araştırmalarda farklı yaş grupları arasındaki kol, bacak vb. kas grupları incelenerek kas kalitesi ve fiziksel iş kapasiteleriyle ilgili veri toplanmıştır. Bu araştırmalarda genellikle 20-40 yaş aralığında fiziksel iş yükünde sabit bir durum söz konusu iken 40 yaşından sonra bir azalma meydana gelmektedir. 40-60 yaş aralığında fiziksel iş kapasitesi yaklaşık olarak %20 oranında azalmaktadır. Yaşlanan iş gücü göz önünde bulundurulursa %20’lik azalmanın ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır [Kenny ve ark., 2008].

Çalışmanın önemli faktörlerinden birisi de fiziksel güçtür. Kas kuvveti zirve değerlerine 20-40 yaş aralığında ulaşmaktadır, 40-50 yaş aralığında ya korunmakta

ya da yavaşça azalmaya başlamaktadır ve 50 yaşından sonra ise kas kuvvetinde her on yılda yaklaşık %12-15 arasında bir azalma meydana gelmektedir. Yaşlanma sonucu insan vücudunun mutlak kas kütlelerinde azalma meydana gelmektedir [Lindle ve ark., 1997]. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de farklı cinsiyetler için yaş-zirve torku ilişkisini gösteren grafikleri konsantrik ve eksantrik kas kasılma durumları için belirlemiştir. Kas kuvvetinde gerçekleşen azalmanın iskelet kasları kütlelerindeki azalmadan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir ve bu durum birim kas kütlesi başına düşen kuvveti olan kas kalitesinin (KK) de zamanla düştüğünü göstermektedir. Kadınlarda diz ekstansörlerinin ve kol kaslarının eksantrik kasılma zirve torku ölçülerek elde edilen kas kalitesinde yaşlanmaya bağlı bir değişim olmaması haricinde, hem erkek hem de kadınlarda kol ve ayak kas gruplarında eksantrik ve konsantrik kasılma zirve torku ölçülerek elde edilen kas kalitesinde yaşlanma sonucu oluşan düşüş tespit edilmiştir [Lynch ve ark., 1999].

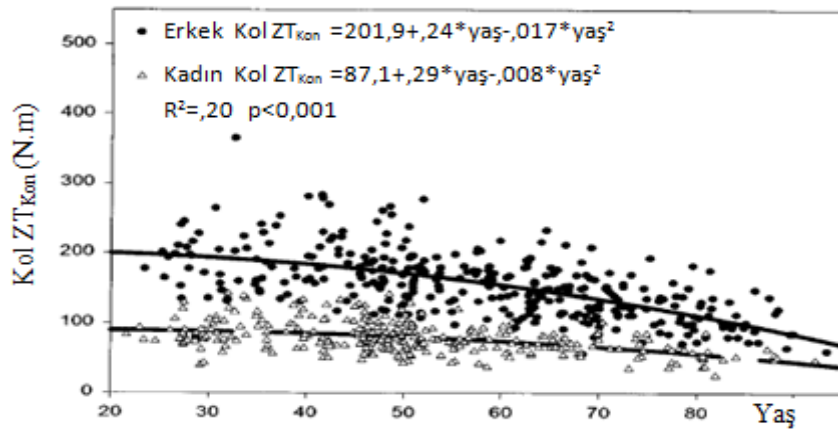
Anlatılan çalışmalardan görüldüğü gibi yaş ve cinsiyet faktörüne göre kol-bacak kaslarında fiziksel değişiklikler söz konusudur. Fiziksel iş yükü kapasitesiyle ilgili yapılan araştırmalarda çalışanların 40-65 yaş aralığında yaklaşık olarak %20’lik bir azalmanın olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında, bir montaj hattı incelenmekte ve daha önceki çalışmalarda fazla ele alınmayan çalışanların yaş ve cinsiyet faktörü incelenmektedir. Çalışanların fiziksel iş yükü kapasitelerini belirleyebilmek için Şekil 4.1’te gösterilen grafik GetData Graph Digitizer programında incelenerek farklı cinsiyetler için yaş-fiziksel iş yükü kapasitesini gösteren kuadratik fonksiyon belirlenmiştir. Mevcut grafik üzerinde fonksiyon gösterilmiş fakat 20-90 yaş aralığı için belirlenmiştir. Bu tez kapsamında çalışma yaşı 20-65 kabul edildiği için yeni bir fonksiyon oluşturulmuştur. Veriler SPSS Statistics 17.0 programında girilmiştir. Fonksiyonun R^2 değeri fonksiyonun etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden 20-65 yaş aralığı için belirlenen verilerin bir kısmı fonksiyonun etkinliğini azalttığı için iptal edilerek fonksiyonun R^2 değeri büyütülmüştür. Bazı verilerin iptal edilmesi sonucunda erkek çalışanlar için Şekil 4.2 ve kadın çalışanlar için Şekil 4.3’teki yaş-FİYK ilişkisini gösteren grafikler elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Erkekler için yaşa göre fiziksel değişimler [Lynch ve ark., 1999]

	20-29 yaş	30-39 yaş	40-49 yaş	50-59 yaş	60-69 yaş	70-79 yaş	>80 yaş
Yaş	26,8±2,3(23)	34,8±2,7(36)	45,5±2,9(66)	54,0±3,1(65)	65,36±3,2(81)	74,8±3,2 (58)	84,5±3,2 (35)
Boy(cm)	180,5±6,9(22)	177,7± 7,4 (34)	179,5± 7,4 (66)	178,2± 5,8 (64)	176,7± 6,6 (79)	174,9± 6,3 (56)	171,1± 5,2 (35)
Ağırlık(kg)	83,9±20,0(22)	83,1±13,1 (34)	88,1±19,0 (66)	89,2±12,4 (64)	84,3±15,2 (79)	83,1±10,2 (56)	74,2±11,6 (34)
% Vücut yağı	20,7± 8,5 (16)	23,6± 8,9 (22)	25,0± 6,2 (47)	30,7± 7,1 (43)	27,5±7,2 (54)	29,5±3,8 (29)	29,9±7,1 (13)
Kol	3,6± 0,4 (14)	3,6± 0,5 (19)	3,7± 0,5 (36)	3,7± 0,4 (28)	3,3± 0,4 (45)	3,1± 0,4 (26)	2,9± 0,5 (10)
Bacak	10,7±1,1 (16)	10,2±1,4 (22)	10,3±1,5 (47)	10,3±1,1 (43)	9,4±1,2 (54)	9,2±1,0 (29)	8,5±0,9 (13)
Kol ZT _{Kon} N.m	190±40 (19)	184±51 (32)	186±43 (63)	164±33 (61)	141±34 (77)	123±28 (51)	103±26 (31)
Kol ZT _{Eks} N.m	217±46 (19)	227±62 (32)	217±50 (63)	203±41 (62)	175±40 (74)	162±41 (51)	139±34 (29)
Bacak ZT _{Kon} N.m	339±93 (23)	337±69 (35)	340±86 (63)	304±55 (62)	260±64 (75)	220±52 (53)	176±44 (31)
Bacak ZT _{Eks} N.m	429±117 (21)	401±118 (36)	409±100 (61)	383±74 (64)	337±87 (72)	289±62 (55)	257±56 (31)

Çizelge 4.2. Kadınlar için yaşa göre fiziksel değişimler [Lynch ve ark., 1999]

	20-29 yaş	30-39 yaş	40-49 yaş	50-59 yaş	60-69 yaş	70-80 yaş	>80 yaş
Yaş	27,3±2,3 (31)	34,7±3,2 (47)	46,0±2,7 (105)	53,2±3,0 (70)	64,2± 3,0 (44)	74,7± 3,0 (24)	83,7±3,6 (18)
Boy(cm)	166,1± 7,2 (31)	166,3± 7,4 (46)	165,1± 5,4 (104)	164,9± 6,5 (68)	161,9±5,5 (43)	158,9±6,1 (23)	156,0±7,5 (18)
Ağırlık(kg)	63,1±10,2 (31)	69,5±14,6 (46)	68,8±13,2 (104)	68,6±11,9 (68)	69,1±12,7 (43)	63,1±11,7 (23)	60,6± 10,1 (18)
% Vücut yağı	31,6±7,8 (24)	33,6±8,2 (31)	36,3±8,1 (97)	37,2±7,8 (62)	39,9± 6,1 (38)	37,7± 9,2 (19)	38,3± 6,0 (15)
Kol	2,1± 0,3 (22)	2,3± 0,3 (29)	2,1± 0,3 (88)	2,1±0,3 (53)	2,0± 0,3 (34)	1,7± 0,3 (15)	1,7±0,3 (13)
Bacak	6,9± 1,1 (24)	7,5± 1,0 (30)	6,7± 0,9 (95)	6,7± 0,9 (60)	6,4± 0,9 (37)	6,2± 0,7 (18)	5,7±0,4 (15)
Kol ZT _{Kon} N.m	81±19 (27)	94±23 (41)	83±21 (86)	75±19 (62)	71± 14 (38)	65± 17 (22)	51± 13 (16)
Kol ZT _{Eks} N.m	98±23 (27)	118±27 (41)	101±25 (87)	96±23 (61)	96± 21 (38)	93± 22 (22)	67± 17 (17)
Bacak ZT _{Kon} N.m	200±46 (30)	215±49 (44)	192±42 (105)	179±39 (65)	147± 38 (41)	138± 32 (23)	97±28 (15)
Bacak ZT _{Eks} N.m	240±53 (29)	264±66 (45)	242±56 (101)	236±59 (64)	204± 54 (42)	176± 35 (22)	146±39 (12)

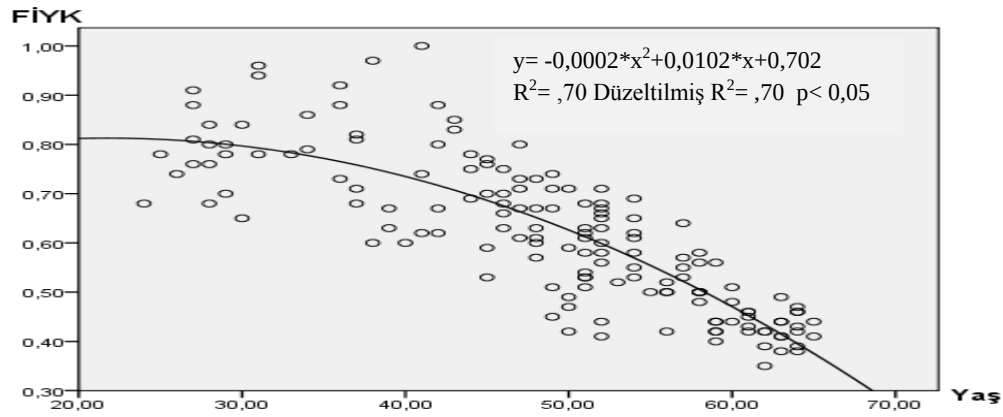


Şekil 4.1. Kol kaslarında konsantrik kasılma [Lynch ve ark., 1999]

