

ERGONOMİK KOŞULLAR ALTINDA MONTAJ HATTI DENGELEME

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Elif ÖZGÖRMÜŞ


Danışman: Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU


Ağustos, 2007

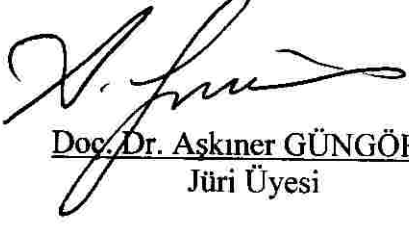
DENİZLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Elif ÖZGÖRMÜŞ tarafından Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU yönetiminde hazırlanan “**Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU
Jüri Başkanı(Danışman)


Yrd. Doç. Dr. İrfan Ertuğrul
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Aşkiner GÜNGÖR
Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22./08.2007 tarih ve 15/5. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL

Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza :

Öğrenci Adı Soyadı : Elif ÖZGÖRMÜŞ

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum tez çalışmamda, öncelikle beni yönlendiren, fikirleriyle bana yol gösteren, tezime yoğunlaşabilmem için bana çalışma ortamı sunan ve çalışmamın daha anlaşılır hale gelmesini sağlayan Değerli Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU'ya ;

Değerli görüşleri ve engin bilgisiyle yardım talebimi geri çevirmeyen, bana vakit ayıran Montaj Hattı Dengeleme konusunda otorite olduğuna inandığım Sayın Hocam Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN'e ;

Tez çalışmam süresince manevi desteği ve fikirleriyle bana destek olan Sayın Hocam Doç. Dr. Aşkîner GÜNGÖR'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Yardımlarını asla unutamayacağım sevgili arkadaşım, Arş. Gör. Reyhan KESKİN'e bu zor dönem boyunca bana gösterdiği anlayış ve yardımları için minnettarım.

Son olarak, bugünlere gelmemi sağlayan, beni her konuda destekleyen, bana güvenen, bana inanan ve her zaman yanımda olan canım anneme, babama ve ağabeyime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elif ÖZGÖRMÜŞ

ÖZET

ERGONOMİK KOŞULLAR ALTINDA MONTAJ HATTI Dengeleme

Özgörmüş, Elif

Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği ABD

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU

Ağustos 2007, 87 Sayfa

Montaj hattı dengeleme problemi literatürde en çok araştırılan konuların arasında yer almaktadır. Yapılan araştırmaların çoğu; çevrim süresinin veya istasyon sayısının enküçüklenmeye çalışıldığı basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP) üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda görevlerin iş istasyonlarına atanmasında sadece öncelik ilişkileri ve çevrim süresine dikkat edilmektedir. Ancak, uygulamada, hat dengelemesi yapılırken görevin zorluğu, riski, monotonluk düzeyi gibi ergonomik faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu faktörler dikkate alınmadan yapılan dengeleme sonucunda iş kazaları, meslek hastalıkları, kalite problemleri vb. pek çok olumsuz durum ile karşılaşmakta ve hattan istenen verim sağlanamamaktadır.

Bu çalışmada, hat dengelemesi yapılırken yukarıda belirtilen ergonomik faktörlerin de dikkate alındığı yeni bir model önerilmektedir. Bu amaçla, modelde yer alan risk seviyesi, zorluk derecesi, monotonluk düzeyi gibi kavramlar bulanık olarak ifade edilmiş ve bir bulanık doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin çözümünde Zimmerman yaklaşımı kullanılmış ve bir örnek problem üzerinde modelin uygulaması gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Montaj Hattı Dengeleme Problemi, Bulanık Doğrusal Programlama, Ergonomi

Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU

Doç. Dr. Aşkîner GÜNGÖR

Yrd. Doç. Dr. İrfan ERTUĞRUL

ABSTRACT

ASSEMBLY LINE BALANCING CONSIDERING ERGONOMIC FACTORS

Özgörmüş, Elif

M.Sc. Thesis in Industrial Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Özcan MUTLU

August 2007, 87 Pages

Assembly line balancing problem is one of the most studied subjects in literature. Most academic studies are focused on the Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) that aims to minimize the number of stations or cycle time. In SALBP; tasks are assigned to work stations in such a way that the task precedence relationships and cycle time constraint are satisfied. However, in practice, the difficulties of the task, the risk level and the monotony of the tasks must be considered. Ignoring these aspects when balancing the line may result in too many problems such as work accidents, job related illnesses and quality problems that reduce the effectiveness of the line.

In this study, a new model that incorporates these ergonomic factors is developed. The factors such as the degree of difficulties, degree of risk and the degree of monotony are treated as fuzzy concepts and a fuzzy linear programming model is developed. Zimmermann approach is used to solve the problem and an illustrative example is presented to show the applicability of the model.

Keywords: Assembly Line Balancing, Fuzzy Linear Programming, Ergonomics

Asst. Prof. Dr. Özcan MUTLU
Assoc. Prof. Dr. Aşkİner GÜNGÖR
Asst. Prof. Dr. İrfan ERTUĞRUL

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| YÜKSEK LİSANS TEZ ONAY FORMU..... | i |
| BİLİMSEL ETİK SAYFASI..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| TABLolar DİZİNİ..... | ix |
| KISALTMALAR DİZİNİ..... | x |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. MONTAJ HATTI DENGEME..... | 3 |
| 2.1.Montaj Hattı Dengeleme Problemi | 4 |
| 2.2.Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Temel Tanımlar | 5 |
| 2.3.Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması | 6 |
| 2.3.1. Yerleşim şekline göre montaj hatları..... | 7 |
| 2.3.2. Model sayısına göre montaj hatları..... | 8 |
| 2.3.3. Hattın kontrol yapısına göre montaj hatları | 10 |
| 2.3.4. Kurulum sıklığına göre montaj hatları | 12 |
| 2.3.5. Otomasyon seviyesine göre montaj hatları | 13 |
| 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 15 |
| 3.1.Giriş..... | 15 |
| 3.2.Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması..... | 16 |
| 3.2.1. Amaç sayısına göre MHDP..... | 16 |
| 3.2.2. İşlem sürelerine göre MHDP..... | 16 |
| 3.2.3. Ürün/Model sayısına göre MHDP..... | 17 |
| 3.2.4. Paralel MHDP..... | 18 |
| 3.2.5. İstasyondaki işçi sayısına göre MHDP..... | 18 |
| 3.2.6. Kaynak kısıtlı MHDP..... | 18 |
| 3.2.7. Basit ve Genel MHDP..... | 18 |
| 3.3. MHDP'ne Çözüm Yaklaşımları..... | 19 |
| 3.4. Bulanık Mantık ve MHDP..... | 22 |
| 3.5. Ergonomi ve MHDP..... | 22 |
| 4. BULANIK MANTIK VE BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA..... | 24 |
| 4.1.Bulanık Mantık..... | 24 |
| 4.1.1. Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları..... | 26 |
| 4.1.2. Bulanık kümelerde temel kavramlar..... | 27 |
| 4.1.3. Bulanık kümelerde temel işlemler..... | 28 |
| 4.2.Bulanık Ortamda Karar Verme..... | 31 |
| 4.3.Bulanık Doğrusal Programlamanın Varsayımları..... | 32 |
| 4.4.Bulanık Doğrusal Programlama | 33 |
| 4.5.Bulanık Doğrusal Programlama Modelleri..... | 35 |
| 4.5.1. Bulanık amaç fonksiyonu katsayılı DP problemi..... | 36 |
| 4.5.2. Bulanık kısıtlayıcı DP problemi..... | 36 |
| 4.5.3. Bulanık amaç fonksiyonlu ve bulanık kısıtlayıcı DP problemi..... | 38 |
| 4.5.4. Amaç fonksiyonu bulanık parametrelili DP problemi..... | 39 |
| 4.5.5. Bulanık parametrelili DP problemi..... | 40 |

| | |
|---|----|
| 4.6. Bulanık Doğrusal Programlama Modellerine Çözüm Yaklaşımları..... | 41 |
| 4.7. Zimmermann Yaklaşımı..... | 41 |
| 5. ERGONOMİK FAKTÖRLER VE MONTAJ HATTI Dengeleme..... | 47 |
| 5.1. Ergonomi Bilimi ve Amacı..... | 47 |
| 5.2. Ergonomik İş Sistemleri | 48 |
| 5.3. Ergonomik Ölçütler | 50 |
| 5.4. Ergonomik İş İstasyonları..... | 51 |
| 5.5. Ergonomik Faktörler Altında Montaj Hattı Dengeleme..... | 52 |
| 6. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA İLE ERGONOMİK MHDP... | 53 |
| 6.1. Basit MHDP..... | 53 |
| 6.2. Ergonomik MHDP..... | 56 |
| 6.3. BDP ile Ergonomik Koşullar altında MHDP..... | 60 |
| 6.4. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Modeli İçin Bir Uygulama..... | 67 |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 78 |
| 7.1. Sonuçlar..... | 78 |
| 7.2. Öneriler ve Gelecek Çalışmalar..... | 79 |
| KAYNAKLAR..... | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 87 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 2.1 Montaj hattı dengeleme sistemi..... | 6 |
| Şekil 2.2 Düz montaj hatları..... | 7 |
| Şekil 2.3 U Tipi montaj hatlar | 8 |
| Şekil 2.4 Tek modelli, karışık modelli, çok modelli hatlar..... | 10 |
| Şekil 2.5 Gecikmesiz montaj hatları..... | 11 |
| Şekil 2.6 Gecikmeli montaj hatları | 12 |
| Şekil 4.1 C kümesinin üyelik fonksiyonu..... | 26 |
| Şekil 4.2 \tilde{C} kümesinin üyelik fonksiyonu..... | 27 |
| Şekil 4.3 Üçgensel bir bulanık sayının üyelik fonksiyonu..... | 29 |
| Şekil 4.4 “ \lesssim ” şeklindeki bulanık kısıtların üyelik fonksiyonu..... | 37 |
| Şekil 4.5 “ \gtrsim ” şeklindeki bulanık kısıtların üyelik fonksiyonu..... | 38 |
| Şekil 4.6 $c^T x \gtrsim b_0$ şeklindeki bulanık amacın üyelik fonksiyonu | 43 |
| Şekil 4.7 $(Ax)_i \lesssim b_i$ şeklindeki bulanık kısıtlayıcının üyelik fonksiyonu..... | 44 |
| Şekil 4.8 Amacın üyelik fonksiyonu..... | 44 |
| Şekil 6.1 Çevrim zamanı üyelik fonksiyonu | 61 |
| Şekil 6.2 İstasyon sayısı üyelik fonksiyonu | 62 |
| Şekil 6.3 Zorluk derecesi üyelik fonksiyonu | 62 |
| Şekil 6.4 Risk derecesi üyelik fonksiyonu | 63 |
| Şekil 6.5 Sıkıcılık derecesi üyelik fonksiyonu | 64 |
| Şekil 6.6 Örnek problemin öncelik diyagramı | 67 |
| Şekil 6.7 İstasyon sayısı üyelik fonksiyonu..... | 70 |
| Şekil 6.8 Çevrim zamanı üyelik fonksiyonu..... | 71 |
| Şekil 6.9 Zorluk derecesi üyelik fonksiyonu..... | 72 |
| Şekil 6.10 Risk derecesi üyelik fonksiyonu..... | 73 |
| Şekil 6.11 Monotonluk derecesi üyelik fonksiyonu..... | 74 |

TABLolar DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Tablo 2.1 MHDP için sınıflandırma..... | 6 |
| Tablo 3.1 BMHDP'nin sınıflandırması..... | 19 |
| Tablo 4.1 BDP problemleri..... | 35 |
| Tablo 4.2 DP ve BDP arasındaki farklar..... | 40 |
| Tablo 6.1 Ergonomik faktör derecelendirme skalası..... | 68 |
| Tablo 6.2 Örnek problemin görevler ve özellikleri | 68 |
| Tablo 6.3 Örnek problemin E_i ve L_i değerleri..... | 69 |
| Tablo 6.4 Örnek problemin klasik model BDP sonuçları..... | 76 |
| Tablo 6.5 Örnek problemin klasik model (Ergonomik değerlendirme)..... | 76 |
| Tablo 6.6 Örnek problemin ergonomik model BDP sonuçları..... | 77 |

KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|--------------|---------------------------------------|
| MHDP | Montaj Hattı Dengeleme Problemi |
| BMHDP | Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi |
| BDP | Bulanık Doğrusal Programlama |
| DP | Doğrusal Programlama |

1. GİRİŞ

Uluslararası rekabette ve günümüzün küreselleşen dünyasında işletmeler, endüstriyel başarının anahtarının etkin imalat sistemlerinden geçtiğini fark etmiş, bu sistemlerin düşük maliyetler ile nasıl kurulabileceği konusuna yönelmiştir. Yeni sistemde, üretim maliyetlerini düşürebilmenin yolu, yüksek hacimde standart ürünlerin üretilmesinden geçmektedir. Bu da montaj hatları ile mümkün olmaktadır.

Montaj hatları, üretimi yapılan iş parçalarının bir istasyondan diğerine hareket etmesiyle meydana gelen sistemlerdir. Bu sistemde, işin olabildiğince çok parçaya ayrıştırılıp her parçanın standartlaştırılması esastır. Üretim, büyük çapta ve seri olarak gerçekleştirilir. Böylece zaman ve iş gücü kaybı ortadan kaldırılmaya veya en aza indirilmeye çalışılır.

Montaj hatları, üretim sistemlerinin verimliliğinde önemli rol oynamaktadır. Bir hattın kurulması ya da yeniden düzenlenmesi oldukça pahalı bir yatırımdır. Bu nedenle, hattın başlangıçta etkin bir şekilde düzenlenmesi önemlidir. Montaj hattı tasarlanırken ortaya çıkan en temel problem, üretim hattındaki iş istasyonlarına ilişkin işlem sürelerinin dengelenmesidir. Dengesiz hatlar, üretimde verimsizliğe, maliyet artışlarına, teknoloji ve işçilikte, daha birçok kayıplara neden olur (Çakır 2006).

Montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli işler, bu işlerin aldıkları süreler ve aralarındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, işlerin bir performans ölçütünü eniyileyecek şekilde sıralı iş istasyonlarına atanması, montaj hattı dengeleme problemi olarak tanımlanmaktadır (Ağpak vd 2002). Montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan performans ölçütleri genellikle, istasyon sayısının veya çevrim süresinin en küçüklenmesidir.

Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP), uzun yıllardan beri araştırmacıların ilgisini üzerinde toplamış ve bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak sanayide montaj hattı dengelemesi yapılırken, bu çalışmalardan pek faydalanılamamaktadır. Çünkü bu konuda yapılan çalışmalardan bazıları, gerçek hayat uygulamalarını içermemekte ve endüstride işletmelerin hat dengeleme problemine çözüm oluşturmak açısından yetersiz kalabilmektedir. Oysa günümüzün rekabet ortamında işletmeler, daha pratik ve esnek çözüm yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı bu çalışmada MHDP'nin çözümü için geliştirilecek matematiksel model, yalnızca hat dengelemede ortaya çıkan öncelik ilişkilerini ve çevrim zamanı kısıtlarını değil, aynı zamanda farklı işgücü performansından kaynaklanan ergonomik kısıtları da eniyilemeyi amaçlamaktadır. Burada ergonomik kısıtlar ile kastedilen; işleri, sadece işlem sürelerine göre değil, aynı zamanda zorluk derecelerini, monotonluk derecesini, tehlike riski taşıyıp taşıyamamasını da dikkate alarak mümkün olduğunca dengeli bir şekilde iş istasyonlarına atamaktır. Böylece hat dengelemesi yapılırken gereksinimlerinden oluşan teknik kısıtların yanı sıra, işçi memnuniyeti, iş güvenliği gibi işgücü performansını etkileyen kısıtlar da dikkate alınarak probleme daha gerçekçi bir yaklaşım getirilmekte ve çözümün uygulanabilirliği arttırılmaktadır.

Bu tez, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde, montaj hatları ve MHDP incelenmiştir. Üçüncü bölümde, montaj hattı dengeleme problemleri hakkında ayrıntılı literatür araştırması yapılmıştır. MHDP'de ergonomi ve bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan yöntem olan bulanık doğrusal programlama anlatılmıştır. Beşinci bölümde, ergonomik MHDP probleminde ergonominin önemi üzerinde durulmuştur. Altıncı bölümde MHDP için ergonomik faktörleri de dikkate alan bulanık doğrusal model geliştirilip, bir örnek problem üzerinde modelin uygulanması açıklanmıştır. Son bölümde ise, çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileride yapılabilecek yeni çalışmalar önerilmiştir.

2. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

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. 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. Seri üretimde ürün, akış halindedir ve tesisin üretilen ürüne göre tasarlanması gerekir (Acar 1996).

Seri üretim, kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Eğer üretilen 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 üretilen nesnenin parçaları bulunan bant, üretim sürecinin gerektirdiği işlem sırasına göre dizilmiş 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 bölünen işler, yapılış sırasına göre dizilmekle, üretim sürecinde, işin gereği parça almak ya da makineler arasında gidip gelmeler (zaman kaybı) önlenmiş olmaktadır.

İlk olarak 1913’te titizlikle yapılan zaman ve hareket etütleri sonucu, yaklaşık 50 metrelik bir üretim hattında üretim süreci 140 işçi arasında bölünmüş, montajı yapılan şašenin montajı için gerekli olan 12 saat 28 dakikalık süre, 5 saat 50 dakikaya

indirilmiştir. 1914 yılında mekanik olarak hareket eden hat, yani yürüyen bant üretime sokulduğunda bu süre 1 saat 30 dakikaya indirilebilmiştir.

Montaj hatlarının işletmelere sağladığı pek çok fayda vardır. Bunlardan birkaçı sayılacak olursa montaj hatları:

1. Düzenli bir malzeme akışı sağlar.
2. İnsan gücü ve tezgâh kapasitelerinin en üst düzeyde kullanımını sağlar.
3. Boş süreleri en aza indirmeyi amaçlar.
4. Boş süreleri, iş istasyonları arasında düzgün şekilde dağıtır.
5. Üretim maliyetlerini en aza indirir.

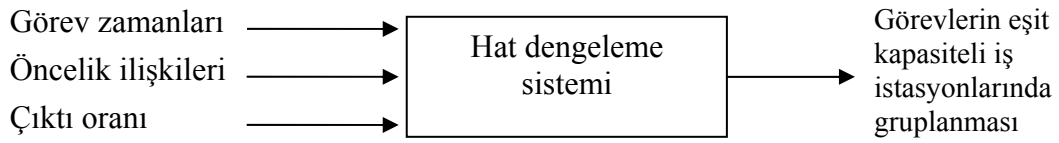
Montaj hatlarının pek çok avantajı olmakla birlikte, dikkat edilmesi gereken önemli noktalar da vardır. Montaj hatlarında çalışan işçiler düşük beceriye sahip çalışanlardır ve sürekli aynı işleri yapmaktan dolayı monotonluk söz konusudur. Ayrıca, talepteki değişim oranlarıyla üretim sisteminin verimliliği doğrudan bağlantılıdır.

Bir hat tasarlanırken ortaya çıkan temel problem, üretim hattındaki iş istasyonlarına dengeli yüklemenin yapılmasıdır. Dengenin sağlanamadığı durumlar, bazı istasyonlarda diğerlerinden daha fazla iş yükü olmasına ve çevrim süresinin olması gerekenden daha uzun olmasına böylece verimlilik kayıplarına neden olur.

2.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj hattı dengeleme problemi, üretim planlama ve kontrol çalışmalarında önemli yeri olan bir problemdir (Günay vd 2004).

Montaj hatlarında bir ürünün montajı, ürünü oluşturan parçaların ve alt montajın bir araya getirilmesi ve üzerinde bir takım işlemlerin yapılması ile gerçekleştirilir. İşlemleri yapacak olanlar, hat boyunca sıralanmış olan işçi grupları ya da diğer bir deyişle iş istasyonlarıdır. Bir montaj hattının temel özelliği, iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona hareket etmesidir. Montaj hatlarında karşılaşılan temel problem, yapılması gerekli görevlerin hattaki istasyonlara ürün ve üretim sistemine bağlı kısıtlar altında atanmasıdır. Bu problem, dengeleme problemi olarak adlandırılır (Ağpak 2001). Montaj hattı dengeleme sistemi şematik olarak şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Montaj hattı dengeleme sistemi (Dervitsiotis 1981)

MHDP’de kullanılan performans ölçüleri; istasyon sayısı bilindiğinde çevrim zamanını en küçüklemek ve çevrim zamanı verildiğinde istasyon sayısının en küçüklemek olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Birinci performans ölçütünde üretim miktarının artırılması hedeflenirken, ikinci performans ölçütünde ise işgücü maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır.

MHDP matematiksel olarak kolay formüle edilebilmesine rağmen, çözümü oldukça güç bir problemdir. Literatürde MHDP, NP-zor problemler sınıfında yer almaktadır (Ignall 1965).

2.2. Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Temel Kavramlar

MHDP’ni daha iyi anlayabilmek için bazı kavramların açıklanmasında fayda bulunmaktadır. Aşağıda bu kavramlar kısaca açıklanmaktadır.

Montaj: Tamamlanmış bir ürün oluşturmak amacıyla değişik parçaların bir araya getirilip birleştirilme işlemidir. Ürünü oluşturan parçalar, parçaların montaj sıraları ve parçaları birleştirmek için gerekli süreler öncelik diyagramları ile gösterilir.

Operasyon/görev: Operasyon, bir montaj işleminde bölünemeyen en küçük parçasıdır.

İş istasyonu: Montaj hattı üzerinde bir veya daha fazla operasyonun yapıldığı birimdir. İstasyonlarda genellikle bir kişi çalışır. Operasyon ihtiyacına bağlı olarak bir iş istasyonunda birden fazla kişinin çalışması da mümkündür.

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.

İstasyon zamanı: İstasyonda atanması gereken görevlerin tamamlanması için geçen toplam süredir.

Toplam iş zamanı: Montaj hattı üzerinde bir ürünün montajında yapılacak görevlerin tamamlanması için gerekli süredir.

İstasyon Gecikme Zamanı/Boş zaman: Çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki fark istasyon gecikme zamanı ya da boş zaman olarak adlandırılır.

Öncelik Diyagramı: Montajın teknik özelliklerinden dolayı bazı operasyonların zorunlu olarak birbirini izlemesi gerekir. Bu özelliklerin tümü öncelik ilişkisi adı altında toplanır. Bu ilişkiler, genellikle grafikte gösterilir. Bu grafiksel gösterimi hat dengeleme sistemlerinde öncelik ilişkilerinin belirtilmesinde çok yaygın olarak kullanılan öncelik diyagramıdır (Çakır 2006).

2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Montaj hattı dengeleme problemi, bir çok şekilde sınıflandırılabilir. Genel olarak literatürde yer alan montaj hatlarına ilişkin sınıflandırma Tablo 2.1’de verildiği gibi yerleşim şekline, model sayısına, işlem zamanlarına, hattın kontrol yapısına, kurulum sıklığına ve otomasyon seviyesine göre yapılmaktadır.

Tablo 2.1 MHDP için Sınıflandırma (Boysen vd 2006a)

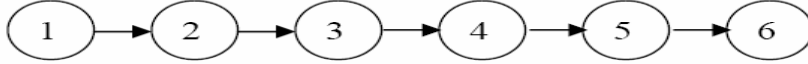
| Yerleşim Şekline Göre Montaj Hatları | | |
|--|------------------------|--------------------|
| Düz Hatlar | U tipi Hatlar | |
| Model Sayısına Göre Montaj Hatları | | |
| Tek Modelli Hatlar | Karışık Modelli Hatlar | Çok Modelli Hatlar |
| Hattın Kontrol Yapısına Göre Montaj Hatları | | |
| Gecikmesiz Hatlar | Gecikmeli Hatlar | |
| Kurulum Sıklığına Göre Montaj Hatları | | |
| İlk Kez Dengeleme | Yeniden Dengeleme | |
| Otomasyon Seviyesine Göre Montaj Hatları | | |
| Manuel Hatlar | Otomatik Hatlar | |

2.3.1. Yerleşim şekline göre montaj hatları

Yerleşim şekline göre montaj hatları düz montaj hatları ve U tipi montaj hatları olmak üzere ikiye ayrılır.

Düz Hatlar

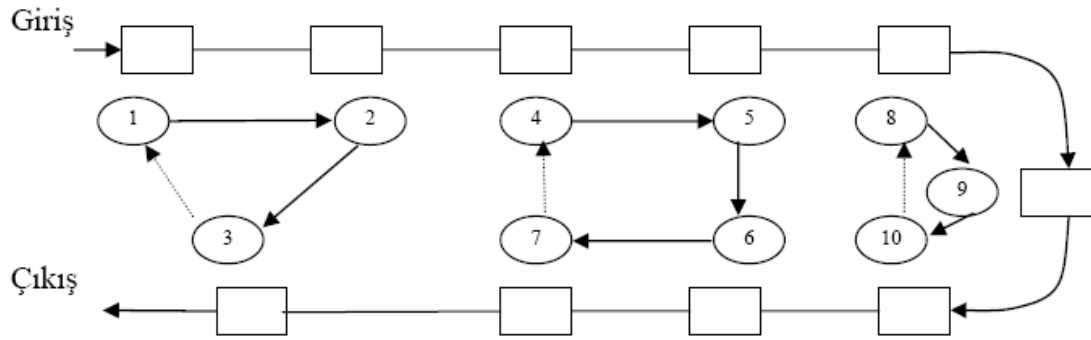
Montaj hattı üretim sistemlerinin ilk uygulaması, düz hatlar olarak başlamıştır. Düz hatlarda iş istasyonları birbiri ardına sıralanır. Ürün, ilk istasyonda montaj işlemine başlar ve son istasyonda tamamlanmış olarak hattı terk eder. Şekil 2.2’de düz montaj hattı gösterilmektedir. Düz hatlarda iş akışı daha kolay ve hızlı olmakla beraber çok yer kaplama gibi bir dezavantajı bulunmaktadır.



Şekil 2.2 Düz Montaj Hatları

U-tipi Hatlar

Geleneksel hat dengeleme probleminde modellenen üretim hattı, yukarıda da bahsedildiği gibi düz olarak organize edilmiştir. Öncelik diyagramındaki ilk görevden başlamak ve diyagram boyunca görevleri istasyonlarda gruplamak suretiyle denge oluşturulmaktadır. Miltenburg ve Wijngaard (1994) yeni bir problem ortaya çıkartmıştır. Bu yeni problemde üretim hatları düz değil U şeklinde düzenlenmiştir. U tipi yerleşimde hattın giriş ve çıkışı aynı pozisyonadadır (Ağpak ve Gökçen 2002). U tipi montaj hatları, ilk kez Toyota fabrikasında uygulanmıştır. Firma farklı özelliklere sahip aynı türden çeşitli otomobiller üretmektedir ve her bir araba için talep, sürekli dalgalanma göstermektedir. Bu nedenle, tesiste bulunan her bir atölyedeki iş yükü sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Talepte meydana gelen değişimlere uyum sağlamak için atölyedeki işçi sayısı esnekliğinin sağlanması, U tipi yerleşim ile mümkün olmuştur. Bu yerleşimde, her bir işçinin sorumlu olduğu iş sırası kolaylıkla genişletilip daraltılabilmektedir. Şekil 2.3’te U tipi hatlar gösterilmektedir. U tipi montaj hatları, Tam Zamanında Üretim (Just In Time) sistemleri için daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 2.3 U Tipi Montaj Hatları (Monden 1998)

U- tipi montaj hatlarının düz montaj hatları ile karşılaştırıldığında pek çok üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlar (Miltenburg ve Wijngaard 1994);

1. U-tipi montaj hattı üzerinde çalışan işçiler arasındaki iletişim düz hatlara göre daha yüksektir. Dolayısıyla oluşabilecek problemler karşısında çalışanların işbirliği daha gelişmiştir.
2. U-tipi hatlarda çalışan işçiler farklı operasyonları yapabilecek şekilde çok fonksiyonlu işçi niteliği kazanmışlardır. Çok fonksiyonlu işçiler, çok sayıda görev hakkında bilgi sahibi oldukları için üretim hakkında bütünsel bir bilgiye sahiptirler.
3. U-tipi montaj hatlarında, talepte meydana gelen değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmek için, çalışan işgücü sayısı kolayca artırılabilir veya azaltılabilir.
4. Belirli bir üretim hacmi için U-tipi montaj hatlarında ihtiyaç duyulan istasyon sayısı, aynı üretim hacmi için düz hatlarda ihtiyaç duyulan istasyon sayısına eşit veya istasyon sayısından daha azdır.

2.3.2. Model sayısına göre montaj hatları

Üretim hattında tek bir model ya da birden fazla ürünün üretilmesine göre montaj hatları; tek modelli, çok modelli ve karışık modelli hatlar olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Tek Modelli Hatlar

Tek tip ürün ya da modelin sürekli olarak ve yüksek miktarlarda üretildiği hatlardır. Ürün çeşitliliğinin artması nedeni ile günümüzde tek modelli montaj hatları ile pek karşılaşılmamaktadır. Ürün grupları arasında çok fazla farklılık olmayan ve partiler arasında hazırlık zamanına göreceli olarak daha az ihtiyaç duyan üretim hatları da tek modelli montaj hatlarına dahil edilmektedir. Örneğin, bilgisayarlarda kullanılan CD ve çeşitli meşrubatların şişelenmesi tek modelli montaj hatları sınıfına girmektedir. Şekil 2.4.a'da tek modelli hatlar gösterilmektedir.