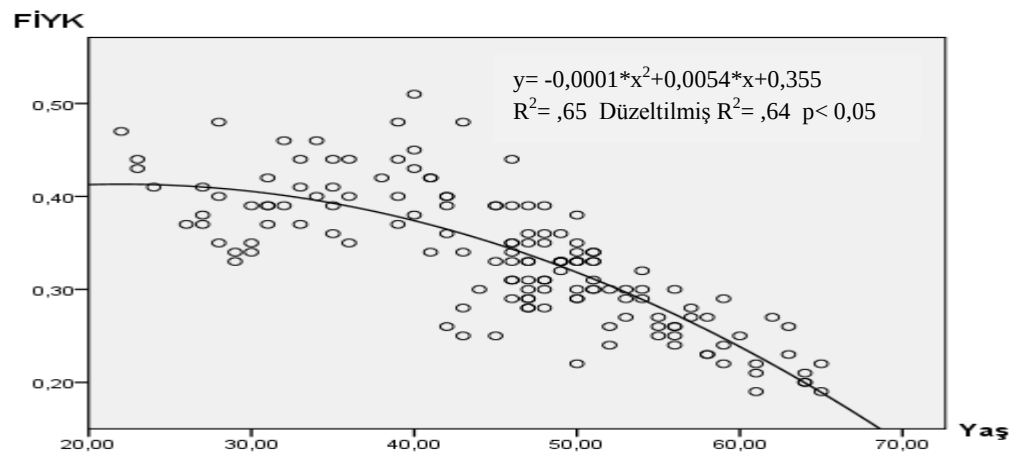
Modelin etkinliğinin gösterilebilmesi için sadece koldaki konsantrik kasılmanın zirve torku incelenmiştir. Konsantrik kasılma, kasın boyunun belirgin bir şekilde azaldığı durumdaki kasılmadır. Örnek olarak ağırlığın yerden yukarı kaldırılması verilebilir. Yaş-fiziksel iş yükü kapasitesi ilişkisini gösteren veriler EK-3 ve EK-4'te gösterilmektedir. Yaş-fiziksel iş yükü kapasitesi ilişkisini gösteren fonksiyon kuadratik formda olmasına rağmen sadece parametrelerin belirlenmesinde kullanıldığı için matematiksel model doğrusal programlama olarak ele alınmıştır. Erkek çalışanlar için, $y = -0,0002*x^2 + 0,0102*x + 0,702$ olarak belirlenmiştir. Kadın çalışanlar için ise $y = -0,0001*x^2 + 0,0054*x + 0,355$ olarak belirlenmiştir. y, fiziksel iş yükü kapasitesini, x ise çalışan yaşını göstermektedir. İşlem kolaylığı sağlaması için sayılar oran olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'deki verilerin en büyüğü 1 olarak alınarak diğer veriler 0-1 aralığındaki verilere dönüştürülerek sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi fonksiyondaki katsayıların ve fonksiyonun anlamlılığı $p < 0,05$ ve $R^2 > 0,60$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.3. Erkek çalışanlar için belirlenen fonksiyonun analizi

	Katsayı	Katsayı anlamlılık	Fonksiyon
Sabit	0,702	p=,000	p=,000
x	0,0102	p=,042	R²=,70
x²	-0,0002	p=,000	Düzeltilmiş R²=,70



Şekil 4.2. Erkek için fiziksel iş yükü kapasitesi



Şekil 4.3. Kadın için fiziksel iş yükü kapasitesi

Çizelge 4.4. Kadın çalışanlar için belirlenen fonksiyonun analizi

	Katsayı	Katsayı anlamlılık	Fonksiyon
Sabit	0,355	p=,000	p=,000
X	0,005	p=,036	R ² =,65
x ²	0,0001	p=,000	Düzeltilmiş R ² =,64

Örneğin, 30 yaşındaki kadın çalışanın fiziksel iş yükü kapasitesi 0,42 iken, 30 yaşındaki erkek çalışan için 0,78'dir. Görüldüğü gibi kadın çalışanların fiziksel iş yükü kapasitesi aynı yaştaki erkek çalışana göre düşüktür. Bunun için çalışanlarda cinsiyet durumu da incelenmiştir.

5. 0-1 TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA

Doğrusal programlama belli bir amacı gerçekleştirmek için kıt kaynakların verimli şekilde kullanımı ve çeşitli seçenekler arasında en uygun dağılımı sağlayan matematiksel bir tekniktir. İkinci dünya savaşı yıllarında askeri problemleri çözmek amacı ile geliştirilen bu teknik, daha sonraları işletmelerdeki optimal kaynak dağılımlarının çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Doğrusal programlama problemi olarak ifade edilebilen bir problem, aynı zamanda optimal bir kaynak dağılım problemidir. Böyle bir problemde gerçekleşmesi arzu edilen amacın açık ve ölçülebilir bir biçimde doğrusal fonksiyon olarak ifadesi gerekirken, öte yandan bu amacın gerçekleşme derecesini kısıtlayan sınırlı kaynakların da aynı biçimde doğrusal eşitlik ya da eşitsizlikler olarak ifade edilmesi gerekir. Aksi durumda doğrusal programlama tekniği kullanılamaz. Başka bir anlatımla kaynak dağılım problemlerinde doğrusal programlama tekniğinin kullanılabilmesi için aşağıdaki varsayımlardan hareket edilir [Haklı, 2006]:

Doğrusallık Varsayımı: Bu varsayım, işletmenin girdileri ile çıktıları arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ifade eder. Üretim düzeyi artarken, aynı oranda üretim girdileri de artar. Bu arada amaç fonksiyonu açık bir şekilde ifade edilmelidir.

Toplanabilirlik Varsayımı: Bu varsayım, farklı üretim faaliyetlerine kaynak olan üretim girdilerinin toplamının her bir işlem için ayrı ayrı kullanılan girdilerinin toplamına eşit olduğunu varsayar.

Sınırlılık varsayımı: Bu varsayımda, üretimde kullanılan kaynakların sınırlı olduğu varsayılır. Bundan dolayı, üretim girdileri ile üretim miktarları kısıtlanır.

Negatif olmama varsayımı: Doğrusal programlamada yer alan temel, aylak ve artık değişkenlerin değerinin sıfır veya sıfırdan büyük olması gerektiğini varsayar.

Toplanabilirlik ve doğrusallık varsayımları genellikle doğrusallık özelliği olarak düşünülmektedir. Bu yüzden doğrusal olmayan programlama probleminin amaç fonksiyonu da doğrusal olabilir. Doğrusal programlama problemi, simpleks metod, iki faz tekniği, grafik metod ve dual – simpleks metod gibi yöntemlerle çeşitli problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir doğrusal programlama modelinin oluşturulabilmesi için aşağıdaki üç temel özelliğe gerek duyulmaktadır:

- *Optimal olması gereken bir amaç
- *Belirlenmesi gereken karar değişkenleri
- *Sonucu sınırlandıran kısıtlar

Doğrusal programlama, amaç fonksiyonunun, kısıtların ve karar değişkenlerinin doğrusal fonksiyon biçiminde ifade edildiği matematiksel programlamanın özel bir alanıdır. Bir doğrusal programlama probleminde amaç fonksiyonu, sistemin etkinliğinin bir ölçümünü veren kârın maksimizasyonu, maliyetin minimizasyonu gibi hedefler şeklinde ifade edilir. Uygulamada daima bu türden amaçları gerçekleştirebilmek zaman, para vb. kaynak kısıtları tarafından belirlenmektedir. Doğrusal programlama modelinde kısıtlar doğrusal eşitlik ya da eşitsizlikler şeklinde gösterilmektedirler. Doğrusal programlamada bir amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize eden $(X_1, \dots, X_j, \dots, X_n)$ vektörünü bulacak genel bir DP (doğrusal programlama) probleminin kapalı formu şu şekilde yazılabilmektedir:

Amaç Fonksiyonu:

$$Z_{(max/min)} = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (5.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \{ \leq, =, \geq \} b_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (5.2)$$

Pozitif Kısıtlama:

$$X_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5.3)$$

Doğrusal programlama modelinin açık formu aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

Amaç fonksiyonu:

$$Z_{(max/min)} = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (5.4)$$

Kısıtlar:

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_1 \quad (5.5)$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_2 \quad (5.6)$$

.

.

.

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_m \quad (5.7)$$

Pozitif Kısıt:

$$X_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5.8)$$

Tam sayılı programlama (TSP), sürekli olarak ifade edilen karar değişkenlerinin, kesikli olarak ifade edilen karar değişkenlerine dönüştürüldüğü bir optimizasyon tekniğidir. Gerçek problemlerde en sık karşılaşılan özelliği ile en yaygın olarak karar stratejilerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Çoğu uygulamalı problemlerin, karar değişkenleri ancak tamsayı olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü, girdi ve çıktıların bölünmezlik sorunu, karar değişkenlerinin tamsayı olmasını gerektirir. Sermaye bütçelemesi, elektrik jeneratör birimleri, araç ve gereçler, makineler ve kişiler bunlara birer örnektir. Doğrusal programlama problemlerinde bazı değişkenlerin tamsayı değerli ya da tüm değişkenlerin tamsayı olması istenebilir. Eğer problemde, sadece bazı değişkenlerin tamsayı değerli olması gerekli iken diğer değişkenler bölünebilirlik varsayımını karşılayan yani kesirli değerler alabilen değişkenler ise bu tür problem, karma tamsayı programlama problemidir.

Modeldeki karar değişkenleri sadece 0 veya 1 değerini alıyorsa bu probleme 0-1 tamsayı programlama denilmektedir. Uygulamada çoğu doğrusal programlama

problemlerinde bölünebilirlik varsayımı geçerli olmadığı gibi bazı problemlerin “evet veya hayır kararları” ile ilişkili olduğu görülmektedir. Bu tür kararlarda evet veya hayır olmak üzere iki seçenek mevcuttur. Örneğin; bu yatırım yapılmalı mıdır? İşletme bu alanda mı kurulmalıdır? gibi sadece iki seçenekli kararlar, değerleri 0 ve 1 ile kısıtlanan karar değişkenleri ile gösterilir. Böylece, j . X karar değişkeni evet veya hayır kararı olarak X_j ile aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$X_j = \begin{cases} 1, & j \text{ evet ise} \\ 0, & j \text{ hayır ise} \end{cases}$$

Bu tür değişkenlere ikili değişkenler (veya 0-1 değişkenleri) adı verilir. Tamsayılı programlama problemindeki tüm değişkenlerin ikili değişkenler yani 0 veya 1’e eşit olması istendiğinde, bu tür tamsayılı programlama problemine ikili tamsayılı programlama veya 0-1 tamsayılı programlama problemi denir. 0-1 tamsayılı programlama modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Amaç fonksiyonu:

$$Z_{min} = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (5.9)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5.10)$$

$$X_j = 0 \text{ veya } 1 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Yukarıdaki modelde görüldüğü gibi X_j değeri 0 veya 1 değerini alabilmektedir. C_j parametresine göre de amaç fonksiyonu sonucu bulunmaktadır.

6. MATERYAL VE METOD

6.1. Materyal

Çalışma kapsamında problemin analizi için Jackson (1956) test problemi kullanılmıştır. Jackson test problemi 11 işlemlili (operasyon) tek modelli bir montaj hattıdır. Problem sadece işlem zamanı belli olan işler için minimum istasyon sayısını belirlemeye çalışmaktadır.

Bu tez kapsamında ise çalışan ataması, çalışanların farklı yaş ve cinsiyetlerine göre fiziksel iş yükü kapasiteleri belirlenmiş ve fiziksel iş yükü kapasitelerine bağlı olarak işlem zamanları belirlenmiştir. Çalışanların fiziksel iş yükü kapasitelerinin belirlenebilmesi için çalışanların yaşı ve cinsiyetinin belirlenmiş olması gerekmektedir. Cinsiyet rassal olarak belirlenmiş olup, yaş ise normal dağılım temelinde rassal olarak belirlenmiştir.

6.2. Metod

6.2.1. Amaç fonksiyonu

Mevcut problem incelendiğinde matematiksel model için istasyon sayısının minimize edilmesi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çevrim süresi her bir iş istasyonundaki işlem sürelerinin en büyüğüne eşit veya daha büyük bir değer olarak belirlenmiştir. Fiziksel iş yükü ise montaj hattında farklı yaşlarda çalışanlar mevcut olduğundan farklı fiziksel iş yükü kapasitesine sahip olacağı ve dolayısıyla bu durumu göz önüne alarak iş yükü dağıtımı gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan çalışmada farklı cinsiyetler için yaş-fiziksel iş yükü kapasitesi ilişkisi incelenmiştir ve bu ilişkiyi gösteren bir kuadratik fonksiyon belirlenmiştir.

6.2.2. Karşılaşılan kısıtlar

Montaj hattı çalışan atama ve dengeleme probleminde karşılaşılan kısıtlar aşağıda verilmektedir:

**Her bir işin bir istasyona atanması kısıtı:* Bir ürünün meydana gelebilmesi için o ürünle ilgili bütün işlerin tam olarak gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu kısıt bu işlevi yerine getirmektedir.

**Çevrim süresi kısıtı:* İstasyona atanacak işlerin sürelerinin toplamı, çevrim süresini aşmamalıdır.

**Öncelik ilişkisi kısıtı:* Montaj hattında işler belirlenen bir önceliğe göre yerine getirilmektedir. MHDP için temel kısıtlardan biridir.

**Fiziksel iş yükü kısıtı:* Montaj hattındaki her bir işin o işi yapan çalışana belli bir fiziksel yükü vardır. Çalışanlar iş istasyonlarında birden fazla iş yapabilmektedir. Çalışanların yapmış oldukları işlerden maruz kaldıkları fiziksel iş yükünün kendi fiziksel iş yükü kapasitesini aşamayacağı bu kısıt ile gösterilmiştir.

**Her bir çalışanın atanabileceği iş istasyonu kısıtı:* İncelenen hat düz olduğu için hattın durmaması için çalışan en fazla bir iş istasyonunda bulunabilmektedir.

6.2.3. Problemin karakteristiği

Çalışma kapsamında montaj hattı probleminde çalışan durumu incelenmiştir. İncelenen montaj hattı aşağıdaki özelliklere sahiptir:

**Montaj hattı tek modellidir:* Tek modellenmiş montaj hatları sadece tek bir ürünün üretildiği hatlardır.

**İncelenen montaj hattı düz hatlıdır:* Montaj hattı fiziksel olarak düz hatlıdır. İşletmeler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

**İşlem süreleri deterministiktir:* İşlem kolaylığı sağlaması için işlem süreleri deterministik olarak incelenmiştir.

**Çevrim süresi bilinmektedir:* Her bir istasyonda ürünün kalabileceği süredir. Çevrim süresi işlem sürelerinden en büyüğüne eşit veya ondan daha büyüktür.

**Belirli yaşlara sahip çalışanlar bulunmaktadır:* Problemden farklı yaşlara ve cinsiyete sahip çalışanlar bulunmaktadır.

**Her çalışan sadece bir istasyonda çalışabilmektedir:* Çalışan sadece bir istasyonda çalışmaktadır. Çalışanlar arasında iş rotasyonu yapılmamaktadır.

**Cinsiyetler ve yaşlar arasında fiziksel iş yükü kapasitesi farklıdır:* Çalışanların cinsiyetlerine göre yaş-fiziksel iş yükü kapasitesi kuadratik fonksiyon olarak belirlenmiştir.

6.2.4. Problemden kullanılan varsayımlar

**İşçilerin öğrenme/unutma özelliği bulunmamaktadır:* Önceki çalışmalarda, çalışanın sürekli yaptığı bir iş ilk yaptığıyla kıyaslandığında daha az sürede yaptığı ve dolayısıyla belirli bir öğrenme özelliğinin söz konusu olduğu tespit edilmiştir. Ancak işlem karmaşıklığına yol açmaması için bu özellik göz ardı edilmiştir.

**İşlem süreleri birbirinden bağımsızdır:* Ardışık iki işlemin süresinin birbirinden bağımsız olduğu varsayılmıştır.

**Günlük çalışma süresi bellidir:* Bir çalışan mola, dinlenme vb. haricinde 6 saat çalışmaktadır.

**Her bir çalışan bütün işleri yapabilme yeteneğindedir:* Çalışanlar bütün işleri yapabilmekte ancak yaş ve cinsiyetlerine göre fiziksel iş yükü kapasiteleri ve işi yapma süreleri farklıdır.

6.2.5. Matematiksel programlama modeli: MHÇADP

Bu çalışmada, yaşa bağlı fiziksel iş yükünü inceleyen MHÇADP'i incelenmektedir. Yaşa ilave olarak cinsiyet faktörü de göz önünde bulundurulmuştur. Bu modelde, montaj hattı dengelenirken bir çalışanın o işi yapma süresi ve fiziksel iş yükü kapasitesi eş zamanlı göz önünde bulundurulurken minimum iş istasyonu sayısı bulunmaya çalışılmıştır.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I a_i \quad (6.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in I} x_{ihj} = 1 \quad \forall j \in N, \quad (6.2)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{h \in H} x_{ihj} \geq 1 \quad \forall i \in I, \quad (6.3)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ih} \leq 1 \quad \forall h \in H, \quad (6.4)$$

$$\sum_{h \in H} y_{ih} \geq 1 \quad \forall i \in I, \quad (6.5)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in I} i \cdot x_{ihj} \leq \sum_{h \in H} \sum_{i \in I} i \cdot x_{iht} \quad \forall j, t \in N, j < t, \quad (6.6)$$

$$\sum_{j \in N} p_{hj} \cdot x_{ihj} \leq C * a(i) \quad \forall h \in H, \forall i \in I, \quad (6.7)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ihj} \leq N \cdot y_{ih} \quad \forall h \in H, \forall i \in I, \quad (6.8)$$

$$\sum_{j \in N} PW_{hj} \cdot x_{ihj} \leq (-0,0002 * O_h^2 + 0,0102 * O_h + 0,702) * E_h + (-0,0001 * O_{h2} + 0,0054 * O_h + 0,355 * B_h) \quad \forall h \in H, \forall i \in I, \quad (6.9)$$

$$y_{ih} \in [0,1] \quad \forall i \in I, h \in H,$$

$$x_{ihj} \in [0,1] \quad \forall i \in I, h \in H, j \in N,$$

$$a_i \in [0,1] \quad \forall i \in I,$$

$$E_h, B_h \in [0,1] \quad \forall h \in H,$$

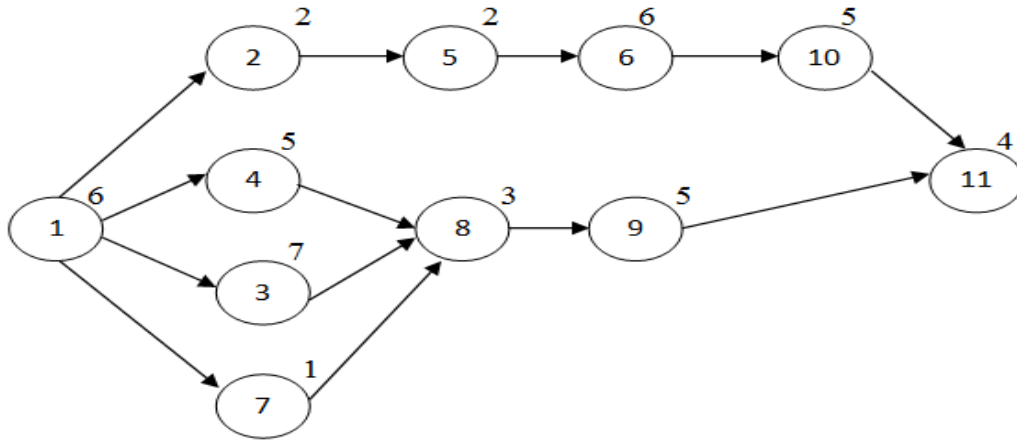
Amaç fonksiyonu (Eş. 6.1) istasyon sayısını minimize etmektedir. Eş. 6.2 ve Eş. 6.3, her bir görevin yerine getirilmesi gerektiğini fakat Eş. 6.3 ayrıca açık olan her bir iş istasyonunun en az bir işi yapması gerektiğini belirtmektedir. Eş. 6.4 ve Eş. 6.5, her bir çalışan en fazla bir iş istasyonuna atanmalıdır ve her bir iş istasyonunda en az bir çalışan olmalıdır. Eş. 6.6, görevler arasındaki öncelik ilişkilerini göstermektedir. Eş. 6.7 ve Eş. 6.8, i iş istasyonuna atanan her bir h çalışanın çevrim süresini aşmamak şartıyla birden fazla göreve sahip olabileceğini belirtmektedir. Eş. 6.9, i iş istasyonuna atanan j görevini gerçekleştiren her h çalışanın kendi fiziksel iş yükü kapasitesini aşamayacağını göstermektedir. Bu fonksiyon, farklı yaş ve cinsiyetteki çalışanların farklı fiziksel iş yükü kapasitesine sahip olduğunu belirtmektedir.

7. MONTAJ HATTI ÇALIŞAN ATAMA VE DENGELEME PROBLEMİNİN 0-1 (İKİLİ) TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA İLE ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde, montaj hattı çalışan atama ve dengeleme probleminin çözümü için incelenen test problemi verileri ve gerekli parametreler açıklanmıştır.

7.1. Test Problemindeki Veriler

Jackson (1956) tarafından yapılmış olan çalışmadan alınan 11 işlemleri bir montaj hattının dengelenmesinde kullanılan öncelik diyagramı Şekil 7.1’de gösterilmektedir. Öncelik diyagramı, düğüm noktaları arasında yönlendirilmiş arklarla gösterilmiştir. Şekil 7.1’e göre, örneğin 1 ve 7 işlemi arasında bir ok bulunmaktadır. Okun yönüne göre 1 işlemi 7 işleminin öncülüdür. 7 işleminin gerçekleşebilmesi için 1 işleminin tamamlanması gerekmektedir. Düğümlerin üst tarafında gösterilen sayılar o işin yapılabilmesi için gereken süreyi göstermektedir. Örneğin, 3. işin işlem zamanı 7’dir.



Şekil 7.1. Problemin Öncelik Diyagramı [Jackson, 1956]

Çalışma kapsamında önerilen modelin Jackson test problemi üzerinde analizinin yapılabilmesi için test problemine ilave veriler gerekmektedir. Test probleminde belirli işlem zamanları için minimum istasyon ataması gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Önerilen model ise farklı cinsiyet ve yaşlara sahip çalışanların farklı fiziksel iş yükü kapasitesi ve işlem zamanlarına sahip olması gerektiğini ifade

etmektedir. Çalışmanın temel amacı olan yaş faktörünün etkili bir şekilde analizinin yapılabilmesi için çalışanları belirli yaş aralıklarında belirleyerek sonuçların analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında çalışanların cinsiyetleri rassal olarak belirlenmiş, yaşları ise normal dağılım temelinde rassal olarak belirlenmiştir. Yaş analizinin yapılabilmesi için 3 farklı yaş aralığı incelenmiştir. İlk olarak ortalaması 30, standart sapması 5 olan normal dağılımdan 6 çalışan rassal olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda cinsiyetleri de rassal olarak belirlenmiştir. Çalışanların yaşı ve cinsiyeti belirlendikten sonra ilgili fonksiyonda yerine koyularak fiziksel iş yükü kapasiteleri bulunmuştur. Fiziksel iş yükü kapasiteleri işlem zamanlarıyla ilişkilidir. Çalışan yaşı arttıkça işi yapabilme süresi artmaktadır. İkinci olarak, ortalaması 40, standart sapması 5 olan, son olarak da ortalaması 50, standart sapması 5 olan çalışanlar incelenmiştir. İlgili veriler aşağıdaki Çizelge 7.1 ve 7.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1. Farklı cinsiyetteki ve yaş aralığındaki çalışanların FİYK’leri

Çalışanlar	Cinsiyet	$\mu = 30, \sigma = 5$		$\mu = 40, \sigma = 5$		$\mu = 50, \sigma = 5$	
		Yaş	FİYK	Yaş	FİYK	Yaş	FİYK
1	E	30	0,83	33	0,82	48	0,73
2	E	34	0,82	36	0,81	44	0,76
3	K	22	0,42	33	0,42	40	0,41
4	E	29	0,83	44	0,76	51	0,70
5	K	28	0,43	40	0,41	44	0,40
6	E	32	0,82	35	0,81	55	0,66