Karışık Modelli Hatlar

Karışık modelli hatlar aynı anda birden fazla benzer tipteki modellerin karışık olarak üretildiği hatlardır. Karışık modelli üretimin en önemli faydası, müşteri isteklerinin anında karşılanması ve bu nedenle bitmiş ürün stoklarının daha az olmasıdır. Karışık modelli hatlarda gözlenen temel olumsuzluk, modellerin özelliğinden kaynaklanan, ayrı iş parçalarının; eşit olmayan iş akışlarına, boş istasyon sürelerine ve daha fazla istasyon sayısına neden olmasıdır. Bu tip problemlerde dengeleme problemi oldukça zordur. Bu nedenle istasyonlarda daha fazla istasyon boş zamanlar oluşmakta ve ara stoklar meydana gelebilmektedir.

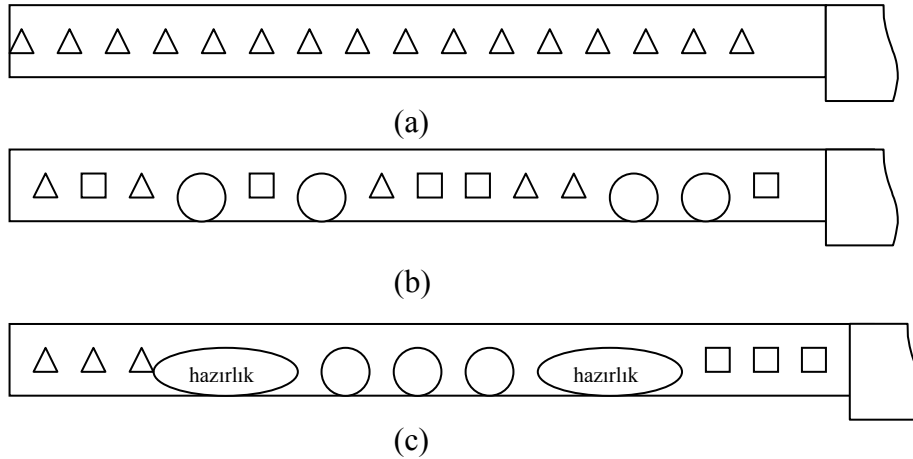
Tek modelli hatlardan farklı olarak karışık modelli hatlarda, kısa dönem model sıralama ve çizelgeleme problemi ortaya çıkmaktadır (Boysen vd 2006b). Burada dengeleme problemiyle aynı anda ortaya çıkan sıralama ve çizelgeleme probleminde, üretilecek modellerin kendi içerisinde sıralarını belirlerken, hattın duruş zamanını, işçilerin verimliliğini, üretim hızını ve her istasyondaki çevrim zamanı kısıtlarını da dikkate almak gerekmektedir. Literatürde, hat dengeleme ve çizelgeleme problemini birlikte ele alan pek çok çalışma bulunmaktadır (Kim vd 2000).

Karışık modelli montaj hatlarının kullanıldığı sektörlere örnek olarak otomotiv, beyaz eşya vb sektörleri verilebilir. Örneğin Mercedes firmasının ürettiği C sınıfı modeli için 2²⁷ farklı spesifikasyon söz konusudur. Bu kadar değişkenliğin söz konusu olduğu modeller için öncelik diyagramlarını oluşturmak ve hattı dengelemek oldukça karmaşık bir problemdir (Röder ve Tibken 2006). Karışık modelli hatlarda dengeleme yapılırken tüm modeller için hazırlanan öncelik diyagramları birleştirilerek birleşik

öncelik diyagramları oluşturulmaktadır ve bu birleşik öncelik diyagramına göre hat dengelemesi yapılmaktadır. 2.4.c’de çok modellenli hatlar gösterilmektedir.

Çok Modelli Hatlar

Çok modellenli hat üzerinde, birden fazla modelin üretimi gerçekleştirilir. Modellerin üretimi partiler halinde yapılır. Yani üretim yapılırken modellerin karıştırılmasına izin verilmez. Çok modellenli hatlarda dengeleme yapılırken, hazırlık zamanı ve hazırlık maliyetlerinin dikkate alınması gerekir. Bu nedenle hattın dengelemesi öncesinde hazırlık maliyetlerini dikkate alarak parti büyüklüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Çok modellenli montaj hatları, eğer yığınlar büyük ise tek modellenli montaj hatlarına, küçük ise karışık modellenli montaj hatlarına benzerlik gösterirler. Şekil 2.4.c’de çok modellenli hatlar gösterilmektedir.



Şekil 2.4 a) Tek modellenli b) Karışık modellenli c) Çok modellenli hatlar (Becker ve Scholl 2006)

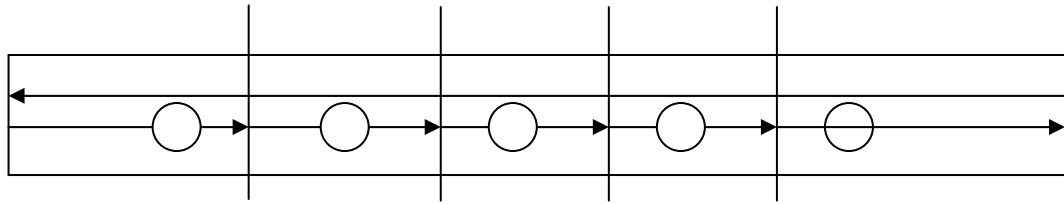
2.3.3. Hattın kontrol yapısına göre montaj hatları

Hattın kontrol yapısına göre montaj hatları gecikmesiz ve gecikmeli hatlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Gecikmesiz Hatlar

Bir montaj hattı tasarımında, gecikmeli veya gecikmesiz bir hat tasarımı arasında bir seçim yapılmalıdır. Gecikmesiz hatta, her istasyona her ürün birimini üretmek için eşit

zaman miktarı verilir. Bu çevrim zamanı sonunda sistem otomatik olarak yeni istasyona geçildiğini varsayar. Şekil 2.5'te gecikmesiz montaj hattı görülmektedir.



Şekil 2.5 Gecikmesiz Montaj Hatları

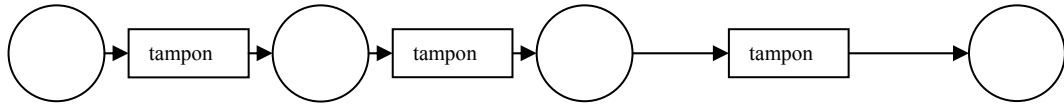
Gecikmesiz hatlarda, belli bir çevrim süresi verilerek tüm istasyonların bu kısıta uyacak şekilde görev zamanlarını ayarlanması istenmektedir. Konveyörler ya da hareketli bantlar gibi malzeme aktarma ekipmanları istasyonları birbirine bağlar. İş parçaları bu bantlar üzerinde bir istasyondan diğerine sabit hızda hareket eder veya işlendikten sonra kesik kesik transfer edilirler. Her iki durumda da her istasyona görevlerini yerine getirmesi için aynı miktarda süre verilir. İş parçası istasyondan geçerken operatör de onunla birlikte hareket eder, işlemi gerçekleştirir ve istasyonun başlangıç noktasına geri döner.

Gerçek hayatta karşımıza çıkan problemler, insan faktöründen dolayı genellikle stokastik işlem zamanlı olduğu için, dengenin tam anlamıyla sağlanabilmesinde gecikmeli hatlar tasarlamak daha doğru olmaktadır. İş parçası bir istasyondan diğerine sevk edilirken, gecikmeleri önlemek her zaman mümkün olmadığından, işlerin vaktinde tamamlanamama olasılığı da dikkate alınmalıdır. Bu konuda literatürde pek çok çalışmaya rastlanmaktadır (Becker ve Scholl 2006).

Gecikmeli Hatlar

Gecikmeli hatlarda, gerekli olduğunda iş istasyonlarının sürelerinin çevrim süresini aşmasına izin verilmektedir. Bu durumda yavaş çalışan iş istasyonlarının önlerinde ara stoklar bulunmaktadır. Şekil 2.6'da gecikmeli hat görülmektedir. Tampon, takip eden istasyonda bir önceki işlem devam ederken iş parçasının tutulduğu yer olarak tanımlanır. Tampon kapasiteleri kısıtlı olduğundan, eğer takip eden tampon tam doluyorsa istasyon tıkanır. Bu durumda istasyon, tamponda alan müsait olana kadar boş bekleyecektir. Başka bir olumsuz durum ise istasyon açlığıdır. Bu durumda da istasyon işleme hazır olduğu halde işlem yapacak parçanın bulunmaması yani tampona parça

girene kadar istasyonun boş beklemesidir. Literatürde, gecikmeli hatlara ilişkin yayınların çoğunda, ideal tampon stok miktarı bulunmaya çalışılmaktadır.



Şekil 2.6 Gecikmeli Montaj Hatları

2.3.4. Kurulum sıklığına göre montaj hatları

Kurulum sıklığı dikkate alındığında MHDP, ilk kez dengeleme ve yeniden dengeleme olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

İlk Kez Dengeleme

Bir montaj hattı ilk kez kurulacağı zaman, üretim sistemine ilişkin kaynaklar ve maliyetler henüz tam olarak belirlenmediği için üretilecek ürüne göre hattın tasarlanması problemi karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda üretilecek ürüne ait iş akışı ve olası öncelik ilişkileri diyagramları çizilerek alternatif üretim seçenekleri değerlendirilir. Kullanılacak farklı makineler ve farklı yeteneklere sahip işçilerin görevlere ve istasyonlara atamalarının oluşturacağı maliyetler hesaplanarak, maliyeti en küçükleyecek montaj hattı kurulur.

Yeniden Dengeleme

Montaj hattı probleminin gerçek hayatta karşımıza çıkış şekli, genelde, kurulum aşamasından ziyade, değişen müşteri talepleri ya da yeni ekipmanların alınması ile yeniden dengelemeye ihtiyaç duyulması şeklindedir (Falkenauer 2005). Yeniden dengeleme durumu yeni makine, yeni işgücü, yeni ürün ve yeni metot olmak üzere temelde dört sebepten ortaya çıkmaktadır. Yeniden dengeleme yapılırken, üretim programında meydana gelecek değişiklikler örneğin, vardiya değişimleri dikkate alınır. Artık montaj hattı kurulmuş olduğu için, burada amaç istasyon sayısını en küçüklemekten ziyade, çevrim zamanını en küçükleyerek üretim miktarını ve satışları arttırmaktır. Bunu yaparken hedef, istasyonlara iş yükünü mümkün olduğunca eşit dağıtmaktır. Bir makinenin bir istasyona yerleştirildikten sonra tekrar yerinin değiştirilmesi özellikle ağır sanayide pek mümkün olmamakla birlikte bir maliyet

oluşturmaktadır. Makinelerin istasyonlara etkin bir şekilde yerleşimi yapılabilmesi için alan kısıtı da dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yeni bir makinenin alınması durumunda hattın dengelenmesi yapılırken, makinenin alım maliyeti ve hatta yapacağı iyileştirmenin getirisi birlikte değerlendirilmeli ve ona göre karar verilmelidir. Bu koşulları dikkate alan çalışmalara son yıllarda daha çok rastlanmaktadır.

2.3.5. Otomasyon seviyesine göre montaj hatları

Otomasyon seviyesine göre montaj hatları, manuel hatlar ve otomatik hatlar olarak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Manuel Hatlar

Günümüzde gelişen teknolojinin etkisiyle otomasyon ve robotların montaj hatlarında kullanılması artsa da, hala pek çok işletme temelde işgücüne dayalı montaj hatlarını kullanmaktadır. Manuel hatlar, her istasyonda toplam iş yükünün bir bölümünün bir veya daha çok işçi tarafından yapıldığı hatlardır. Manuel hatlar özellikle kırılğan ya da hassas parça üreten firmalar tarafından tercih edilmektedir (Abdel-Malek ve Boucher 1985). Ayrıca, işgücü maliyetlerinin makine maliyetlerine göre daha düşük olduğu durumlarda, manuel hatlar tercih edilmektedir.

Manuel hatlarda montaj hattı dengeleme çalışmasına giderken dikkat edilmesi gereken temel husus, görev zamanlarının işgücü performansındaki değişimleri dikkate alarak stokastik olmasıdır. Motivasyon, iş çevresindeki koşullar, fiziksel ya da zihinsel stres çalışanın performansını etkileyebilmekte, aynı işi yapma zamanı değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle sık tekrar eden işler, çalışanda bir bıkkınlık hissi uyandırmakta, bu da manuel hatlar için büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Manuel hatlarda işgücünü etkileyen diğer bir faktör de çalışanın deneyimidir. Çalışanlar zaman içinde deneyimlerini arttırarak, işin yapılışında pratiklik kazanmaktadır. Böylece, görev zamanları azalacaktır. Burada, hat dengelemeye giderken öğrenme etkisini de dikkate alarak, görev zamanları dinamik kabul edilen çalışmalar yapılmalıdır.

Manuel hatlarda dengeleme yapılırken, hattın yerleşim şekli önem taşımaktadır. Çünkü istasyonlar arasında yardımlaşmaya izin veren U tipi hatlarda, işçilerin diğer

görevleri de yerine getirebilecek kalifiye işçiler olması ve istasyonların mümkün olduğunca birbirine yakın olması istenmekte, bu da problemi daha karmaşık hale getirmektedir. Son zamanlarda uygulamada, manuel hatlar ile U tipi hatlar birlikte kullanılmaktadır. Toyota'da uygulanan üretim sistemi, bu tip hatlara örnek verilebilir (Monden 1998).

Otomatik Hatlar

İstasyonlardaki işler ve istasyonlar arası transferler otomatik olarak yapılmaktadır. İstasyonlar arası iş transferinin mekanik ve mekanik olmayan hatlar şeklinde iki yolu vardır. Mekanik olmayan hatlarda parçalar bir istasyondan diğerine elle geçerler. Diğerlerinde ise hareketli konveyörler ve benzeri malzeme aktarma sistemleri kullanılmaktadır.