*K= Kadın, E= Erkek, FİYK: Fiziksel iş yükü kapasitesi

Çizelge 7.1’de görüldüğü gibi montaj hattında 2 kadın ve 4 erkek çalışan mevcuttur. $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığında çalışanların en küçüğü 22, en büyüğü ise 34 yaşındadır. En yüksek FİYK’ye sahip çalışan, 0,83 ile 29 ve 30 yaşındaki erkek çalışanlardır. En düşük FİYK’ye sahip çalışan, 0,42 ile 22 yaşındaki kadın çalışandır. $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığında çalışanların en küçüğü 33, en büyüğü ise 44 yaşındadır. En yüksek

FİYK'ye sahip çalışan, 0,82 ile 33 yaşındaki erkek çalışandır. En düşük FİYK'ye sahip çalışan, 0,41 ile 40 yaşındaki kadın çalışandır. $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığında çalışanların en küçüğü 40, en büyüğü ise 55 yaşındadır. En yüksek FİYK'ye sahip çalışan, 0,76 ile 44 yaşındaki erkek çalışandır. En düşük FİYK'ye sahip çalışan, 0,40 ile 44 yaşındaki kadın çalışandır. Montaj hattındaki işler farklı çalışanlar tarafından yapıldığında işlem zamanları da farklılık göstermektedir. Çünkü fiziksel iş yükünün azalması çalışandaki yorgunluğu arttıracaktır. Böylece çalışanın işi yapma süresi artacaktır. Bu çalışma kapsamında, Jackson test problemindeki incelenen işlem süreleri fiziksel kapasitesi 1 olan çalışanlar için kabul edilmiştir. Bu çalışmada ise çalışanların yaşları incelendiği için yaşa göre fiziksel iş yükü kapasiteleri farklı olduğundan işlem süreleri ile fiziksel iş yükü kapasitesi arasında ters orantı olduğu kabul edilmiştir ve aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$T_s = T_i * \frac{1}{PW_h} \quad (7.1)$$

T_i : Jackson test problemindeki işlem süresi, T_s : yaşa bağlı işlem süresi, PW_h : h çalışanın fiziksel iş yükü kapasitesi

Örneğin, Jackson test probleminde 1. iş $T_i = 6$ dakika iken, bu çalışma kapsamında ise 30 yaşındaki bir erkeğin FİYK'si $PW_h = 0,83$ olduğu için bu çalışan için aynı iş $T_s = 7,2$ dakika olarak belirlenmiştir. Ayrıca her bir işin çalışan üzerinde yapacağı fiziksel iş yükü PW_{hj} değerleri, ortalaması 0,009, standart sapması 0,003 olan normal dağılımdan rassal olarak belirlenmiştir. Bu değerler çalışanın o işi sadece bir defa yaptığı durumda çalışan üzerindeki fiziksel iş yükünü göstermektedir. Her bir çevrim süresinde o iş bir defa yapılmaktadır. Toplam çalışma süresi 6 saat olarak varsayıldığı için çevrim süresi farklılığına göre gün içerisinde o işi yapma sayısı da değişmektedir. Bu çalışmada çevrim süreleri 14, 21, 28 olarak belirlenmiştir. Bu çevrim sürelerine göre her bir işin çalışan üzerindeki fiziksel iş yükü değerleri aşağıdaki Çizelge 7.2'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. Çizelge 7.1’deki farklı yaştaki 6 çalışanın 11 işi yapabilme süreleri

	$\mu = 30, \sigma = 5$						$\mu = 40, \sigma = 5$						$\mu = 50, \sigma = 5$					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	7,2	7,3	14,3	7,2	14	7,3	7,3	7,4	14,3	7,9	14,6	7,4	8,2	7,9	14,6	8,6	15	9,1
2	2,4	2,4	4,8	2,4	4,7	2,4	2,4	2,5	4,8	2,6	4,9	2,5	2,7	2,6	4,9	2,9	5	3
3	8,4	8,5	16,7	8,4	16,3	8,5	8,5	8,6	16,7	9,2	17,1	8,6	9,6	9,2	17,1	10	17,5	10,6
4	6	6,1	11,9	6	11,6	6,1	6,1	6,2	11,9	6,6	12,2	6,2	6,8	6,6	12,2	7,1	12,5	7,6
5	2,4	2,4	4,8	2,4	4,7	2,4	2,4	2,5	4,8	2,6	4,9	2,5	2,7	2,6	4,9	2,9	5	3
6	7,2	7,3	14,3	7,2	14	7,3	7,3	7,4	14,3	7,9	14,6	7,4	8,2	7,9	14,6	8,6	15	9,1
7	1,2	1,2	2,4	1,2	2,3	1,2	1,2	1,2	2,4	1,3	2,4	1,2	1,4	1,3	2,4	1,4	2,5	1,5
8	3,6	3,7	7,1	3,6	7	3,7	3,7	3,7	7,1	3,9	7,3	3,7	4,1	3,9	7,3	4,3	7,5	4,5
9	6	6,1	11,9	6	11,6	6,1	6,1	6,2	11,9	6,6	12,2	6,2	6,8	6,6	12,2	7,1	12,5	7,6
10	6	6,1	11,9	6	11,6	6,1	6,1	6,2	11,9	6,6	12,2	6,2	6,8	6,6	12,2	7,1	12,5	7,6
11	4,8	4,9	9,5	4,8	9,3	4,9	4,9	4,9	9,5	5,3	9,8	4,9	5,5	5,3	9,8	5,7	10	6,1

Çizelge 7.3. İşlerin fiziksel iş yükleri

İşler	Bir Defada	14	21	28
1	0,014	0,34	0,23	0,16
2	0,004	0,09	0,06	0,04
3	0,010	0,26	0,18	0,12
4	0,009	0,24	0,16	0,11
5	0,012	0,3	0,21	0,15
6	0,014	0,35	0,24	0,17
7	0,005	0,13	0,09	0,06
8	0,005	0,12	0,08	0,06
9	0,006	0,16	0,11	0,08
10	0,011	0,28	0,19	0,14
11	0,007	0,18	0,12	0,08

7.2. Elde Edilen Bulgular ve Tartışma

Önceki birçok çalışmada montaj hattı problemlerinde çalışanların özellikleri aynı olarak düşünülmüştür. Bu yüzden sadece çevrim süresi, istasyon sayısı gibi belirli amaçların optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Bu tür çözümler sadece kısa dönemli politikalar için uygun olabilmektedir. Fakat orta ve uzun dönemde kurulmuş olan montaj hattında bozulmalar, aksamalar meydana gelmektedir. Çünkü hat çalışanlarının atanması sırasında çalışan özellikleri incelenmemiştir. Bu çalışmada yukarıda anlatılan açıklar kapatılmaktadır.

Çalışanlardaki fiziksel iş yükü kapasitesinin yaşa göre değişimi bu çalışmada incelenmektedir. İki farklı analiz yapılmıştır. İlk olarak yaş analizi yapabilmek için 3 farklı yaş aralığı belirlenmektedir. 11 işlemleri problem için 6 çalışan belirlenmiştir. Çalışanların yaş faktörünün doğru şekilde analizi için çalışanların cinsiyetleri rassal olarak bir kere belirlenmiş ve 3 durum için de sabit olarak alınmıştır. Yaş ise normal dağılım temelinde rassal olarak elde edilmiştir. 3 durum için standart sapmalar 5, ortalamalar ise 30, 40, 50 olarak alınmıştır. Böylece farklı yaş profilindeki çalışanlar için kurulan montaj hattındaki minimum istasyon sayısı bulunmaya çalışılmıştır. İkinci olarak, farklı çevrim süreleri için analiz yapılmıştır. Çevrim süreleri 14, 21 ve 28 dakika olarak belirlenmiştir. Böylece, aynı çalışanların farklı çevrim sürelerinde kaç istasyona atandığı belirlenmiştir. Matematiksel model GAMS yazılım programında çözülmüş ve sonuçlar Çizelge 7.4'te gösterilmiştir.

Sonuçlara bakılırsa yaş artışıyla birlikte çalışılan istasyon sayısı diğer bir ifadeyle çalışan sayısı artmaktadır. Hangi istasyonda hangi çalışanın hangi işi yaptığı (i,h,j) sütununda belirtilmiştir. Sonuçlarda ayrıca çalışan doluluk oranı elde edilmiştir. Her istasyonda bir çalışan çalıştığı için aynı zamanda istasyon doluluk oranı olarak da ifade edilebilir. Bu sonuçlar A sütununda gösterilmektedir. Çalışanların fiziksel iş yükü kapasitelerini kullanma oranı B sütununda, gerekli minimum iş istasyonu sayısı ise C sütununda gösterilmektedir. Örneğin yaş aralığı $\mu = 30, \sigma = 5$ olan çalışanlar için çevrim süresi 21 dakika olduğunda bulunan sonuçların yorumu şöyledir: Minimum istasyon sayısı 3'tür. Her istasyona birer çalışan atanmıştır.

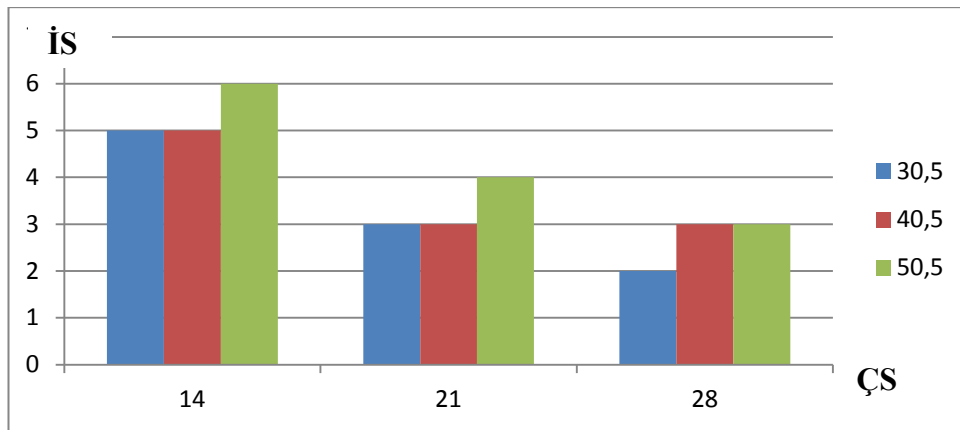
1. istasyon: 4. çalışan, 1., 3. ve 7. işleri yapmaktadır. İstasyon veya çalışan doluluk oranı 0,80, çalışan fiziksel iş yükü kapasitesi (FİYK) kullanım oranı 0,60'dır.
2. istasyon: 6. çalışan, 2., 4., 5. ve 6. işleri yapmaktadır. İstasyon veya çalışan doluluk oranı 0,87, çalışan fiziksel iş yükü kapasitesi (FİYK) kullanım oranı 0,82'dir.
3. istasyon: 2. çalışan, 8., 9., 10. ve 11. işleri yapmaktadır. İstasyon veya çalışan doluluk oranı 0,99, çalışan fiziksel iş yükü kapasitesi (FİYK) kullanım oranı 0,60'dır.