Çalışma ortamının, çalışanda ciddi sağlık sorunlarına yol açabileceği iş çevreleri için tasarlanan otomasyon hatları, önceleri otomotiv sektöründe kullanılmıştır. Daha sonra pek çok ürünün üretiminde otomatik hatlar kullanılmıştır. Özellikle işgücü maliyetinin yüksek olduğu durumlarda iş sahipleri, tesis tasarım aşamasında otomasyon hatlarını ve robotları kullanmayı tercih etmektedir. Otomasyonun montaj hattı dengeleme problemine sağladığı en büyük avantaj, görev zamanlarındaki değişkenliğin çok az olmasıdır. Bu nedenle manuel hatlarda yaşanan gecikme ve boş bekleme zamanları, bu hatlarda daha az oluşmaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Giriş

MHDP, matematiksel olarak ilk kez 1955 yılında Salverson tarafından ele alınmış ve bu tarihten günümüze kadar bu konu üzerinde yüzlerce çalışma yapılmıştır. Çalışmalar bugün de hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmalarda problem, farklı açılardan ele alınmış ve çok sayıda çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

Bu bölümde, çok geniş bir literatüre sahip olan montaj hattı dengeleme problemleri için genel bir literatür incelemesi verilerek, daha çok bu tez çalışmasının konusunu oluşturan bulanık mantık, ergonomi ve MHDP'ni birlikte ele alan çalışmalardan bahsedilecektir.

MHDP üzerinde yapılan araştırmaları çözüm yöntemine göre genel olarak iki ana başlık altında incelenebilir: en iyi çözümü veren yöntemler ve sezgisel yöntemler. Montaj hattı dengeleme problemi çözümü zor olan problemler sınıfında yer almaktadır. Bir hat üzerinde yapılacak görev sayısı arttıkça problemin çözümü de karmaşıklaşmaktadır. Bu nedenle problemin çözümü için geliştirilen tamsayılı programlama, dinamik programlama vb gibi en iyi çözümü veren yöntemler problemin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır. Sezgisel yöntemler kabul edilebilir çözümleri makul süreler içinde bulabilmekte, bu nedenle MHDP çözümü için çoğu zaman tercih edilmektedir. Montaj hattı dengelemesi yapılırken pek çok unsurun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Fakat hem en iyi çözümü veren yöntemlerde hem de sezgisel yöntemlerde pek çok varsayım yapılarak kurulan modelin gerçeği yansıtmaya derecesi azaltılmaktadır. Bu nedenle, gerçek hayat problemlerinde bu iki yöntemin sunduğu çözümlerden yeterince fayda sağlanamamaktadır. Bu nedenle karmaşık sistemleri modellemekte çok sıkça başvuru benzetim teknikleri, MHDP'de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bahsedilen bu iki yöntem kullanılarak yapılan çalışmalar izleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi montaj hattı dengeleme problemi oldukça karmaşık bir problemdir. Bu nedenle, literatürde yer alan pek çok çalışmada bazı unsurlar göz ardı edilerek sadece belli bir çevrim süresini aşmayacak şekilde istasyon veya çevrim süresinin en küçükleyecek şekilde hat dengelemesi yapılmaktadır. Fakat uygulamada iş

istasyonlarına atama yapılırken işin zorluk derecesi, riski vb. ergonomik unsurlar da göz önünde bulundurulmaktadır. Bu çalışmada ergonomik kısıtlar modele ilave edilerek problemin uygulanabilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. Geliştirilen modelde görevlerin hem çevrim süresini hem de belirlenen risk, zorluk, monotonluk düzeylerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanması amaçlanmaktadır. Yapılan literatür incelemesinde bu konuda yapılan bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bölüm 3.5'te montaj hattı dengeleme probleminde ergonomik faktörleri dikkate alarak yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir.

Bir göreve ait risk seviyesi, zorluk derecesi ve monotonluk düzeyi gibi kavramlar belli ölçülerde bulanıklık içermektedir. Bu nedenle bu kısıtların modele dahil edilebilmesi için problemin modellenmesinde bulanık doğrusal programlama yöntemi kullanılmıştır. Bulanık doğrusal programlamanın MHDP uygulamasına ilişkin yapılan çalışmalar Bölüm 3.4'te verilmiştir.

3.2. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması

Literatürde, MHDP ile ilgili olarak yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları, ele alınan problemin yapısına ve çözüm yaklaşımlarına göre değişik şekillerde sınıflandırmak mümkündür.

3.2.1. Amaç sayısına göre MHDP

Montaj hattı dengelemesi yapılırken bir veya birden fazla performans ölçütü eniyilenmeye çalışılabilir. Buna göre MHDP, tek veya çok amaçlı olarak iki sınıfta toplanmaktadır. MHDP'de kullanılan amaçlar çevrim süresini en küçükmek, istasyon sayısını en küçükmek, dengeleme kaybını en küçükmek vb olabilir. Tek amaçlı MHDP'de genellikle çevrim süresi verildiğinde iş istasyonu sayısının enküçüklenmesi veya istasyon sayısı verildiğinde çevrim süresinin enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Birinci problem literatürde MHDP Tip-1, ikincisi ise MHDP Tip-2 problemi olarak adlandırılmaktadır.

3.2.2. İşlem sürelerine göre MHDP

MHDP, işlem zamanlarının kesin olarak bilinmesine bağlı olarak üç ana başlık altında incelenmektedir: işlem zamanlarının belirli olması (Deterministik MHDP), işlem

zamanlarının değişken olması (Stokastik MHDP) ve işlem sürelerinin belirsiz olması (Bulanık MHDP).

Deterministik MHDP

Deterministik MHDP’de, görev zamanlarının bilindiği ve bu zamanların sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım, montaj hattında makinelerin ve robotların kullanıldığı hatlarda geçerli olmakla birlikte insanların çalıştığı hatlarda çok geçerli olmamaktadır (Çakır 2006).

Stokastik MHDP

Stokastik MHDP’de ise, görev zamanlarının kesin olarak bilinmediği varsayılmakta fakat görev zamanları belirli bir olasılık dağılımı ile modellenenmektedir. Görev zamanındaki değişiklik, insandan ve/veya süreçten kaynaklanmaktadır. Yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, hatalı montaj, araç/gereç bozulmaları değişkenliğin temel sebeplerini oluşturmaktadır. Bu durum, istasyonlara atanan işlerin aldıkları toplam zamanın, çevrim zamanını aşmasına ve dolayısıyla bazı görevlerin bitirilememesine, bazı istasyonların da boş kalmasına sebep olmaktadır (Erel 1991).

Bulanık MHDP

Bulanık MHDP, görev zamanlarına ilişkin sabit ya da olasılık dağılımları kullanılarak sürelerin belirlenemediği durumlarda, görev zamanlarının bulanık sayılar kullanılarak ifade edildiği problemlerdir. Bulanık zamanlı montaj hattı dengeleme problemleri genellikle hattın ilk tasarımı aşamasında ortaya çıkmaktadır. Örneğin, hat tasarlanırken, görev zamanlarına ilişkin veriler elde mevcut değilse, tecrübeye dayanarak ve sezgisel olarak görev zamanları belirlenebilir. Bu aşamada bulanık sayıların kullanılması daha doğru olacaktır.

3.2.3. Ürün/Model sayısına göre MHDP

Akış hatlarının tiplerine bağlı olarak montaj hatlarında bir ürün, bir ürünün birden çok modeli veya birden çok benzer ürün üretilebilir. Buna göre MHDP, tek modelli, çok modelli ve karışık modelli MHDP sınıflandırılmaktadır.

3.2.4. Paralel MHDP

Geleneksel montaj hattında temel varsayım, hattın seri olmasıdır. Paralellik bir işin birden çok istasyonda yapılmasına izin verir. Böylece en uzun iş zamanının azalmasına yardımcı olur, çünkü iş birden çok istasyonda yapılabilmektedir. Böylece üretim oranı da yükselecektir (Çakır 2006).

3.2.5. İstasyondaki işçi sayısına göre MHDP

Bir istasyona zorunlu nedenlerden dolayı birden fazla işçi atanabilir. Örneğin otobüs kamyon gibi büyük bir parçaların montajında bir istasyonda aracın her iki yanında bir işçinin belli bir görevi aynı anda icra etmesi gerekebilir. Bu durumda dengeleme yapılırken hem tasarım hem de maliyetlerin dikkate alınması gerekmektedir.

3.2.6. Kaynak kısıtlı MHDP

Montaj hatları, oldukça pahalı yatırımlar gereken bir üretim biçimidir. Bu nedenle tasarım aşamasında verilecek kararlar büyük önem taşımaktadır. Bu noktada makine seçimi, montaj hattının yerleşimi gibi konular dengeleme problemi ile eş zamanlı olarak yapılmalıdır.

3.2.7. Basit ve genel MHDP

MHDP, yukarıda açıklandığı gibi pek çok sınıfa ayrılmaktadır ve her sınıf için problemin sahip olduğu varsayımlar ve kısıtlar farklılık göstermektedir. MHDP'nin en basit hali, tek modelli ve deterministik görev zamanlı düz montaj hattı dengeleme problemidir. Bu probleme basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP) denmektedir. BMHDP için temel varsayımlar şunlardır (Gökçen 1994):

- Montaj hattında tek bir ürünün montajı büyük miktarlarda gerçekleştirilir.
- Görev zamanları deterministiktir.
- Problemin öncelik diyagramı bilinmektedir.
- Bir görev iki ya da daha fazla iş istasyonu arasında bölüşdürülemez.
- Bir görev kendisinden önce gelen görevler tamamlanmadan başlayamaz.

BMHDP'nin versiyonları şunlardır:

Tablo 3.1 BMHDP'nin Sınıflandırılması (Baybars 1986)

| BMHDP Versiyonları | | Çevrim Zamanı (C) | |
|-----------------------|------------|---------------------|------------|
| | | Verilmiş | En Küçükle |
| İstasyon Sayısı (m) | Verilmiş | BMHDP-F | BMHDP-2 |
| | En Küçükle | BMHDP-1 | BMHDP-E |

BMHDP-F: Çevrim zamanı ve istasyon sayısı verilir, uygunluk kontrolü yapılır.

BMHDP-1: Çevrim zamanı verilir, istasyon sayısı enküçüklenir.

BMHDP-2: İstasyon sayısı verilir, çevrim zamanı enküçüklenir.

BMHDP-E: Çevrim zamanı ve istasyon sayısı birer değişken iken, hat etkinliği en büyüklenir.

Literatürde yer alan pek çok çalışmada BMHDP ele alınmıştır. BMHDP'de tüm parametreler kesin olarak bilinmektedir ve yukarıdaki varsayımlar sağlanmaktadır. Yukarıda belirtilen koşullardan herhangi biri sağlanmaz ise bu durumda bu problem genel montaj hattı dengeleme problemi (GMHDP) olarak tanımlanmaktadır.

3.3. MHDP'ne Çözüm Yaklaşımları

MHDP, çözümü zor olan problemler arasında yer almaktadır. Bu nedenle problemin çözümünde en iyi çözümü bulan doğrusal programlama, tamsayı programlama, dinamik programlama gibi yöntemler yerine daha çok en iyi çözüme yakın sonuçlar veren sezgisel yöntemlere veya benzetim yöntemlerine başvurulmaktadır.

MHDP ilk kez 1955 yılında Salveson, istasyonlardaki toplam boş zamanı en küçükleyecek şekilde tamsayı programlama modelini geliştirmiştir. Daha sonra pek çok araştırmacı problemi farklı açılardan ele alarak, tek modellenli montaj hattı dengeleme problemleri için çok sayıda tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir. Patterson ve Albracht (1975), istasyon sayısını enküçüklediği MHD problemi için 0-1 tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Gökçen ve Erel (1997), çok modellenli montaj hatları için hedef programlama tekniğinden yararlanmışlardır. Pinto vd (1975), görevlerin paralel olduğu durumları içeren dengeleme problemleri için bir tamsayı programlama modeli önermişlerdir (Becker ve Scholl 2006).

MHDP'nin çözümünde kullanılan bir diğer yöntem ise dinamik programlamadır. Carraway (1989), stokastik durumlar için dinamik programlamayı kullanmıştır.

Son yıllarda dal sınır yöntemine dayalı farklı algoritmalar da geliştirilmiştir. Bunlardan en çok tercih edilenler, Johnson (1988) tarafından geliştirilen FABLE algoritması ve Scholl ve Klein (1997) tarafından geliştirilen SALOME isimli algoritmalarıdır. SALOME, literatürdeki test problemleri çözülerek karşılaştırmalar yapıldığından pek çok algoritmaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Scholl ve Klein 1999). Bu yöntemler, matematiksel programlama yöntemleri olarak da anılırlar ve en uygun sonucu verirler. Bowman (1960) tarafından geliştirilen tamsayılı programlamayı ve Talbot ve Patterson (1984) tarafından geliştirilen 0-1 tamsayılı programlamayı kullanan yöntemler, örnek olarak verilebilir. Bu yöntemlerde amaç fonksiyonu ve kısıtlar bulunur.

Montaj hattı dengeleme probleminde görev sayısı arttığında probleme çözüm bulmak zorlaşmaktadır. Bu nedenle montaj hattı dengeleme problemlerine sezgisel yöntemler daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

MHDP için çok sayıda sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bu sezgisel yöntemlerin çoğu Tip-1 problemler için en iyi çözümü araştırmaktadır. MHDP için geliştirilen sezgisel yöntemler, çözüm kurucu ve çözüm iyileştirici sezgisel yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Çözüm kurucu sezgisel yöntemlerde, çözüme ulaşmak için kurallar dizisi belirlenir ve bu kurallara göre problem çözülür. Çözüm iyileştirici sezgisel yöntemlerde, bir başlangıç çözümden başlanarak belirlenen kurallar ile daha iyi bir çözüm elde edilmeye çalışılır. En son bulunan çözümden daha iyi bir çözüm elde edilemiyorsa, en son bulunan çözüm en iyi çözüm olarak kabul edilir.

Literatürde yer alan belli başlı çözüm kurucu sezgisel yaklaşımlar şöyledir (Çılkır 2000):

- PAST (Pozisyonel ağırlıklı sıralama yöntemi) Helgeson ve Birnie (1961)
- Kilbridge ve Wester'in (1961) sezgisel yöntemi
- Moodie ve Young'ın (1965) sezgisel yöntemi
- COMSOAL Yöntemi, Arcus (1966)

İkinci grupta yer alan çözüm iyileştirici sezgisel yöntemler en iyi çözümü garanti etmezler ancak son yıllarda çözüm iyileştirici sezgisel yaklaşımlar sınıfında bulunan yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Literatürde yer alan belli başlı çözüm iyileştirici sezgisel yaklaşımlar ise şöyledir:

- Genetik Algoritmalar
- Tabu Arama Algoritması
- Tavlama Benzetimi
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu.

MHDP için genetik algoritma, ilk kez Anderson ve Ferris (1994) tarafından kullanılmış, bu tarihten sonra farklı pek çok araştırmacı MHDP'nin çözümünde genetik algoritmaları kullanmıştır.

Diğer bir meta sezgisel yöntem olan tabu arama algoritması, ilk kez 1994'te Glover tarafından kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için ortaya konulduktan sonra pek çok alanda kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. MHDP için tabu arama algoritmasını ilk kez Scholl ve Voss (1996) tarafından kullanılmıştır. Daha sonra Chiang (1998) MHDP Tip-1 çözümünde tabu arama algoritmasını kullanmıştır. Lapierre vd (2006) ise Chiang'ın tabu arama algoritmasını geliştirerek MHDP için kullanmışlardır.

Montaj hatlarında istasyonlar arasındaki stok düzeylerinin belirlenmesi için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Genelde bu modellerin uygulamaya konulması oldukça zordur. Çünkü akış hatları dinamik sistemler olup, bunların gözlemlenmesi, karmaşık yapılarına uygun bir modelin kurulabilmesi ve bu modelin denenmesi çok masraflı veya olanaksız olabilmektedir. Son yıllarda benzetim tekniği, bu tür hatlarda ara stok düzeylerinin belirlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Matematiksel yöntemlerle en iyi çözüm bulunmasına karşın, bu tür modelleri gerçek sisteme uyarlayabilmek için o kadar çok varsayım ve olasılık hesapları yapılmaktadır ki, bu nedenle benzetim tekniğinin çeşitli seçenekleri deneyerek bulunduğu yaklaşık çözüm, genellikle bu en iyi çözümden çok daha kullanılabilir olmaktadır. Benzetim tekniği, paralel hatların kullanılmasında da yararlanılan bir tekniktir.

Driscoll ve Abdel-Shafi (1985), değişen şartlarda çözümlerin performanslarını değerlendiren simülasyon bağlantılı bir denge metodu geliştirmiştir. Metot, Helgeson ve Birnie tarafından üretilen “sıralı pozisyon ağırlığı” tekniğine benzemektedir. Nkasu ve Leung (1995), stokastik hat dengeleme için Comsoal tabanlı bir çözümleri geliştirmişlerdir. Bu metot önce hat dengeleme probleminin bazı stokastik uygulamalarını simüle etmekte, daha sonra Comsoal’ın modifiye edilmiş bir versiyonunu uygulayarak farklı uygun çözümleri oluşturmakta ve olası sonuçlar arasından en iyisini seçmektedir (Çakır 2006).

3.4. Bulanık Mantık ve MHDP

Bulanık mantık yaklaşımını MHDP’de kullanan çalışmaların sayısı çok azdır. Bu alanda literatürde karşımıza çıkan ilk çalışma, Tsujimura vd (1995) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada işlem zamanları ve çevrim zamanı bulanık olarak düşünölmüş ve üçgensel bulanık sayıların kullanıldığı bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Gen vd (1996) bu çalışmayı detaylandırarak örneklerle desteklemiştir.

Bulanık sayılarla sezgisel yöntemleri kullanan bir diğer çalışma, Celano vd (2000) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada karışık modelli montaj hatlarının bulanık ortamda hem çizelgelenmesi hem de dengelenmesi için genetik algoritma ve tavlama benzetimi tabanlı sezgisel arama araçlarını kullanan yeni bir yöntem önerilmiştir.

Bu zamana kadar yapılan çalışmalar, düz montaj hatlarını incelerken, Ağpak ve Gökçen (2002) makalelerinde, U-tipi hatları inceleyerek, MHDP’nin en iyi çözümlerini bulan bulanık doğrusal programlama yaklaşımını kullanmıştır.

MHDP’ne tamamıyla bulanık mantık yaklaşımını geliştiren bir çalışma Fonseca vd (2005) tarafından yapılmıştır. Bu makalede MHDP için geliştirilen PAST ve COMSOAL algoritmaları bulanık işlem zamanları ve çevrim sürelerinin kullanılması ile bulanıklaştırılmış, örnek problem üzerinde uygulandığında geleneksel yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür.

3.5. Ergonomi ve MHDP

Montaj hatları için yapılan çalışmalar, genellikle teorik olarak ele alındığından, pek çok işletme tarafından tam olarak kullanılamamaktadır. Oysa sanayideki mühendisler ile yapılan bir anket sonucunda, Gunther vd (1983) hat dengelemeye ilişkin oluşturulan

amaç ve kısıtların pek çok gerçek hayat problemi için yetersiz kaldığını göstermiştir. Unutulmamalıdır ki, insan faktörünü dikkate alan ergonomik tasarımlar, hem çalışanlara yönelik çözümler sağlayacak hem de üretkenlikte artışı sağlayacaktır. Fakat montaj hatlarının tasarımında ergonomik faktörleri dikkate alan çalışmaların sayısı yok denecek kadar azdır.

Almanya'nın ve dünyanın lider otomobil üreticilerinden olan Mercedes Benz, yeni üretecekleri motor için düzenlenecek montaj hattında iş koşullarında iyileştirmeye gitmenin hem çalışanlar hem de ekonomik açıdan faydalı olacağına inanarak, Stuttgart'daki Enstitü ile ortak bir çalışmaya girişmiştir. Yeni oluşturulacak sistem, insan odaklı, ergonomik koşulları dikkate alan, bireyler arasındaki fiziksel farklılıkları fark ederek, her iş istasyonu uygun yükseklik ve yerleşimde tasarlamıştır (Bullinger vd 1997). Sonuçta, geliştirilen yeni sistem ile firma, eski sisteme oranla, yeniden işleme oranlarını en düşük seviyeye getirmiş, zaman kayıpları ve gecikmelerde önemli miktarda azalış yaşamıştır.

Bao vd (1997), bu konuda yine uygulamaya yönelik bir araştırma yapmışlardır. Bu makalede, Çin ve İsviçre'deki montaj hatlarını hem ergonomik açıdan hem de üretim mühendisi gözüyle dengeleme açısından incelemiş, sonuçta, İsviçre'deki iş istasyonlarının tasarımının daha ergonomik olmakla birlikte aynı zamanda daha iyi dengelenmiş, boş zamanları en aza indirgenmiş olduğunu fark etmişlerdir. Buradan hareketle, ergonomik faktörleri dikkate alarak tasarlanan iş istasyonlarında üretkenliğin de yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Montaj Hattı Dengeleme Problemi ile ergonomiyi birlikte ele alan çalışmalara literatürde 2000'li yıllardan sonra daha sık rastlanmaktadır. İş istasyonlarının ergonomik olarak tasarlanmasının ürün kalitesi ve çalışanlar üzerindeki etkisini inceleyen yayınlarında, Lin vd (2001), ergonomik değişkenlerin kalite üzerinde doğrudan etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Yeow ve Sen (2006), elektronik sanayide kullanılan manüel montaj hatlarda, ergonomik iyileştirmeler yapılarak, üretkenlik ve kalitede artış, maliyetlerde düşüş sağlanabileceğini üretim hattında çeşitli deneme ve gözlemler yaparak göstermişlerdir. Uygulama sonucunda işletme yıllık gelirinde 4,5 milyon dolar gelir elde etmiş, bu yöntemin elektronik sanayindeki diğer işletmeler için uygulanılabileceği vurgulanmıştır.

4. BULANIK MANTIK VE BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA

Çalışmanın bu bölümünde bulanık mantık yaklaşımından bahsedildikten sonra, bulanık doğrusal programlama tekniği hakkında bilgiler verilecektir. Ayrıca, bu tez çalışmasında bulanık doğrusal programlama problemlerinin çözümünde Zimmermann tarafından önerilen yaklaşım, ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

4.1. Bulanık Mantık

Mühendislikte ve diğer bilim dallarında olaylar ve sistemler, kesin matematiksel modeller kullanılarak tanımlanmaktadır. Oluşturulan bu modellerin kullanılması ile olayın veya sistemin gelecekte alacağı durum veya göstereceği davranış biçimi tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Oysa gerçek dünya problemlerini modellemede kesin veriler yetersiz veya eksik kalmaktadır. Bu durum karşısında geleneksel olarak olasılık dağılımlarından yararlanılmıştır. Olasılık kuramı, sınırları belirli olaylarda kullanmak için iyi bir yaklaşımdır. Örneğin bir para atıldığında yazı ya da tura gelecektir. Örneklem uzayının sınırları kesin ve bellidir. Oysa bir insanın aç ya da tok olması arasında kesin bir çizgi yoktur. Bu durumda bulanıklık kavramını kullanmak çok daha akılcıdır. Ayrıca, olasılık kuramında yer alan belirsizlik, olayların gerçekleşmesi veya gerçekleşmemesi ile ilgilidir. Bulanıklık ise, bir olayın belirsizliğini açıklamaya çalışmaktadır. Yani, olayların gerçekleşip gerçekleşmeme ile ilgilenmemektedir (Türe 2006). Lotfi A. Zadeh (1965), “bulanık kümeler” kavramını ortaya atarak stokastik kavramlara başvurmadan belirsiz veriyi modelleme imkânı sağlamıştır. Ayrıca, belirsizliğin giderilmesi için kullanılan bulanık kümeler, olasılık teorisine oranla çok daha az maliyetli de olmaktadır.

Bulanık mantık, bir sistemin girdi-çıkı ilişkilerini açıklamak için insana dayalı dili kullanan tahmini sebep tekniğidir. Başka bir deyişle, insanların kesin olmayan ifadelerle düşünme yeteneğiyle örtüşen mantık sistemidir (Özkan 2003). Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanan bir matematiksel disiplindir. Doğruluğun ya da yanlışlığın derecesini konu almaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak, doğru ve yanlış arasına, kısmen doğru ya da kısmen yanlış kavramları da eklenerek spektrum genişletilmiştir (Ertuğrul 1996).

Bulanık mantığın sistemi şu şekilde işler: Bir ifade tamamen yanlış ise klasik mantıkta olduğu gibi 0 değerindedir ve eğer tamamen doğru ise 1 değerindedir. Bunların dışında tüm ifadeler 0'dan büyük, 1'den küçük reel değerler alırlar. Yani değeri 0,25 olan bir ifadenin anlamı %25 doğru, %75 yanlış demektir.

Görüldüğü gibi bulanık mantık, kişiye karar için geniş bir yelpaze sunmakta ve karar verme işleminin daha esnek bir yapıda gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bulanık mantığın temel prensipleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Cobb 2002):

1. Bulanık mantıkta, kesin düşünce, yaklaşık düşüncenin sınırlandırılmış bir şekli olarak görülür.
2. Bulanık mantık yaklaşımına göre; her şey bir bütünün belli bir derecede parçasıdır.
3. Her türlü sistem bulanıklaştırılabilir.
4. Bulanık mantıkta bilgi, esnekliği veya değişkenler üzerinde etkili olan bulanık kısıtlayıcıları tanımlar.
5. Sonuç çıkarma, bulanık kısıtlayıcıların çözüm prosesidir.

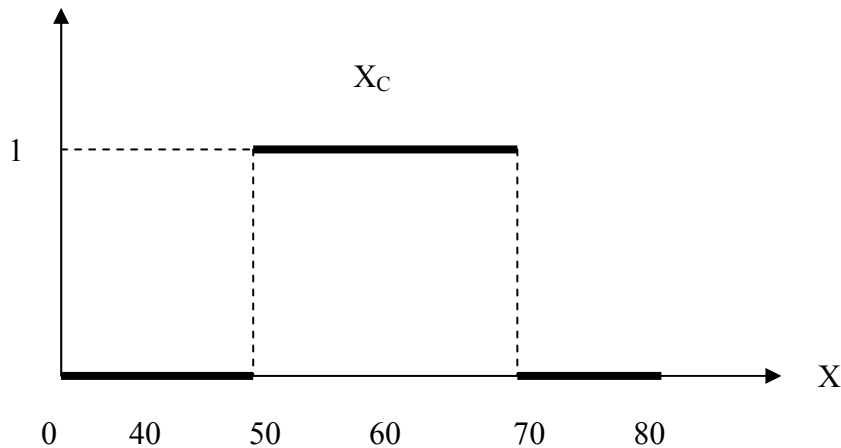
Geleneksel mantıkla bulanık mantık arasındaki farklar özetle açıklanacak olursa (Ural 2006):

1. Bulanık mantıkta mutlak doğru ve mutlak yanlış gibi kesin ifadeler yer almaz, geleneksel mantık ise; mutlak doğru ve mutlak yanlışlara dayanır. Yani, mutlak doğru ve mutlak yanlış arasındaki geçişlere izin vermez.
2. Bulanık mantık, karar verme sürecini kolaylaştıran esnek bir yapıya sahiptir. Bu anlamda insan düşünce sistemiyle örtüşür. Geleneksel mantık ise; katı sınırlara sahip olan bir sistemdir. Karmaşık bir yapıda olan insan düşünce sistemiyle örtüşmez.
3. Geleneksel mantık birçok gerçek hayat problemlerine çözüm getiremeyebilir, ancak bulanık mantık hayatın her alanında kullanıma uygundur.
4. Bulanık mantıkta belirsiz ifadeler matematiksel değişkenlere dönüştürülebilirken geleneksel mantıkta belirsizliğe yer yoktur.

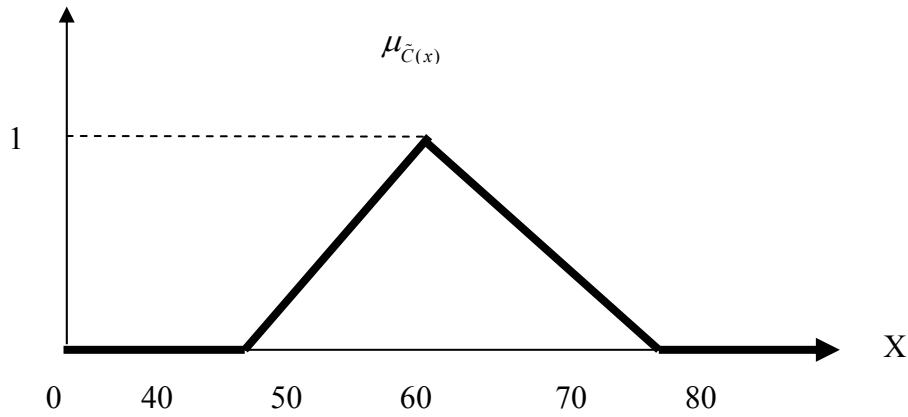
4.1.1. Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları

Zadeh tarafından 1965 yılında belirsizlik durumlarında en uygun yöntemin esasının küme elemanlarına değişik üyelik derecelerinin verilmesi olacağı belirtilmiştir. Örneğin, Aristo mantığına göre insanlar ya uzundurlar ya da değildirler. Küme elemanlarının üyelikleri “kesinlikle o kümeye ait olanlar” ve “kesinlikle o kümeye ait olmayanlar” olarak ifade edilmekte, üye olma ile olmama arasında kesin bir sınır bulunmaktadır. Buna karşılık uzun boylu olmanın da çeşitli dereceleri vardır. Bir uzun boylu, gerçek uzun boylu olarak esas alınırsa bu boyun altında ve üstündeki boylar o kadar kuvvetli olmasa bile yine de uzun boylular kümesine girmektedir (Zadeh 1975). Aristo mantığına dayanan klasik küme yaklaşımına göre, bir kümeye giren öğelerin bu kümeye ait olmaları durumunda üyelik dereceleri 1, ait olmayanların ise 0’a eşittir. Oysa bulanık küme yaklaşımında bulanık kümelere bulunan öğeler 0 ile 1 arasında değerler alabilmektedir. Bulanık mantık teorisinin temelinde, üyelik fonksiyonu bulunmaktadır ve bütün işlemlerde üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.