Çizelge 7.4. Test problemi sonuçları

YA	14				21				28			
	(i,h,j)	A	B	C	(i,h,j)	A	B	C	(i,h,j)	A	B	C
$\mu = 30$ $\sigma = 5$	(1,6,1)	0,96	0,71	5	(1,4,1)	0,80	0,60	3	(1,4,1)	0,99	0,72	2
	(1,6,4)				(1,4,3)				(1,4,2)			
	(2,2,7)	0,79	0,50		(1,4,7)				(1,4,4)			
	(2,2,8)								(1,4,5)			
	(2,2,9)								(1,4,8)			
	(3,1,2)	0,94	0,78		(2,6,2)	0,87	0,82		(1,4,9)			
	(3,1,3)				(2,6,4)				(2,2,3)	1,00	0,70	
	(3,1,5)				(2,6,5)				(2,2,6)			
	(4,5,6)	1,00	0,81		(2,6,6)				(2,2,7)			
	(5,4,10)	0,77	0,55		(3,2,8)	0,99	0,60		(2,2,10)			
$\mu = 40$ $\sigma = 5$	(1,1,1)	0,96	0,71	5	(1,6,3)	0,82	0,63	3	(1,2,1)	0,79	0,65	3
	(1,1,4)				(1,6,6)				(1,2,2)			
	(2,4,7)	0,84	0,54		(1,6,7)				(1,2,3)			
	(2,4,8)				(2,4,1)	0,94	0,71		(1,2,5)			
	(2,4,9)				(2,4,10)				(1,2,7)			
	(3,2,2)	0,97	0,80		(2,4,11)				(2,1,4)	0,48	0,34	
	(3,2,3)								(2,1,6)			
	(3,2,5)											
	(4,6,6)	0,97	0,78		(3,1,2)	0,99	0,76		(3,4,8)	0,76	0,47	
	(4,6,10)				(3,1,4)				(3,4,9)			
$\mu = 50$ $\sigma = 5$	(5,3,11)	0,68	0,43	6	(3,1,5)			4	(3,4,10)			3
					(3,1,8)				(3,4,11)			
					(3,1,9)							
	(1,4,1)	0,82	0,61		(1,1,6)	0,98	0,75		(1,2,1)	0,89	0,76	
	(1,4,2)				(1,1,10)				(1,2,2)			
	(2,3,4)	0,87	0,59		(1,1,11)				(1,2,4)			
									(1,2,5)			
	(3,2,3)	0,94	0,91		(2,3,1)	0,81	0,78		(1,2,7)			
	(3,2,5)				(2,3,7)				(1,2,8)			
	(3,2,7)								(2,1,6)	0,78	0,53	
	(4,6,6)	0,97	0,71		(3,2,2)	0,94	0,54		(2,1,9)			
	(4,6,8)				(3,2,4)				(2,1,10)			
	(5,5,10)	0,89	0,70		(3,2,8)				(3,5,3)	0,98	0,5	
	(6,1,9)	0,88	0,47		(3,2,9)				(3,5,11)			
	(6,1,11)				(4,4,3)	0,61	0,56					
					(4,4,5)							

*YA: Yaş aralığı, A= Çalışan dolu zamanı oranı, B=Çalışan fiziksel iş yükü kapasitesi kullanım oranı, C=Minimum istasyon sayısı, i=istasyon, h=çalışan, j= görev

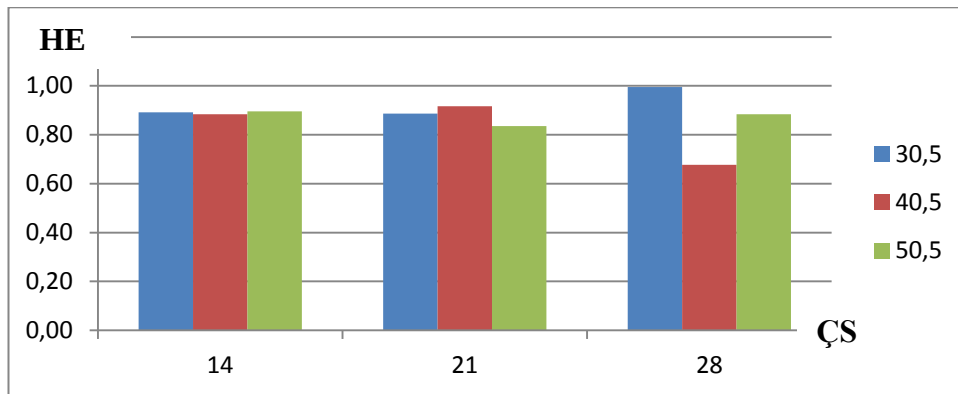
Sonuçlar ayrıca grafik olarak sunulmuştur. Şekil 7.2’de çevrim süresi- istasyon sayısı ilişkisi farklı yaş aralıkları için gösterilmiştir. Bütün yaş aralığındaki çalışanlarda çevrim süresi (ÇS) artması sonucu, gerekli istasyon sayısının (İS) düştüğü görülmüştür. $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar 28 dakikalık çevrim süresinde daha az istasyona ihtiyaç duyarken, diğer çevrim sürelerinde $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar ile aynı sayıda istasyona ihtiyaç duymuşlardır. $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar ise 14 ve 21 çevrim süresinde en büyük istasyon sayısı ile çalıştığı gözlenmiştir.



Şekil 7.2. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi - istasyon sayısı ilişkisi

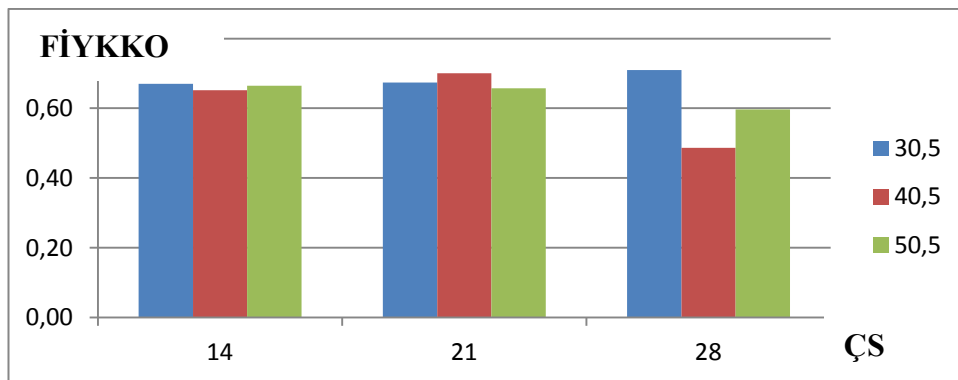
Her bir yaş grubu için 3 farklı çevrim süresi incelendiği için 3 farklı hat kurulmakta ve toplamda 9 farklı hat dengeleme incelenmektedir. Bu 9 hattın her birine atanan çalışanlar ve hattaki istasyonlar göz önünde bulunarak hatların etkinliği (HE) incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 7.3’te gösterilmektedir. Hatların etkinliği önceki bölümlerde anlatılmış olan hat etkinliği formülü yardımıyla belirlenmiştir. Örneğin, Çizelge 7.4’te sunulan $\mu = 30, \sigma = 5$ çalışan yaş aralığındaki çevrim süresi 14 olan dengelenmiş hat için her bir istasyonun kullanım oranı toplanarak bulunan istasyon sayısı bölünmüştür. $(0,96+0,79+1,00+0,94+0,77)/5= 0,89$ hattın etkinliğini göstermektedir. Diğer dengelenmiş hatlar da bu şekilde bulunmuştur. Şekil 7.3’ten görüldüğü gibi çevrim süresi 14 iken farklı yaş aralıklarında dengelenmiş hatların etkinliği birbirine yakındır. ÇS 28 iken en düşük hat etkinliği ise $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlarda, en yüksek hat etkinliği (%100) ise $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş

aralığındaki çalışanların olduğu hatta görülmüştür. Ayrıca, farklı çevrim sürelerinde $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanların olduğu hatlarda, farklı çevrim sürelerinde bile çok yakın hat etkinlikleri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.3. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi - hat etkinliği ilişkisi

Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi- FİYK kullanım oranı ilişkisi Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Çevrim süresi artması sonucunda farklı yaş aralıklarındaki çalışanların FİYK kullanım oranlarında (FİYKKO) önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Sadece 28 çevrim süresinde $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanların FİYK kullanım oranlarında önemli bir azalma olmuştur. $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanların FİYK kullanım oranı çevrim süresi artışıyla beraber artma eğilimde, $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığında ise azalma eğilimindedir.



Şekil 7.4. Farklı yaştaki çalışanlar için çevrim süresi – FİYK kullanım oranı ilişkisi

8. SONUÇ

Küreselleşen dünyada rekabetçiliğin artması sonucunda düşük maliyetli, yüksek kaliteli ürünler üretim sistemleri için oldukça önemli hale gelmiştir. Ara ürünlerin son ürün haline getirildiği montaj hatlarının kurulması veya yeniden tasarlanması oldukça yüksek maliyetlidir. Sürdürülebilir bir montaj hattı kurulması için hat kurulmadan önce çok boyutlu olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışmada son yıllarda önem kazanmaya başlayan MHÇADP için 0-1 tam sayılı programlama yaklaşımı sunulmuştur. Modelin etkinliği 11 işlemleri bir montaj hattı probleminde test edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. GAMS programında çalıştırılan model, 3 farklı yaş aralığındaki çalışan grubunu 3 farklı çevrim süresi için incelemiş ve toplamda 9 montaj hattı dengelenmiştir. Problemde minimum istasyon sayısı optimize edilirken yaşa ve cinsiyete bağlı fiziksel iş yükü kapasitesi ve işlem zamanları kısıt olarak basit MHDP'ye eklenmiştir. Literatürde çalışanların yaş faktörü montaj hattı problemlerinde daha önce çok fazla incelenmemiştir. Modelin etkinliğini test etmek için çalışma kapsamında farklı yaş grupları ve çevrim süreleri incelenmiştir. İlk olarak yaşlara göre FİYK'si belirlenmiş daha sonra FİYK'ye bağlı işlem zamanları belirlenmiştir.

Bütün yaş aralığındaki çalışanlarda çevrim süresi (ÇS) artması sonucu, gerekli istasyon sayısının (İS) düştüğü görülmüştür. $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar 28 dakikalık çevrim süresinde daha az istasyona ihtiyaç duyarken, diğer çevrim sürelerinde $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar ile aynı sayıda istasyona ihtiyaç duymuşlardır. $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlar ise 14 ve 21 çevrim süresinde en büyük istasyon sayısı ile çalıştığı gözlenmiştir. Hatların etkinliği önceki bölümlerde anlatılmış olan hat etkinliği formülü yardımıyla belirlenmiştir. Çevrim süresi 14 iken farklı yaş aralıklarında dengelenmiş hatların etkinliği birbirine yakındır. ÇS 28 iken en düşük hat etkinliği ise $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanlarda, en yüksek hat etkinliği (%100) ise $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığındaki çalışanların olduğu hatta görülmüştür. Ayrıca, farklı çevrim sürelerinde $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığındaki

Çalışanların olduğu hatlarda, farklı çevrim sürelerinde bile çok yakın hat etkinlikleri olduğu belirlenmiştir. evrim süresi artması sonucunda farklı yaş aralıklarındaki alışanların FİYK kullanım oranlarında (FİYKKO) nemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Sadece 28 evrim süresinde $\mu = 40, \sigma = 5$ yaş aralığındaki alışanların FİYK kullanım oranlarında önemli bir azalma olmuştur. $\mu = 30, \sigma = 5$ yaş aralığındaki alışanların FİYK kullanım oranı çevrim süresi artışıyla beraber artma eğilimde, $\mu = 50, \sigma = 5$ yaş aralığında ise azalma eğilimindedir.

evrim süresi-hat etkinliği ilişkisini ve çevrim süresi- FİYK kullanım oranı ilişkisini gösteren grafiklerde iki grafiğin de birbirine benzer olduğu gorlmstur. Farklı yaş gruplarının farklı çevrim sürelerinde aldığı değerlerin byklk sıralamasına bakılırsa her iki grafik için de aynı sonuç elde edilmiştir.

Bu tez çalışması ile,

*MHÇADP’de her bir işin çalışanlarda belli bir fiziksel iş yüküne sebep olacağını ve bu durumu incelemek için alışanların FİYK kısıt olarak eklenmiş ve FİYK’nin yaşa ve cinsiyete bağımlı olduğu belirtilerek gerçek hayat problemine uygun hale getirilmiştir.

*Aynı işin farklı çalışanlar tarafından farklı işlem sürelerinde yapılabileceğini ve FİYK ile ters orantılı olarak işlem zamanının değişebileceği ifade edilmiştir.