Bu durum bir örnekle daha iyi açıklanabilir. Örneğin, kiloları 50 ile 70 arasında olan insanlar diye bir C kümesi tanımlansın. Klasik küme yaklaşımına göre, 55 kilogram olan bir insanın bu kümeye olan üyelik fonksiyonu, bu değer 50 ile 70 arasında olduğu için 1 değerini alacaktır. $X_C(55) = 1$ olacaktır. Kilogramı 49 olan bir kişinin üyelik fonksiyonu $X_C(49) = 0$ olacaktır. Yine aynı şekilde kilosunu 71 olan bir kişinin üyelik fonksiyonu $X_C(71) = 0$ olacaktır. Bu durum, Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bulanık mantık teorisinde ise buna benzer bir \tilde{C} kümesinin üyelik fonksiyonu ise Şekil 4.2’deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 4.1 C Kümesinin üyelik fonksiyonu



Şekil 4.2 \tilde{C} kümesinin üyelik fonksiyonu

Yukarıda anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi bulanık mantık yaklaşımının temelinde üyelik fonksiyonları bulunmakta ve tüm işlemler bu fonksiyonları kullanarak yapılmaktadır.

Bu şekilde tanımlanan bulanık kümelerin aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir (Şen 2001):

1. Bulanık küme normal olmalıdır yani bulanık kümenin en az bir elemanının üyelik fonksiyonu 1'e eşit olmalıdır.
2. Bulanık küme monoton olmalıdır yani üyelik fonksiyonu 1'e eşit olan öğeye yakın sağda ve soldaki öğelerin üyelik fonksiyonları da 1'e yakın olmalıdır.
3. Bulanık küme simetrik olmalıdır yani üyelik fonksiyonu 1'e eşit olan öğeden sağa veya sola eşit mesafede hareket edildiği zaman üyelik fonksiyonları birbirine eşit olmalıdır.

4.1.2. Bulanık kümelerde temel kavramlar

Bulanık kümelere ait bazı tanımlar aşağıda verilmiştir (Güner 2005):

Tanım 1: X boş olmayan bir küme olsun. X 'deki bir bulanık A kümesi üyelik fonksiyonu $A: X \rightarrow [0,1]$ ile özelleştirilmiştir. $\forall x \in X$ için; x 'in üyelik fonksiyonu $A(x)$ olarak belirtilmiştir (μ_A olarak da gösterilebilir).

X evreni kesin ve sınırlı olduğu zaman A kümesi sembolik olarak 4.1'deki gibi gösterilir:

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\} = \left\{ \sum_{i=x_i} \mu_A(x_i) \right\} \quad i = (1, \dots, n) \dots \dots \dots (4.1)$$

X evreni sürekli ve sınırsız ise A kümesi 4.2 deki gibi gösterilir:

$$A : \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \dots \dots \dots (4.2)$$

Tanım 2. Bulanık kümenin yüksekliği: A bulanık kümesinin en büyük üyelik derecesine o kümenin yüksekliği denir ve 4.3'teki eşitlikten elde edilir:

$$h(A) = \sup_{x \in X} A(x) \dots \dots \dots (4.3)$$

Tanım 3 α -kesiti: X de tanımlı bir A bulanık kümesi ve $\alpha \in [0,1]$ verilsin. α -kesiti, ${}^\alpha A$, ve güçlü α -kesit, ${}^{\alpha+} A$, Formül 4.4'teki gibi tanımlanmış belirli kümelerdir:

$$\begin{aligned} {}^\alpha A &= \{ x \mid A(x) \geq \alpha \} \\ {}^{\alpha+} A &= \{ x \mid A(x) > \alpha \} \end{aligned} \dots \dots \dots (4.4)$$

4.1.3. Bulanık kümelerde temel işlemler

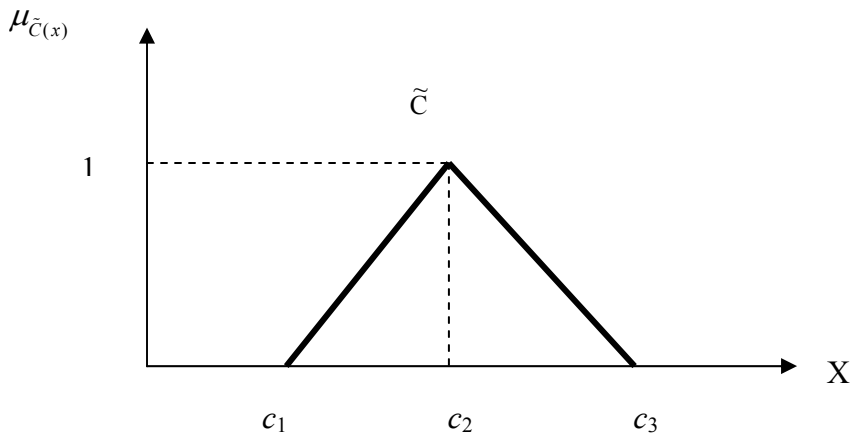
Bulanık kümelerde kullanılan “yaklaşık 5”, “aşağı yukarı 9”, “3'ten büyük ve yaklaşık” gibi ifadelerin hepsi bulanık sayılara karşılık gelir. Bu sayılardan her biri de bulanık alt kümeye karşı gelir. Fakat bu bulanık sayılarla aritmetik işlemlerin yapılması mümkün değildir. Bulanık sayılarla matematiksel işlemlerin yapılabilmesi için bazı kısıtlamaların tanımlanması gereklidir. Yukarıda da anlatıldığı gibi bir bulanık sayının tanımlı olabilmesi için normal, dış bükey, sınırlı destek ve her üyelik derecesi kesiminde kapalı ve sonlu bir aralığının bulunması gerekir (Şen 2001).

Pratik uygulamalarda genellikle üçgen ve yamuk olmak üzere iki bulanık sayı kullanılır. Bir üçgensel bulanık sayı olan \tilde{C} ise (c_1, c_2, c_3) şeklinde parametrelerle ifade edilebilir.

Üçgensel bulanık sayı \tilde{C} 'nin üyelik fonksiyonu denklem 4.5'teki gibi tanımlanabilir:

$$\mu_{\tilde{C}(x)} = \begin{cases} 0, & x < c_1 \\ \frac{x - c_1}{c_2 - c_1}, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \frac{c_3 - x}{c_3 - c_2}, & c_2 \leq x \leq c_3 \\ 0, & x > c_3 \end{cases} \dots\dots\dots(4.5)$$

Üçgensel bulanık sayıların üyelik fonksiyonu Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Üçgensel bir bulanık sayının üyelik fonksiyonu

\tilde{A} ve \tilde{B} denklem 4.7a ve denklem 4.7b'de belirtildiği gibi iki üçgensel bulanık sayı olsun. Bu iki üçgensel bulanık sayı arasındaki bazı aritmetik işlemler (toplama, çıkarma, bölme ve çarpma) aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3) \dots\dots\dots(4.7a)$$

$$\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3) \dots\dots\dots(4.7b)$$

Toplama:

Denklem 4.8a, iki bulanık sayının toplama işlemini, denklem 4.8b ise k sabit sayısı ile bulanık bir sayının toplanmasını göstermektedir.

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \oplus (b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \dots\dots\dots(4.8a)$$

$$k + (a_1, a_2, a_3) = (k + a_1, k + a_2, k + a_3) \dots\dots\dots(4.8b)$$

Çıkarma:

Denklem 4.9a, iki bulanık sayının çıkarma işlemini, denklem 4.8b ise k sabit sayısı ile bulanık bir sayı arasındaki çıkarma işlemini göstermektedir.

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3) \dots\dots\dots(4.9a)$$

$$k - (a_1, a_2, a_3) = (k - a_1, k - a_2, k - a_3) \dots\dots\dots(4.9b)$$

Çarpma:

Denklem 4.10a, iki bulanık sayının çarpma işlemini, denklem 4.10b ise k sabit sayısı ile bulanık bir sayı arasındaki çarpma işlemini göstermektedir.

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \otimes (b_1, b_2, b_3) = (a_1 \times b_1, a_2 \times b_2, a_3 \times b_3) \dots\dots\dots(4.10a)$$

$$k \times (a_1, a_2, a_3) = (ka_1, ka_2, ka_3) \dots\dots\dots(4.10b)$$

Bölme

Denklem 4.11a, iki bulanık sayının bölme işlemini, denklem 4.11b ise k sabit sayısı ile bulanık bir sayı arasındaki bölme işlemini göstermektedir.

$$\tilde{A} \div \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \div (b_1, b_2, b_3) = (a_1 \div b_1, a_2 \div b_2, a_3 \div b_3) \dots\dots\dots(4.11a)$$

$$k \div (a_1, a_2, a_3) = (k / a_1, k / a_2, k / a_3) \dots\dots\dots(4.11b)$$

İşaret Değiştirme

Son olarak, bulanık bir sayının -1 ile çarpılarak, işaret değiştirmesi denklem 4.12’de verilmiştir.

$$-(a_1, a_2, a_3) = (-a_3, -a_2, -a_1) \dots\dots\dots(4.12)$$

4.2. Bulanık Ortamda Karar Verme

Geleneksel karar verme problemlerinde, konu olan sistemde, kavramda ya da amaçta belirlilik söz konusudur. Karar verirken dikkate aldığımız kriterler ve değerlendirilecek durum kesin ifadelerle tanımlanmaktadır. Fakat bulanık ortamda karar verirken, problemin konusu olan sistem, kavram ya da amaçta kesinlik olmadığından belirsizlik mevcuttur. Belirsizlik ortamında karar problemini çözebilmek için bulanık mantık ve matematiksel işlemlerinden faydalanılır.

Bulanık ortamda karar vermenin özellikleri şöyledir (Kaymak ve Sousa 2003):

- Bulanık ortamda karar verebilmek için, seçeneklerin oluşturduğu evrensel kümede bulanıklığın söz konusu olması gerekli değildir.
- Bulanık ortamda karar verirken, amaca hangi seviyede ulaşılacak istendiği belirli bir şekilde ifade edilmeyebilir. Örneğin, amaç şöyle olabilir: “birim maliyelerimiz 5YKr.’tan az olmalıdır”.

- Karar kriterindeki parametrelerde bulanıklık söz konusu olabilir. Örneğin, kriterlerden biri şöyle olabilir: “birim başına harcanan iş gücü miktarı yaklaşık 1 adam/saat olmalıdır”.

Bulanık bir karar, karar verici tarafından belirlenen hedefler ve kısıtlayıcıların uzlaştırılmasıyla meydana gelen bulanık bir kümedir ve bu küme \tilde{D} veya μ_D üyelik fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Yani, bulanık karar kümesi kısaca “Karar; hedeflerin ve kısıtların kesişimidir.” şeklinde ifade edilebilir (Ural 2006).

4.3. Bulanık Doğrusal Programlama ve Varsayımları

Bulanık ortamda karar vermek bir bulanık optimizasyon problemidir ve bu konuda Bellman ve Zadeh çözüm yaklaşımları geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımın temeli, doğrusal programlamaya dayalı bir matematiksel yöntem olan bulanık doğrusal programlamadır. Bulanık doğrusal programlama (BDP), bulanık mantık ve Doğrusal Programlama (DP)’nin birleşimidir (Hansen 1996). DP’de modeldeki parametrelerin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır ve amaç fonksiyonu, belirli kısıtlar altında en büyük yada en küçük değerini elde etmeye çalışılmaktadır. Ancak, gerçek problemlerde amaç fonksiyonu ve kısıtlardaki parametreler kesin olarak ifade edilemeyebilir. Bu nedenle amaç fonksiyonunu en iyilemek yerine belirli bir tatmin derecesinde probleme yaklaşmak daha doğru olacaktır. BDP ile matematiksel modeldeki amaç fonksiyonu ve kısıtlar üyelik fonksiyonlarından faydalanılarak yumuşatılarak çözülmeye çalışılmaktadır (Türe 2006). Kısaca BDP, bilgi maliyetini azaltmak ve aynı zamanda gerçekçi olmayan modellemeden kaçınmak için kullanılmaktadır (Tuş 2006).

Herhangi bir problemi BDP problemi olarak ele alabilmek ve modelini kurabilmek için birtakım varsayımların sağlanması gerekir. Bu varsayımlardan üçü, klasik DP problemlerini incelemek ve modelini kurabilmek için de sağlanması gereken oransallık, toplanabilirlik ve bölünebilirlik varsayımlarıdır.

BDP probleminin dördüncü varsayımı ise, kesin olmama varsayımdır. Kesin olmama varsayımının sağlanabilmesi için modeldeki parametrelerden bir kısmının ya da hepsinin bilinmeyen sabitler olması gerekir. Bir başka deyişle, problemde yer alan parametre ve sağ taraf değerlerinin bir kısmı ya da hepsi kesin olarak bilinmez ama olası parametre ve sağ taraf değerleri ile bunların üyelik dereceleri bilinir. Yani, BDP

modelinde amaç fonksiyonundaki ve kısıtlardaki kesinlik durumu bulanık hale getirilecektir (Tuş 2006).

Gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin pek çoğunda bu varsayım sağlanmaktadır. Çünkü karar problemleri genellikle gelecekteki faaliyetlerin belirlenmesinde kullanılır. Gelecekteki olaylar ise belli oranlarda belirsizlik içerir. Bu nedenle, parametrelerin gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi gerekir.

4.4. Bulanık Doğrusal Programlama

Bir karar modeli üç bileşenden oluşmaktadır:

- Karar değişkenleri
- Amaç fonksiyonu
- Kısıtlar

Bu kavramlar şu şekilde tanımlanmaktadır:

Karar (kontrol) değişkeni: Karar vericinin denetimi altında olan değişkenlerdir. DP’da amaç fonksiyonunu eniyileyen karar değişkeni değerleri saptanır.