Bu kısıtlar eklenerek montaj hattı ergonomik olarak da incelenmiştir. nceki alışmalar istasyon sayısını minimize ederken çalışan faktörünü göz önünde bulundurmamıştır. Bu durum ise zamanla MH’de bozulmalara yol açabilmektedir. Bu tez çalışması ile çalışan faktörü yaş ve cinsiyet göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

Bu tezden yola çıkarak gelecekte aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

*Ülkeler için yaş analizi yapılarak aynı montaj hatları farklı ülkelerde kurulduğunda ne gibi değişimlerin gözleneceği belirlenebilir.

*Model U-tipi, paralel hat gibi montaj hatları için incelenip sonuçlar karşılaştırılabilir.

*Problem farklı test problemleri için sezgisel yöntemler kullanılarak analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

Acar, N., “Üretim Planlaması Yöntem Uygulamaları”, *MPM Yayınları*, Ankara, 130-135 (1996).

Ağpak, K., “Tek Modelli Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Bir Sezgisel Metot”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 25-30 (2001).

Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N.N., Özel, S., ”Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 17 (4): 115-124 (2002).

Başkak, M., ”Çok Modelli/Ürünlü Montaj Hatlarının Dengelemesi İçin Yeni Bir Model ve Çözüm Yöntemi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 15-25 (1998).

Bautista, J., Pereira, J., ”A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem”, *European Journal of Operational Research*, 194: 787–794 (2009).

Bautista, J., Pereira, J., “Procedures for the Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem”, *European Journal of Operational Research*, 212: 473–481 (2011).

Bayraktaroğlu, A.E., “Basit U-Tipi Montaj Hattı Dengelemede Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 32-45 (2007).

Becker, C., Scholl, A., “Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure”, *European Journal of Operational Research*, 199: 359–374 (2009).

Carnahan, B.J., Norman, B.A., Redfern, M.S., “Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing”, *IIE Transactions*, 33: 875-887 (2001).

Chen, J.C., Chen, C.C., Su, L.H., Wu, H.B., Sun, C.J., “Assembly line balancing in garment industry”, *Expert Systems with Applications*, 39: 10073–10081 (2012).

Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F., Desa, M.I., “Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm”, *Computers & Industrial Engineering*, 63: 503–512 (2012).

Choi, G., ”A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload”, *Computers & Industrial Engineering*, 57: 395–400 (2009).

Chutima, P., Chimklai, P., "Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge", **Computers & Industrial Engineering**, 62: 39–55 (2012).

Costa, A. M., Miralles, C., "Job rotation in assembly lines employing disabled workers", **Int. J. Production Economics**, 120: 625–632 (2009).

Çakır, B., "Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeme İçin Tavlama Benzetimi Algoritması", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 24-28 (2006).

Erdönmez, P.A., "Küresel Demografik Değişim Süreci ve Finansal Sektör Üzerindeki Etkileri", **Bankacılar Dergisi**, 62: 59-70 (2007).

Erel, E., "Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi Üzerinde Yapılan Araştırmalar", **Endüstri Mühendisliği Dergisi**, 3: 13 (1991).

Erkut, H., Başkak, M., "Tesis Tasarımı: Stratejiden Uygulamaya", **İrfan Yayıncılık**, İstanbul, 252-275 (1997).

Güner, B., Hasgöl, S., "Sürdürülebilir Denge İçin Ergonomik Faktörleri İçeren U Tipi Montaj Hattı Dengelemesi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 27 (2): 407-415 (2012).

Haklı, Z., "Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli İle Optimal Portföy Oluşturma ve İMKB’de Bir Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü**, Isparta, 17-23 (2006).

İnternet : Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı "İşgücü İstatistikleri" http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=25 (2012).

Jackson, J.R., "A Computing Procedure for a Line Balancing Problem", **Management Science**, 2 (3): 261-271 (1956).

Kalender, F.Y., Yılmaz, M.M., Türkbey, O., "Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Bir Yaklaşım", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 23 (1), 129-138 (2008).

Kara Y., Paksoy, T., Chang, C.T., "Binary fuzzy goal programming approach to single model straight and U-shaped assembly line balancing", **European Journal of Operational Research**, 195: 335–347 (2009).

Kenny, G.P., Yardley, J.E., Martineau, L., Jay, O., "Physical work capacity in older adults: Implications for the aging worker", **American Journal of Industrial Medicine**, 51: 610-625 (2008).

Lindle, R.S., Metter, E.J., Lynch, N.A., Fleg, J.L., Fozard, J.L., Tobin, J., Roy, T.A., Hurley, B.F., "Age and gender comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20 – 93 yr", *J Appl Physiol*, 83: 1581-1587 (1997).

Lynch, N.A., Metter, E.J., Lindle, R.S., Fozard, J.L., Tobin J.D., Roy, T.A., Fleg, J.L., Hurley, B.F., "Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups", *J Appl Physiol*, 86: 188-194 (1999).

Miralles, C., Sabater, J.P.G., Andrés, C., Cardós M., "Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled", *Discrete Appl. Math.*, 156: 352-367 (2008).

Moreira, M.C.O., Costa, A.M., "Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers", *Int. J. Production Economics*, 141: 552–560 (2013).

Mozdgir, A., Mahdavi, I., Badeleh, I.S., Solimanpur, M., "Using the Taguchi method to optimize the differential evolution algorithm parameters for minimizing the workload smoothness index in simple assembly line balancing", *Mathematical and Computer Modelling*, 57: 137–151 (2013).

Nearchou, A.C., "Maximizing production rate and workload smoothing in assembly lines using particle swarm optimization", *International Journal of Production Economics*, 129 (2): 242-250 (2011).

Otto, A., Scholl, A., "Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 212: 277–286 (2011).

Patır, S., "Tamsayılı Programlama Ve Malatya Maksan Transformatör İşletmesine Bir Uygulama", *İnönü Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23 (1): 193-206 (2009).

Polat, O., "Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemlerinin Genetik Algoritmalarla Çözülmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 33-38 (2008).

Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., "2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines", *Computers and Industrial Engineering*, 56: 489-506 (2009).

Wagner, H.M., "Principles Of Operations Research With Application To Management Decisions", *Prentice-Hall Inc.*, Amerika, 352-357 (1969).

Xu, Z., Ko, J., Cochran, D.J., Jung, M.C., "Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models", *Computers & Industrial Engineering*, 62: 431–441 (2012).

EKLER

EK-1 $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresinin 28 dakika olduğu durum için matematiksel modelin GAMS kodu

```

sets
i /1*11/
j /1*6/
h /1*6/
alias (i,k);
variables
x(i,j,h) i.operasyon j.istasyonda h calisani tarafından
y(j,h) j.istasyona h calisani tarafından iş verilirse
a(j) j.istasyona is verilirse
t(i,k)
z amaç;
binary variables
x,y,a;
parameters
d(i,k) öncelik ilişkileri
/1.2
1.3
1.4
1.7
2.5
3.8
4.8
5.6
6.10
7.8
8.9
9.11
10.11
10.11 /
fiz_isyuku(i)
/1 0.16
2 0.04
3 0.12
4 0.11
5 0.15
6 0.17
7 0.06
8 0.06
9 0.08
10 0.14
11 0.08/
sayilar(j)
/1 1
2 2
3 3
4 4
5 5
6 6/

```

EK-1 (Devam) $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresinin 28 dakika olduğu durum için matematiksel modelin GAMS kodu

```

calisan_fizisyukukap(h)
/1 0.73
2 0.76
3 0.41
4 0.70
5 0.40
6 0.66/;
table calisan_gorevsuresi(i,h)
      1   2   3   4   5   6
1  8.2  7.9 14.6  8.6 15   9.1
2  2.7  2.6  4.9  2.9  5    3
3  9.6  9.2 17.1 10   17.5 10.6
4  6.8  6.6 12.2  7.1 12.5  7.6
5  2.7  2.6  4.9  2.9  5    3
6  8.2  7.9 14.6  8.6 15   9.1
7  1.4  1.3  2.4  1.4  2.5  1.5
8  4.1  3.9  7.3  4.3  7.5  4.5
9  6.8  6.6 12.2  7.1 12.5  7.6
10 6.8  6.6 12.2  7.1 12.5  7.6
11 5.5  5.3  9.8  5.7 10   6.1;
equations
istasyonbirkisiti(i) her operasyon bir istasyona atanmalı
istasyonikikisiti(j) her istasyonda sıfır veya daha fazla iş ve çalışan olabilir
ybirkisiti(h) h çalışanı en fazla bir istasyonda bulunabilir
yikikisiti(j) bir istasyonda en az bir çalışan bulunabilir
oncelikKisiti operasyonların öncelik sırası takip edilmeli
cevrimkisiti(j) çevrim süresi kısıtı
akisiti(j) a lar küçükten büyüğe olmalı
gorevkisiti(j,h) bir çalışan bir istasyonda en fazla görev sayısı kadar iş yapabilir
fizik_iskisiti(h) her bir çalışanın fiziksel iş yükü kapasitesi
amac en küçük istasyon sayısı;
ybirkisiti(h).. sum(j,y(j,h))=l=1;
yikikisiti(j).. sum(h,y(j,h))=g=1;
istasyonbirkisiti(i).. sum((j,h),x(i,j,h))=e=1;
istasyonikikisiti(j).. sum((i,h),x(i,j,h))=g=0;
oncelikKisiti(i,k)$d(i,k).. sum((j,h),x(i,j,h)*sayilar(j))=l=sum((j,h),x(k,j,h)*sayilar(j));
cevrimkisiti(j).. sum((i,h),x(i,j,h)*calisan_gorevsuresi(i,h))=l=28*a(j);
akisiti(j).. a(j+1)=l=a(j);
gorevkisiti(j,h).. sum((i),x(i,j,h))=l=11*y(j,h);
fizik_iskisiti(h).. sum((i,j),fiz_isyuku(i)*x(i,j,h))=l=calisan_fizisyukukap(h);
amac.. sum(j,a(j))=e=z;
model MHCADP /all/;
MHCADP.optcr=0;
MHCADP.reslim=36000;
MHCADP.iterlim=1e9;
MHCADP.limrow=1000;
MHCADP.limcol=1000;
solve MHCADP using minlp minimizing z;
display x.l,z.l;

```

EK-2 $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresi 28 dakika iken matematiksel modelin GAMS özet çıktı raporu