Amaç fonksiyonu: Karar değişkenlerinin matematiksel fonksiyonudur ve sistemi tanımlamak için kullanılır. Karar vericinin isteklerini ifade etmek için kullanılır. Alacağı değer önceden belirlenemez.

Kısıt: Karar değişkenlerinin matematiksel fonksiyonudur ve sistemi tanımlamak için kullanılır. Karar vericinin elindeki olanakları ifade eden ve karar vericiyi belli koşullar altında karar vermeye yönelten matematiksel fonksiyonlardır. Bulunan çözümler mutlaka problemin kısıtlarını sağlamalıdır (Tuncel 1997).

Karar verici, herhangi bir matematiksel probleme ilişkin kararını verirken, öncelikle problemi doğrusal modele dönüştürmelidir.

Doğrusal Programlama (DP) Modeli

Bir doğrusal programlama modeli genel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$Z_{(\max \text{ veya } \min)} = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (\leq \text{ veya } =) b_i, \quad i=1,2,\dots,m \dots \dots \dots (4.13)$$

$$x_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n$$

Bu formülasyonda,

x_j : karar değişkeni

Z: amaç fonksiyonu

c_j : j. karar değişkenine ait amaç fonksiyonu katsayısı

a_{ij} : teknoloji matrisi katsayısı

b_i : i. kısıta ait sağ taraf değeri

m : kısıt sayısı

n : değişken sayısı

olarak tanımlanmaktadır.

Geleneksel DP modelinde deterministik olarak ifade edilen problemler için en iyi çözüm araştırılır. Bu çözümün karar vericiyi ne derece tatmin ettiği DP modellerinde ele alınmaz.

Bulanık Doğrusal Programlama

Bulanık matematiksel programlama yöntemlerinin özel bir türü olan BDP ise, bulanık küme teorisinin bir uygulamasıdır ve DP'nin bulanık ortamda karar vermek için geliştirilen bir uzantısıdır. DP modellerindeki bulanıklık, amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı katsayılarının tam olarak bilinmediği ve modeldeki bazı eşitlik ya da eşitsizlikler için net olmayan sınırların tanımlanabileceği anlamına gelir. Modelde, insan ve diğer çeşitli

nedenlerle amaç ve kısıtlar belirlenirken her bir katsayı için “civarında”, “aralığında”, “kadar” gibi bulanık terimler söz konusudur. Dolayısıyla c_j , a_{ij} ve b_i katsayıları, bulanık sayılarla veya bulanıklığı niteleyen tolerans aralıkları ile ifade edilmekte ve \leq şeklindeki kısıtların yerine \lesseqgtr şeklinde kısıtlar kullanılmaktadır (Özkan 2003).

BDP problemleri, bulanıklık kavramının ele alınış şekline göre birçok sınıfa ayrılmıştır. İlk sınıflandırma şekli, Zimmermann tarafından “simetrik modeller” ve “simetrik olmayan modeller” şeklinde yapılmıştır. Eğer, amaç ve kısıtlayıcılar bulanık ise, simetrik bir model söz konusudur. Diğer bir sınıflandırma ise, Lai-Hwang tarafından, üyelik fonksiyonlarına göre “olabilirlik” ve “bulanık” şeklinde yapılmıştır. Başka bir çalışmada ise, esnek programlama ve robust (gürbüz) programlama BDP sınıfında yer almaktadır. Yukarıda kısaca bahsedildiği gibi BDP problemlerinin, bulanıklığın modele nasıl ve nerede girebileceği bilgisine göre oluşturulan pek çok türü vardır. Ancak literatürde yaygın olarak kullanılan sınıflandırma, aşağıda verildiği gibidir. Tablo 4.1’de BDP sınıflandırılması verilmektedir.

Tablo 4.1 BDP problemleri

| 1.Tür Sınıflandırma | Konu ile İlgili Çalışanlar | Özellikleri |
|----------------------------------|--|--|
| Simetrik Modeller | Zimmermann | Amaç ve kısıtlayıcıların ikisinin de bulanık olması |
| Simetrik olmayan modeller | Zimmermann | Amaç veya kısıtlayıcıların birinin bulanık olması, ya da ikisinin de bulanık olmaması |
| 2.Tür Sınıflandırma | Konu ile İlgili Çalışanlar | Özellikleri |
| Esnek Programlama | Tanaka ve Zimmermann | Bulanık hedef ve bulanık kısıtlayıcılarda esnekliğin olması |
| Olabilirlik Doğrusal Programlama | Dubois-Praide Tanaka Orlovski Ramik-Rimanek | Amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı parametreleri belirsizlik içerir ve bulanık katsayılar olabilirlik dağılımlarıyla ifade edilir. |
| Robust Programlama | Negoita Orlovski Luhandjula | Katsayılar ve karar verici tercihi belirsizdir. |

4.5. Bulanık Doğrusal Programlama Modelleri

Bulanık doğrusal programlama modelleri genel bir gösterimi olmamakla birlikte, bulanık kısıtlayıcı DP, bulanık amaç fonksiyonlu ve bulanık kısıtlayıcı DP, bulanık

parametrelili DP ve bulanık amaç fonksiyonu ve parametrelili DP olarak sınıflandırılabilir ve bu modeller farklı şekillerde formüle edilmektedir.

4.5.1. Bulanık amaç fonksiyonlu DP problemi

Bulanık amaç fonksiyonlu DP modelinde sadece amaç fonksiyondaki c_j parametreleri bulanık değerlerdir. Bulanık amaçlı DP modeli matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{maks } Z &= c^T x \\ (Ax)_i &\leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots\dots\dots(4.14) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

4.5.2. Bulanık kısıtlayıcı DP problemi

Bulanık kısıtlayıcı DP’de bulanıklık modeldeki sağ taraf sabitlerinin belirsiz olmasından veya kullanılan toplam kaynak miktarının üst limitinin kesin olarak belirlenmemesinden bir başka ifade ile eşitsizlikten kaynaklanabilir. Birinci durum matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{maks } Z &= c^T x \\ (Ax)_i &\leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots\dots\dots(4.15a) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

DP modellerinde maksimum kaynak miktarını gösteren sağ taraf parametreleri açıkça tanımlanamayabilir, yani bulanık olabilir. Bu durumda oluşturulacak kısıtlar “bulanık kaynak kısıtları” olarak isimlendirilir (Lai ve Hwang 1992).

Bir karar modelinde eldeki kaynak miktarları çoğu zaman kesin değerlerle ifade edilemezler. Çünkü işgücü, makine zamanı, hammadde miktarı birçok faktöre bağlıdır. Örneğin insan gücü kullanan bir üretimde insanlarla ilgili birçok olay çalışma zamanının sabit bir değerde gitmesine imkân vermez.

İkinci durumda ise, bulanıklık, eşitsizlikten kaynaklanmaktadır ve bu durumda model 4.15b’deki gibi ifade edilmektedir:

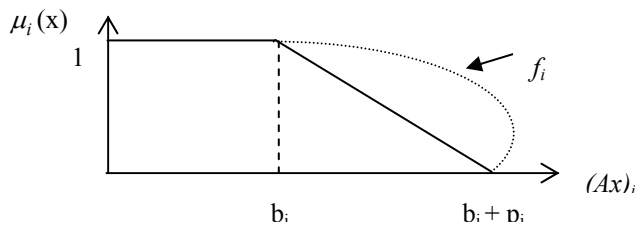
$$\begin{aligned}
& maks Z = c^T x \\
& (Ax)_i \lesseqgtr b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.15b) \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Burada karar verici kısıtların sağlanmasında üyelik fonksiyonlarından faydalanarak kısıtların “mümkün olduğu kadar iyi” karşılanmasını sağlar. Bulanık kısıtlar için üyelik fonksiyonları 4.16 ve 4.17’de verilmiştir. Eğer modelde i. bulanık kısıt “ \lesseqgtr ” şeklinde ise 4.16 verilen üyelik fonksiyonu, eğer “ \gtrless ” şeklinde ise 4.17’deki üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.

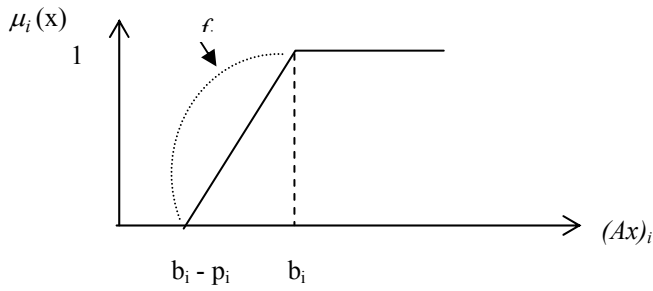
$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & (Ax)_i < b_i \\ f_i(Ax)_i & b_i \leq (Ax)_i \leq b_i + p_i \dots \dots \dots (4.16) \\ 0 & (Ax)_i > b_i + p_i \end{cases}$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0 & (Ax)_i < b_i - p_i \\ f_i(Ax)_i & b_i - p_i \leq (Ax)_i \leq b_i \dots \dots \dots (4.17) \\ 1 & (Ax)_i > b_i \end{cases}$$

Yukarıda tanımlanan üyelik fonksiyonlarına göre karar vericinin “ \lesseqgtr ” şeklindeki kısıtlarda $b_i + p_i$, $i = 1, 2, \dots, m$ değerine kadar, “ \gtrless ” şeklindeki kısıtlarda $b_i - p_i$ $i = 1, 2, \dots, m$ değerine kadar ihlalleri hoş gördüğü ifade edilebilir. Bulanık eşitsizlik kısıtlarının üyelik fonksiyonları, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi bu çalışmada bulanık eşitsizliklerin parçalı doğrusal üyelik fonksiyonlarıyla nitelendiği kabul edilmiştir. f_i fonksiyonları “ \lesseqgtr ” şeklindeki bulanık kısıtlayıcılar için sürekli ve monoton azalan ve “ \gtrless ” şeklindeki bulanık kısıtlayıcılar için ise sürekli ve monoton artan olarak tanımlanmıştır (Özkan 2003).



Şekil 4.4 “ \lesseqgtr ” şeklindeki bulanık kısıtların üyelik fonksiyonu



Şekil 4.5 “ \cong ” şeklindeki bulanık kısıtların üyelik fonksiyonu

Her $x \in X$ için tanımlı μ_i fonksiyonları $x \in R^n$ için i . kısıtın sağlanma derecesini verir. Fakat bu değer R üzerinde tanımlı f_i fonksiyonları vasıtasıyla hesaplanır.

Bazı bakış açılarına göre a ve b farklı modeller olarak düşünülse bile, bulanık kaynak kısıtları ve bulanık eşitsizlik kısıtlarının üyelik fonksiyonlarının aynı olduğu ön varsayımı altında söz konusu modelleri ele almak için aynı yaklaşım kullanılabilir (Tuş 2006). Bu çalışmada her iki model eşdeğer kabul edilecektir.

4.5.3. Bulanık amaç fonksiyonlu ve bulanık kısıtlayıcı DP problemi

Bir BDP modelinde, hem amaç fonksiyonu hem de kısıtlar bulanıklık içerebilmektedir. Zimmermann'ın simetrik model olarak tanımladığı bu model matematiksel olarak 4.18'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \text{maks } Z &= c^T x \\
 (Ax)_i &\leq \tilde{b}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.18) \\
 x &\geq 0
 \end{aligned}$$

Burada amaç fonksiyonundaki bulanıklık, karar vericinin erişim düzeyinin bulanık olmasından kaynaklanmaktadır. Yani, amaç fonksiyonundaki bulanıklık amaç fonksiyonu parametrelerinden (c_j katsayılarından) kaynaklanmaz. Ayrıca, teknoloji katsayıları da bulanık olmayan bir şekilde belirlenir. Bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcı DP problemlerinin çözülebilmesi için bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcılara ilişkin erişim düzeyleri ile maksimum toleransların belirlenmesi gerekir (Özkan 2003).

4.5.4. Amaç fonksiyonu bulanık parametrelili DP problemi

Bazı durumlarda amaç fonksiyonu katsayıları da bulanıklık içerebilir. Örneğin, karar verici ürettiği her bir ürün için, yılın satış zamanlarına, diğer markalı ürünlerle rekabet yarışı gibi durumlara bağlı olarak fiyatlarını oturtmak için bir değer aralığı kararlaştırır. Bu gibi faktörlere bağlı olarak karını maksimum tutamaz. Çünkü böyle bir rekabet ortamında ilgili ürün için pazar araştırması maliyeti o ürünün karını azaltacaktır. Bu nedenle karar verici karını en büyükmek için amaç fonksiyonunun katsayılarını, dolayısıyla amaç fonksiyonunu bulanık kuracaktır (Yılmaz 1998). Amaç fonksiyonu bulanık parametrelili model, 4.19'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} maks Z &= \tilde{c}^T x \\ (Ax)_i &\leq \tilde{b}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.19) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Bu modelde amaç fonksiyonu katsayıları, bulanık sayılarla veya bulanıklığı niteleyen tolerans aralıkları ile tanımlanır (Cadenas ve Verdegay 2000).

4.5.5. Bulanık parametrelili DP problemi

Bir BDP modelinde bulanıklık; c_j , a_i , b_i gibi tüm parametrelerden kaynaklanıyorsa, bu durumda model bulanık parametrelili DP modelidir ve matematiksel olarak 4.20'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} maks Z &= \tilde{c}_j^T x_j \\ \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j &\leq \tilde{b}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.20) \\ x_j &\geq 0 \end{aligned}$$

Bu model için, parametrik programlama temeline dayanan ve parametrelerdeki bulanıklığın karar verici ile etkileşime girerek tanımlandığı bir çözüm yaklaşımı Carlsson ve Korkonen tarafından önerilmiştir (Özkan 2003).