MİN	DEĞER	MAX	MARJINAL	1.6.3	.	.	1.000	EPS	2.5.6	.	.	1.000	EPS	
1.1.1	.	1.000	EPS	1.6.4	.	.	1.000	EPS	2.6.1	.	.	1.000	EPS	
1.1.2	.	1.000	1.000	EPS	1.6.5	.	.	1.000	EPS	2.6.2	.	.	1.000	EPS
1.1.3	.	.	1.000	EPS	1.6.6	.	.	1.000	EPS	2.6.3	.	.	1.000	EPS
1.1.4	.	.	1.000	EPS	2.1.1	.	.	1.000	EPS	2.6.4	.	.	1.000	EPS
1.1.5	.	.	1.000	EPS	2.1.2	.	1.000	1.000	EPS	2.6.5	.	.	1.000	EPS
1.1.6	.	.	1.000	EPS	2.1.3	.	.	1.000	EPS	2.6.6	.	.	1.000	EPS
1.2.1	.	.	1.000	EPS	2.1.4	.	.	1.000	EPS	3.1.1	.	.	1.000	EPS
1.2.2	.	.	1.000	EPS	2.1.5	.	.	1.000	EPS	3.1.2	.	.	1.000	EPS
1.2.3	.	.	1.000	EPS	2.1.6	.	.	1.000	EPS	3.1.3	.	.	1.000	EPS
1.2.4	.	.	1.000	EPS	2.2.1	.	.	1.000	EPS	3.1.4	.	.	1.000	EPS
1.2.5	.	.	1.000	EPS	2.2.2	.	.	1.000	EPS	3.1.5	.	.	1.000	EPS
1.2.6	.	.	1.000	EPS	2.2.3	.	.	1.000	EPS	3.1.6	.	.	1.000	EPS
1.3.1	.	.	1.000	EPS	2.2.4	.	.	1.000	EPS	3.2.1	.	.	1.000	EPS
1.3.2	.	.	1.000	EPS	2.2.5	.	.	1.000	EPS	3.2.2	.	.	1.000	EPS
1.3.3	.	.	1.000	EPS	2.2.6	.	.	1.000	EPS	3.2.3	.	.	1.000	EPS
1.3.4	.	.	1.000	EPS	2.3.1	.	.	1.000	EPS	3.2.4	.	.	1.000	EPS
1.3.5	.	.	1.000	EPS	2.3.2	.	.	1.000	EPS	3.2.5	.	.	1.000	EPS
1.3.6	.	.	1.000	EPS	2.3.3	.	.	1.000	EPS	3.2.6	.	.	1.000	EPS
1.4.1	.	.	1.000	EPS	2.3.4	.	.	1.000	EPS	3.3.1	.	.	1.000	EPS
1.4.2	.	.	1.000	EPS	2.3.5	.	.	1.000	EPS	3.3.2	.	.	1.000	EPS
1.4.3	.	.	1.000	EPS	2.3.6	.	.	1.000	EPS	3.3.3	.	.	1.000	EPS
1.4.4	.	.	1.000	EPS	2.4.1	.	.	1.000	EPS	3.3.4	.	.	1.000	EPS
1.4.5	.	.	1.000	EPS	2.4.2	.	.	1.000	EPS	3.3.5	.	1.000	1.000	EPS
1.4.6	.	.	1.000	EPS	2.4.3	.	.	1.000	EPS	3.3.6	.	.	1.000	EPS
1.5.1	.	.	1.000	EPS	2.4.4	.	.	1.000	EPS	3.4.1	.	.	1.000	EPS
1.5.2	.	.	1.000	EPS	2.4.5	.	.	1.000	EPS	3.4.2	.	.	1.000	EPS
1.5.3	.	.	1.000	EPS	2.4.6	.	.	1.000	EPS	3.4.3	.	.	1.000	EPS
1.5.4	.	.	1.000	EPS	2.5.1	.	.	1.000	EPS	3.4.4	.	.	1.000	EPS
1.5.5	.	.	1.000	EPS	2.5.2	.	.	1.000	EPS	3.4.5	.	.	1.000	EPS
1.5.6	.	.	1.000	EPS	2.5.3	.	.	1.000	EPS	3.4.6	.	.	1.000	EPS
1.6.1	.	.	1.000	EPS	2.5.4	.	.	1.000	EPS	3.5.1	.	.	1.000	EPS
1.6.2	.	.	1.000	EPS	2.5.5	.	.	1.000	EPS	3.5.2	.	.	1.000	EPS

EK-2 (Devam) $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresi 28 dakika iken matematiksel modelin GAMS özet çıktı raporu

MİN DEĞER				MAX				MARJINAL				4.4.5				. .				1.000				EPS				5.4.2				. .				1.000				EPS				
3.5.3	.	.	1.000	EPS	4.4.6	.	.	1.000	EPS	5.4.3	.	.	1.000	EPS	3.5.4	.	.	1.000	EPS	4.5.1	.	.	1.000	EPS	5.4.4	.	.	1.000	EPS	3.5.5	.	.	1.000	EPS	4.5.2	.	.	1.000	EPS	5.4.5	.	.	1.000	EPS
3.5.6	.	.	1.000	EPS	4.5.3	.	.	1.000	EPS	5.4.6	.	.	1.000	EPS	3.6.1	.	.	1.000	EPS	4.5.4	.	.	1.000	EPS	5.5.1	.	.	1.000	EPS	3.6.2	.	.	1.000	EPS	4.5.5	.	.	1.000	EPS	5.5.2	.	.	1.000	EPS
3.6.3	.	.	1.000	EPS	4.5.6	.	.	1.000	EPS	5.5.3	.	.	1.000	EPS	3.6.4	.	.	1.000	EPS	4.6.1	.	.	1.000	EPS	5.5.4	.	.	1.000	EPS	3.6.5	.	.	1.000	EPS	4.6.2	.	.	1.000	EPS	5.5.5	.	.	1.000	EPS
3.6.6	.	.	1.000	EPS	4.6.3	.	.	1.000	EPS	5.5.6	.	.	1.000	EPS	4.1.1	.	.	1.000	EPS	4.6.4	.	.	1.000	EPS	5.6.1	.	.	1.000	EPS	4.1.2	.	1.000	1.000	EPS	4.6.5	.	.	1.000	EPS	5.6.2	.	.	1.000	EPS
4.1.3	.	.	1.000	EPS	4.6.6	.	.	1.000	EPS	5.6.3	.	.	1.000	EPS	4.1.4	.	.	1.000	EPS	5.1.1	.	.	1.000	EPS	5.6.4	.	.	1.000	EPS	4.1.5	.	.	1.000	EPS	5.1.2	.	1.000	1.000	EPS	5.6.5	.	.	1.000	EPS
4.1.6	.	.	1.000	EPS	5.1.3	.	.	1.000	EPS	5.6.6	.	.	1.000	EPS	4.1.6	.	.	1.000	EPS	5.1.4	.	.	1.000	EPS	6.1.1	.	.	1.000	EPS	4.2.1	.	.	1.000	EPS	5.1.5	.	.	1.000	EPS	6.1.2	.	.	1.000	EPS
4.2.2	.	.	1.000	EPS	5.1.6	.	.	1.000	EPS	6.1.3	.	.	1.000	EPS	4.2.3	.	.	1.000	EPS	5.2.1	.	.	1.000	EPS	6.1.4	.	.	1.000	EPS	4.2.4	.	.	1.000	EPS	5.2.2	.	.	1.000	EPS	6.1.5	.	.	1.000	EPS
4.2.5	.	.	1.000	EPS	5.2.3	.	.	1.000	EPS	6.1.6	.	.	1.000	EPS	4.2.6	.	.	1.000	EPS	5.2.4	.	.	1.000	EPS	6.2.1	.	1.000	1.000	EPS	4.3.1	.	.	1.000	EPS	5.2.5	.	.	1.000	EPS	6.2.2	.	.	1.000	EPS
4.3.2	.	.	1.000	EPS	5.2.6	.	.	1.000	EPS	6.2.3	.	.	1.000	EPS	4.3.3	.	.	1.000	EPS	5.3.1	.	.	1.000	EPS	6.2.4	.	.	1.000	EPS	4.3.4	.	.	1.000	EPS	5.3.2	.	.	1.000	EPS	6.2.5	.	.	1.000	EPS
4.3.5	.	.	1.000	EPS	5.3.3	.	.	1.000	EPS	6.2.6	.	.	1.000	EPS	4.3.6	.	.	1.000	EPS	5.3.4	.	.	1.000	EPS	6.3.1	.	.	1.000	EPS	4.4.1	.	.	1.000	EPS	5.3.5	.	.	1.000	EPS	6.3.2	.	.	1.000	EPS
4.4.2	.	.	1.000	EPS	5.3.6	.	.	1.000	EPS	6.3.3	.	.	1.000	EPS	4.4.3	.	.	1.000	EPS	5.4.1	.	.	1.000	EPS	6.3.4	.	.	1.000	EPS	4.4.4	.	.	1.000	EPS										

EK-2 (Devam) $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresi 28 dakika iken matematiksel modelin GAMS özet çıktı raporu

	MİN	DEĞER	MAX	MARJINAL	7.2.5	.	.	1.000	EPS	8.1.6	.	.	1.000	EPS
6.3.5	.	.	1.000	EPS	7.2.6	.	.	1.000	EPS	8.2.1	.	.	1.000	EPS
6.3.6	.	.	1.000	EPS	7.3.1	.	.	1.000	EPS	8.2.2	.	.	1.000	EPS
6.4.1	.	.	1.000	EPS	7.3.2	.	.	1.000	EPS	8.2.3	.	.	1.000	EPS
6.4.2	.	.	1.000	EPS	7.3.3	.	.	1.000	EPS	8.2.4	.	.	1.000	EPS
6.4.3	.	.	1.000	EPS	7.3.4	.	.	1.000	EPS	8.2.5	.	.	1.000	EPS
6.4.4	.	.	1.000	EPS	7.3.5	.	.	1.000	EPS	8.2.6	.	.	1.000	EPS
6.4.5	.	.	1.000	EPS	7.3.6	.	.	1.000	EPS	8.3.1	.	.	1.000	EPS
6.4.6	.	.	1.000	EPS	7.4.1	.	.	1.000	EPS	8.3.2	.	.	1.000	EPS
6.5.1	.	.	1.000	EPS	7.4.2	.	.	1.000	EPS	8.3.3	.	.	1.000	EPS
6.5.2	.	.	1.000	EPS	7.4.3	.	.	1.000	EPS	8.3.4	.	.	1.000	EPS
6.5.3	.	.	1.000	EPS	7.4.4	.	.	1.000	EPS	8.3.5	.	.	1.000	EPS
6.5.4	.	.	1.000	EPS	7.4.5	.	.	1.000	EPS	8.3.6	.	.	1.000	EPS
6.5.5	.	.	1.000	EPS	7.4.6	.	.	1.000	EPS	8.4.1	.	.	1.000	EPS
6.5.6	.	.	1.000	EPS	7.5.1	.	.	1.000	EPS	8.4.2	.	.	1.000	EPS
6.6.1	.	.	1.000	EPS	7.5.2	.	.	1.000	EPS	8.4.3	.	.	1.000	EPS
6.6.2	.	.	1.000	EPS	7.5.3	.	.	1.000	EPS	8.4.4	.	.	1.000	EPS
6.6.3	.	.	1.000	EPS	7.5.4	.	.	1.000	EPS	8.4.5	.	.	1.000	EPS
6.6.4	.	.	1.000	EPS	7.5.5	.	.	1.000	EPS	8.4.6	.	.	1.000	EPS
6.6.5	.	.	1.000	EPS	7.5.6	.	.	1.000	EPS	8.5.1	.	.	1.000	EPS
6.6.6	.	.	1.000	EPS	7.6.1	.	.	1.000	EPS	8.5.2	.	.	1.000	EPS
7.1.1	.	.	1.000	EPS	7.6.2	.	.	1.000	EPS	8.5.3	.	.	1.000	EPS
7.1.2	.	1.000	1.000	EPS	7.6.3	.	.	1.000	EPS	8.5.4	.	.	1.000	EPS
7.1.3	.	.	1.000	EPS	7.6.4	.	.	1.000	EPS	8.5.5	.	.	1.000	EPS
7.1.4	.	.	1.000	EPS	7.6.5	.	.	1.000	EPS	8.5.6	.	.	1.000	EPS
7.1.5	.	.	1.000	EPS	7.6.6	.	.	1.000	EPS	8.6.1	.	.	1.000	EPS
7.1.6	.	.	1.000	EPS	8.1.1	.	.	1.000	EPS	8.6.2	.	.	1.000	EPS
7.2.1	.	.	1.000	EPS	8.1.2	.	1.000	1.000	EPS	8.6.3	.	.	1.000	EPS
7.2.2	.	.	1.000	EPS	8.1.3	.	.	1.000	EPS	8.6.4	.	.	1.000	EPS
7.2.3	.	.	1.000	EPS	8.1.4	.	.	1.000	EPS	8.6.5	.	.	1.000	EPS
7.2.4	.	.	1.000	EPS	8.1.5	.	.	1.000	EPS	8.6.6	.	.	1.000	EPS

EK-2 (Devam) $\mu=50, \sigma=5$ çalışan yaş aralığı ve çevrim süresi 28 dakika iken matematiksel modelin GAMS özet çıktı raporu

MİN DEĞER MAX				MARJINAL	10.1.1	.	.	1.000	EPS	11.1.2	.	.	1.000	EPS
9.1.1	.	.	1.000	EPS	10.1.2	.	.	1.000	EPS	11.1.3	.	.	1.000	EPS
9.1.2	.	.	1.000	EPS	10.1.3	.	.	1.000	EPS	11.1.4	.	.	1.000	EPS
9.1.3	.	.	1.000	EPS	10.1.4	.	.	1.000	EPS	11.1.5	.	.	1.000	EPS
9.1.4	.	.	1.000	EPS	10.1.5	.	.	1.000	EPS	11.1.6	.	.	1.000	EPS
9.1.5	.	.	1.000	EPS	10.1.6	.	.	1.000	EPS	11.2.1	.	.	1.000	EPS
9.1.6	.	.	1.000	EPS	10.2.1	.	1.000	1.000	EPS	11.2.2	.	.	1.000	EPS
9.2.1	.	1.000	1.000	EPS	10.2.2	.	.	1.000	EPS	11.2.3	.	.	1.000	EPS
9.2.2	.	.	1.000	EPS	10.2.3	.	.	1.000	EPS	11.2.4	.	.	1.000	EPS
9.2.3	.	.	1.000	EPS	10.2.4	.	.	1.000	EPS	11.2.5	.	.	1.000	EPS
9.2.4	.	.	1.000	EPS	10.2.5	.	.	1.000	EPS	11.2.6	.	.	1.000	EPS
9.2.5	.	.	1.000	EPS	10.2.6	.	.	1.000	EPS	11.3.1	.	.	1.000	EPS
9.2.6	.	.	1.000	EPS	10.3.1	.	.	1.000	EPS	11.3.2	.	.	1.000	EPS
9.3.1	.	.	1.000	EPS	10.3.2	.	.	1.000	EPS	11.3.3	.	.	1.000	EPS
9.3.2	.	.	1.000	EPS	10.3.3	.	.	1.000	EPS	11.3.4	.	.	1.000	EPS
9.3.3	.	.	1.000	EPS	10.3.4	.	.	1.000	EPS	11.3.5	.	1.000	1.000	EPS
9.3.4	.	.	1.000	EPS	10.3.5	.	.	1.000	EPS	11.3.6	.	.	1.000	EPS
9.3.5	.	.	1.000	EPS	10.3.6	.	.	1.000	EPS	11.4.1	.	.	1.000	EPS
9.3.6	.	.	1.000	EPS	10.4.1	.	.	1.000	EPS	11.4.2	.	.	1.000	EPS
9.4.1	.	.	1.000	EPS	10.4.2	.	.	1.000	EPS	11.4.3	.	.	1.000	EPS
9.4.2	.	.	1.000	EPS	10.4.3	.	.	1.000	EPS	11.4.4	.	.	1.000	EPS
9.4.3	.	.	1.000	EPS	10.4.4	.	.	1.000	EPS	11.4.5	.	.	1.000	EPS
9.4.4	.	.	1.000	EPS	10.4.5	.	.	1.000	EPS	11.4.6	.	.	1.000	EPS
9.4.5	.	.	1.000	EPS	10.4.6	.	.	1.000	EPS	11.5.1	.	.	1.000	EPS
9.4.6	.	.	1.000	EPS	10.5.1	.	.	1.000	EPS	11.5.2	.	.	1.000	EPS
9.5.1	.	.	1.000	EPS	10.5.2	.	.	1.000	EPS	11.5.3	.	.	1.000	EPS
9.5.2	.	.	1.000	EPS	10.5.3	.	.	1.000	EPS	11.5.4	.	.	1.000	EPS
9.5.4	.	.	1.000	EPS	10.5.4	.	.	1.000	EPS	11.5.5	.	.	1.000	EPS
9.5.5	.	.	1.000	EPS	10.5.5	.	.	1.000	EPS	11.5.6	.	.	1.000	EPS
9.5.6	.	.	1.000	EPS	10.5.6	.	.	1.000	EPS	11.6.1	.	.	1.000	EPS
9.6.1	.	.	1.000	EPS	10.6.1	.	.	1.000	EPS	11.6.2	.	.	1.000	EPS
9.6.2	.	.	1.000	EPS	10.6.2	.	.	1.000	EPS	11.6.3	.	.	1.000	EPS
9.6.3	.	.	1.000	EPS	10.6.3	.	.	1.000	EPS	11.6.4	.	.	1.000	EPS
9.6.4	.	.	1.000	EPS	10.6.4	.	.	1.000	EPS	11.6.5	.	.	1.000	EPS
9.6.5	.	.	1.000	EPS	10.6.5	.	.	1.000	EPS	11.6.6	.	.	1.000	EPS
9.6.6	.	.	1.000	EPS	10.6.6	.	.	1.000	EPS					
					11.1.1	.	.	1.000	EPS					

EK-3 Erkek çalışanlar için yaş – FİYK ilişkisini gösteren veriler

YE	%FE	FE	YE	%FE	FE	YE	%FE	FE	YE	%FE	FE	YE	%FE	FE	YE	%FE	FE
24	0,68	179	38	0,60	157	46	0,75	196	51	0,53	140	55	0,50	130	61	0,43	113
25	0,78	204	39	0,63	166	47	0,61	159	51	0,51	135	56	0,52	136	61	0,46	121
26	0,74	195	39	0,67	177	47	0,73	191	51	0,61	159	56	0,50	132	61	0,45	119
27	0,76	201	40	0,60	159	47	0,67	176	51	0,62	162	56	0,42	111	61	0,42	111
27	0,81	212	41	1,00	263	47	0,71	186	51	0,58	152	56	0,50	131	62	0,42	111
27	0,91	239	41	0,62	162	47	0,80	211	51	0,54	142	57	0,55	144	62	0,35	93
27	0,88	231	41	0,74	194	48	0,60	158	52	0,58	153	57	0,64	167	62	0,39	103
28	0,80	209	42	0,67	177	48	0,73	191	52	0,60	156	57	0,57	150	62	0,42	109
28	0,84	220	42	0,80	209	48	0,57	150	52	0,63	167	57	0,53	139	63	0,41	108
28	0,68	179	42	0,62	163	48	0,63	167	52	0,65	170	58	0,50	131	63	0,41	109
28	0,76	199	42	0,88	232	48	0,61	161	52	0,56	147	58	0,56	146	63	0,38	100
29	0,70	185	43	0,83	218	48	0,67	176	52	0,68	178	58	0,58	151	63	0,44	116
29	0,78	206	43	0,85	224	49	0,45	119	52	0,71	187	58	0,50	131	63	0,44	116
29	0,80	211	44	0,75	198	49	0,71	185	52	0,41	107	58	0,48	127	63	0,49	130
30	0,65	171	44	0,78	205	49	0,74	194	52	0,44	115	58	0,50	131	64	0,42	110
30	0,84	222	44	0,69	182	49	0,51	134	52	0,66	174	59	0,44	115	64	0,46	120
31	0,94	246	45	0,77	202	49	0,67	177	52	0,67	176	59	0,40	105	64	0,47	123
31	0,78	206	45	0,70	185	50	0,71	187	53	0,52	137	59	0,42	110	64	0,43	112
31	0,96	252	45	0,59	154	50	0,42	112	54	0,53	138	59	0,56	147	64	0,39	101
33	0,78	205	45	0,53	139	50	0,47	124	54	0,61	160	59	0,42	111	64	0,38	100
34	0,86	227	45	0,76	199	50	0,59	154	54	0,62	162	59	0,44	116	64	0,46	119
34	0,79	208	46	0,63	165	50	0,49	129	54	0,58	153	60	0,51	135	65	0,41	109
37	0,71	187	46	0,66	172	51	0,63	167	54	0,65	171	60	0,48	126	65	0,44	115
37	0,81	212	46	0,68	180	51	0,53	140	54	0,55	145	60	0,44	116			
38	0,97	254	46	0,70	185	51	0,68	178	54	0,69	181	61	0,46	121			
36	0,88	231	36	0,73	192	36	0,92	242	37	0,82	216	37	0,68	179			

*YE: Erkek çalışan yaşı, %FE: Erkek çalışan için FİYK yüzdesi, FE: Erkek çalışan için FİYK değeri

EK-4 Kadın çalışanlar için yaş – FİYK ilişkisini gösteren veriler

YK	%FK	FK	YK	%FK	FK	YK	%FK	FK	YK	%FK	FK	YK	%FK	FK	YK	%FK	FK
22	0,47	124	35	0,41	109	45	0,33	86	49	0,33	87	54	0,30	79	65	0,22	58
23	0,43	112	35	0,39	104	45	0,39	103	49	0,33	86	54	0,29	75	65	0,19	50
23	0,44	116	36	0,35	92	46	0,31	81	49	0,33	86	54	0,32	84			
24	0,41	109	36	0,40	105	46	0,33	86	49	0,33	87	55	0,25	66			
26	0,37	96	36	0,44	115	46	0,35	91	49	0,36	96	55	0,27	72			
27	0,41	107	38	0,42	110	46	0,35	92	49	0,32	85	55	0,26	68			
27	0,37	97	39	0,44	116	46	0,39	103	50	0,22	58	56	0,24	62			
27	0,38	99	39	0,48	126	46	0,29	77	50	0,29	76	56	0,26	69			
28	0,48	127	39	0,37	98	46	0,31	82	50	0,35	91	56	0,26	70			
28	0,35	92	39	0,40	106	46	0,34	89	50	0,38	100	56	0,30	78			
28	0,40	106	40	0,43	112	46	0,44	115	50	0,33	87	56	0,25	66			
29	0,33	86	40	0,51	134	47	0,36	96	50	0,33	87	57	0,28	72			
29	0,34	90	40	0,38	100	47	0,31	83	50	0,30	80	57	0,27	71			
30	0,34	90	40	0,45	118	47	0,29	76	50	0,29	75	58	0,23	61			
30	0,39	102	41	0,42	112	47	0,35	92	50	0,34	89	58	0,23	59			
30	0,35	92	41	0,42	110	47	0,39	102	50	0,33	86	58	0,27	71			
31	0,37	98	41	0,34	90	47	0,29	76	51	0,33	88	59	0,24	64			
31	0,39	102	42	0,26	68	47	0,33	86	51	0,30	79	59	0,29	76			
31	0,39	103	42	0,40	105	47	0,30	80	51	0,34	88	59	0,22	58			
31	0,42	109	42	0,39	101	47	0,33	86	51	0,31	81	60	0,25	65			
32	0,39	102	42	0,36	96	47	0,28	75	51	0,33	86	61	0,21	56			
32	0,46	120	42	0,40	105	47	0,28	74	51	0,34	88	61	0,19	50			
33	0,41	107	43	0,34	90	48	0,36	94	51	0,30	78	61	0,22	59			
33	0,44	116	43	0,48	127	48	0,39	102	52	0,26	68	62	0,27	70			
33	0,37	96	43	0,28	74	48	0,31	82	52	0,24	63	63	0,23	60			
34	0,46	121	43	0,25	66	48	0,28	74	52	0,30	79	63	0,26	68			
34	0,40	105	44	0,30	80	48	0,30	80	53	0,27	71	64	0,21	55			
35	0,44	116	45	0,25	66	48	0,35	93	53	0,30	78	64	0,20	52			
35	0,36	95	45	0,39	102	48	0,31	81	53	0,29	76	64	0,20	52			

*YK: Kadın çalışan yaşı, %FK: Kadın çalışan için FİYK yüzdesi, FK: Kadın çalışan için FİYK değeri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EFE, Burak
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.01.1989, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 582 38 46
 e-mail : efecihangir@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Endüstri Müh. Bölümü	2013
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Endüstri Müh. Bölümü	2011
Lise	Süleyman Demirel Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012- Devam Ediyor	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011- 2012	Necmettin Erbakan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Efe, B., Efe, Ö. F., Kurt, M., 2013. Supplier Selection Under Workload Constraint and Order Allocation, 26th European Conference On Operational Research, Roma, Italy.

Hobiler

Kitap okumak, tarihi yerleri gezmek, futbol