Bu bilgiler doğrultusunda, doğrusal programlama ile bulanık doğrusal programlama arasındaki farklar, Tablo 4.2'de özetlenmiştir:

Tablo 4.2 DP ve BDP arasındaki farklar

| Klasik Doğrusal Programlama | Bulanık Doğrusal Programlama |
|---|--|
| c_j, a_{ij}, b_j parametreleri kesin olarak bilinir. | c_j, a_{ij}, b_j parametreleri bulanık olabilir. |
| Amaç ve kısıtlayıcılardaki sınırlar nettir. | Amaç ve kısıtlayıcılardaki sınırlar net değildir. |
| Toleranslarla çalışılmaz. | Toleranslarla çalışılır. |
| Amaç ve kısıtlayıcılar üyelik fonksiyonları ile ifade edilmez. | Amaç ve kısıtlayıcılar üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. |
| Belirsizliğin söz konusu olduğu problemlerde etkin bir araç değildir. | Belirsizliğin söz konusu olduğu problemlerde etkin bir araçtır. |
| Karar verici tercihini çözümün sonunda eniyileme yönünde yapar. | Karar verici tercihini toleransları belirleyerek, çözümden önce ya da sonra yapabilir. |

4. 6. Bulanık Doğrusal Programlama Modellerine Çözüm Yaklaşımları

BDP modellerinin çözümü için pek çok yaklaşım geliştirilmiştir. Zimmermann, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcı DP problemleri için simetrik bir yaklaşım önermiştir (Wang 1997). Werners (1987), karar vericinin amaç fonksiyonunun maksimum erişim düzeyi hakkında gerekli bilgisinin olmayacağı ve bunun karar verici tarafından belirlenmesinin çok doğru olmadığı düşüncesiyle yeni bir yaklaşım önermiştir. Bir diğer yaklaşım ise, Verdegay tarafından geliştirilmiş olup burada bulanık doğrusal programlama modellerinin çözümünün bulanık bir küme ile temsil edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Özkan 2002). Bu çalışmada Zimmermann yaklaşımı esas alınmıştır. Bu yaklaşımın tercih edilmesinin en önemli sebebi, MHDP'nin doğasından kaynaklanmaktadır. Yani, karar verici, başlangıçta çevrim zamanında ya da istasyon sayısında ulaşmak istediği değeri hesaplama yoluyla belirleyebilmektedir. Ayrıca, modelin hem amacı hem de kısıtlardaki sağ taraf sabitleri bulanık olarak düşünülmektedir. Bu da simetrik model olduğunu ortaya koymaktadır. Verdegay Yaklaşımında, farklı optimum çözümler olduğu ve bu çözümlerden hangisinin kabul edileceği karar vericinin tercihinin bırakılmıştır. Ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP'de ise, belirlenen faktörlere göre düzenleme yapıldığında istasyonlara işlerin atanmasında ne gibi farklılıklar olduğu bu modelle bir seçenek olarak sunulmuştur. Gelecekte, parametrik programlama kullanılarak ve farklı faktörler dikkate alınarak problem çözülebilir.

4.7. Zimmermann Yaklaşımı

BDP ilk kez bir karar modeli olarak Zimmermann tarafından kullanılmıştır. Zimmermann, önceki bölümde de belirtildiği gibi, simetrik ve simetrik olmayan modelleri incelemiştir. Zimmermann'a göre bulanık amaç fonksiyonu ve toleranslar karar verici tarafından çözüm öncesinde belirlenebilmektedir. Ayrıca, bulanık amaç, bulanık bir kısıtlayıcı gibi ifade edilebilir. Bu durumda, bulanık karar kümesi belirlenirken bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcılar birbirlerinden farksız olarak ele alınır. Yani, bulanık amaç fonksiyonu, karar vericinin sağlaması gereken bir kısıta dönüşmektedir (Kaymak ve Sousa 2001).

Bu yaklaşımda, bulanık amaç fonksiyonunun b_0 amacı ve p_0 hoşgörü miktarı ile tüm bulanık kaynakların b_i ve p_i değerleri önceden verilir. Bulanık amaçlar ve bulanık kısıtların birbirlerinden farksız oldukları düşünülür ve $\forall i$ için $[b_i, b_i + p_i]$ aralıklarıyla tanımlanır. Dolayısıyla, Zimmermann (1991) yaklaşımı kullanılarak 4.21'de verilen simetrik bulanık doğrusal karar modeli 4.22'de verilen klasik DP modeline dönüşür.

$$\begin{aligned} \text{maks } Z &= c^T x \\ (Ax)_i &\lesseqgtr b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.21) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Kısıtlar

$$\begin{aligned} c^T x &\gtrsim b_0 \\ (Ax)_i &\lesseqgtr b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.22) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Burada \lesseqgtr işareti, \leq işaretinin bulanıklaştırılmış halidir. \lesseqgtr işareti, “ $(Ax)_i$ kısıtlayıcısı b_i civarında veya daha azdır” şeklinde yorumlanır. Benzer olarak, \gtrsim işareti de \geq işaretinin bulanıklaştırılmış halidir. \gtrsim işareti, “ $c^T x$ amacı b_0 civarında veya daha fazladır” şeklinde yorumlanır. Yeni model, simetrik değildir. Bulanık amaç fonksiyonunun her iki tarafı da (-1) ile çarpılırsa, BDP problemi 4.22'deki gibi tamamen simetrik olarak ifade edilebilir (Özkan 2003).

$$\begin{aligned}
& -c^T x \leq -b_0 \\
& (Ax)_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (4.22) \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Burada $B = \begin{bmatrix} -c^T \\ A_i \end{bmatrix}$ ve $d = \begin{bmatrix} -b_0 \\ b_i \end{bmatrix}$ sütun vektörleri tanımlanırsa BDP problemi

4.23'de verildiği gibi düzenlenebilir (Özkan 2003):

$$\begin{aligned}
& Bx \leq d \\
& x \geq 0 \dots \dots \dots (4.23)
\end{aligned}$$

Yeni durumda, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcılar, seçenekler kümesindeki bulanık kümeler olarak tanımlandığı için, bunlara ilişkin üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi gerekir. 4.24 no'lu denklem hem amaç fonksiyonunun hem de kısıtın üyelik fonksiyonunu içermektedir.

$$\mu_i[(Bx)_i] = \begin{cases} 0 & (Bx)_i > d_i + p_i \\ \in [0,1] & d_i \leq (Bx)_i \leq d_i + p_i \\ 1 & (Bx)_i < d_i \end{cases} \dots \dots \dots (4.24)$$

Üyelik fonksiyonuna göre, i 'inci bulanık eşitsizlik tamamen sağlanırsa, üyelik derecesi 1 olmalı, $[d_i, d_i + p_i]$ aralığında üyelik derecesi 1'den 0'a doğru monoton olarak azalmalı ve i 'inci bulanık eşitsizlik tamamen sağlanmıyorsa, üyelik derecesi 0 olmalıdır. Burada, $d_i = i$. kısıt ya da bulanık eşitsizliğin sağ taraf sabiti b_i 'ye eşittir. p_i ise i 'inci bulanık eşitsizliğin sağ taraf sabiti için karar vericinin belirlediği maksimum toleranstır. Diğer bir ifadeyle, p_i 'ler amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcılardaki kabul edilebilir toleransları gösteren ve karar verici tarafından belirlenen sabitlerdir. Bu durumda, $d_i + p_i$; i . kısıtın en yüksek değerini ifade etmektedir (Özkan 2003).

Buradan hareketle, bulanık amaç fonksiyonunun üyelik fonksiyonu 4.25'teki gibi tanımlanmaktadır (Ural 2006):

$$\mu_0(x) = \begin{cases} 0 & c^T x < b_0 - p_0 \\ 1 - \frac{b_0 - c^T x}{p_0} & b_0 - p_0 < c^T x < b_0 \\ 1 & c^T x > b_0 \end{cases} \dots \dots \dots (4.25)$$

Burada b_0 , amaç fonksiyonunda ulaşılmak istenen seviye ya da amaç fonksiyonunu da bir kısıt olarak düşünüldüğünde, amaç fonksiyonunun sağ taraf sabitidir. Bu durumda $b_0 - p_0$ ise kabul edilebilir en düşük amaç fonksiyonu değeridir. $\mu_0(x)$ üyelik fonksiyonu, çözüm vektörü x 'in bulanık eşitsizlik $c^T x \gtrsim b_0$ 'ı sağlama derecesi olarak yorumlanır.

Bulanık kısıtın üyelik fonksiyonu ise 4.25 no'lu denklemdeki gibi ifade edilir.

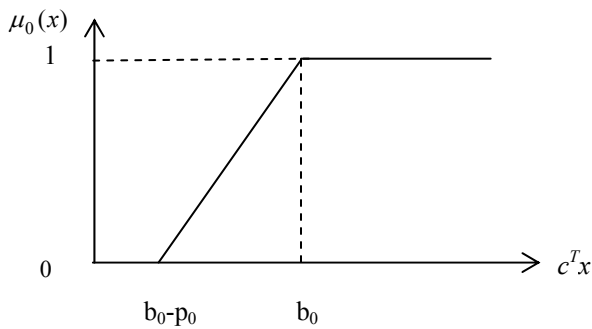
$$\mu_0(x) = \begin{cases} 0 & (Ax)_i > b_i + p_i \\ 1 - \frac{(Ax)_i - b_i}{p_i} & b_i \leq (Ax)_i \leq b_i + p_i \\ 1 & (Ax)_i < b_i \end{cases} \dots\dots\dots(4.25)$$

Bu ifadeden yola çıkarak $b_0 = \max c^T x = Z_{\max}$ ve $b_0 - p_0 = \min c^T x = Z_{\min}$, ve $c^T x = Z$ olarak tanımlanırsa, amaç fonksiyonu için üyelik fonksiyonu 4.26'daki gibi ifade edilir.

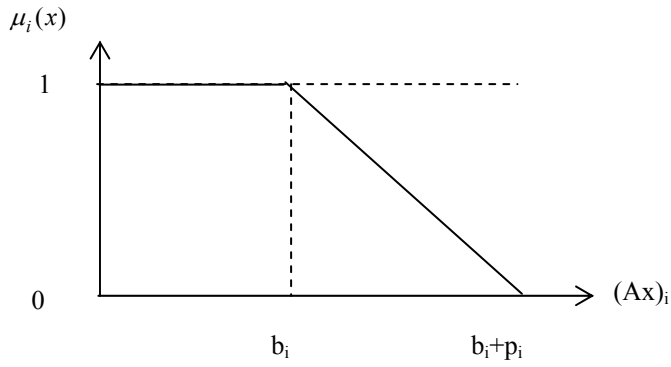
$$\mu_0(x) = \begin{cases} 0 & Z < Z_{\min} \\ 1 - \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} & Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \\ 1 & Z > Z_{\max} \end{cases} \dots\dots\dots(4.26)$$

Bulanık amaç ve kısıtlar için üyelik fonksiyonları grafiksel olarak Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların üyelik fonksiyonları belirlendiği için bulanık karar kümesi, 4.27'de gösterildiği gibidir.

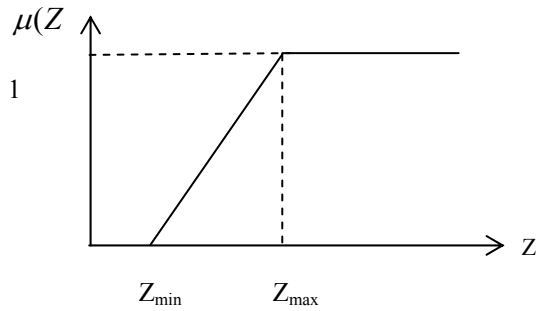
$$\mu_{\tilde{D}}(x) = \min[\mu_0(x), \mu_i(x)] \quad i = 1, 2, \dots, m \dots\dots\dots(4.27)$$



Şekil 4.6 $c^T x \gtrsim b_0$ şeklindeki bulanık amacın üyelik fonksiyonu



Şekil 4.7 $(Ax)_i \lesseqgtr b_i$ şeklindeki bulanık kısıtlayıcının üyelik fonksiyonu



Şekil 4.8 Amacın üyelik fonksiyonu

Bulanık karar kümesinin en yüksek üyelik dereceli elemanı ise 4.28'deki gibi ifade edilir.

$$\mu_{\tilde{D}}(x^*) = \max_{x \geq 0} (\min[\mu_0(x), \mu_i(x)]) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.28)$$

Artık, simetrik BDP problemleri, ek bir değişken olan λ 'nın kullanılması ile klasik bir DP modeli olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla, bulanık karar kümesi için, 4.29 no'lu denklem yazılabilir (Özkan 2002).

$$\min_i [\mu_0(x), \mu_i(x)] = \mu_0(x) \wedge \mu_i(x) = \lambda \quad (4.29)$$

Burada λ değişkeni, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların çözüm vektörü x tarafından aynı anda sağlanma derecesini gösterir. λ değişkeni, $\lambda \in [0,1]$ aralığında tanımlanır. $\mu_{\tilde{D}}(x^*)$ 'ı belirleme problemi klasik bir DP problemi olarak aşağıda 4.30'da verildiği gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}
& \text{maks } \lambda \\
& \mu_0(x) \geq \lambda \\
& \mu_i(x) \geq \lambda \quad \dots\dots\dots(4.30) \\
& \lambda \in [0,1]
\end{aligned}$$

Bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların üyelik fonksiyonları yukarıdaki modelde yerine konduğu zaman 4.31'deki DP modeline ulaşılır:

$$\begin{aligned}
& \text{maks } \lambda \\
& 1 - \frac{b_0 - c^T x}{p_0} \geq \lambda \\
& 1 - \frac{(Ax)_i - b_i}{p_i} \geq \lambda; \forall i \quad \dots\dots\dots(4.31) \\
& \lambda \in [0,1] \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Bu model, $c^T x$ ve $(Ax)_i$ terimlerine göre düzenlendiği zaman, 4.32 no'lu model gibi ifade edilir (Özkan 2003).

$$\begin{aligned}
& \text{maks } \lambda \\
& c^T x \geq b_0 - (1 - \lambda)p_0 \\
& (Ax)_i \leq b_i + (1 - \lambda)p_i; \forall i \quad \dots\dots\dots(4.32) \\
& \lambda \in [0,1] \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Burada c_j , a_{ij} , b_0 , p_0 , b_i ve p_i 'lerin problemin çözümünden önce, karar verici tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Yukarıda verilen DP probleminin klasik bir DP problemi olduğu açıktır.

$\lambda = 1 - \theta$ olsun. O zaman eşitlik 4.33'deki modele eşittir:

$$\begin{aligned}
& \text{min } \theta \\
& c^T x \geq b_0 - \theta p_0 \\
& (Ax)_i \leq b_i + \theta p_i; \forall i \quad \dots\dots\dots(4.33) \\
& \theta \in [0,1] \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

c , A , b_0 , p_0 , b_i ve p_i , $\forall i$ verilir ve θ , maksimum toleransın bir parçasıdır. Bu eşitliğin optimal çözümü tektir.

Bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcı DP problemlerinde bazı kısıtlayıcılar bulanıklık içermeyebilir. Bu durumda, ilgili kısıtlayıcıların (Ex) maksimum toleransları 0 olarak kabul edilir. Diğer bir ifadeyle, bulanık olmayan kısıtlayıcılar herhangi bir dönüşüm işlemi yapılmaz. Zimmermann yaklaşımına göre modelin son hali 4.34'de verilmiştir.

$$\begin{array}{ll}
 maks \lambda & \longrightarrow \text{Bulanık amaç} \\
 c^T x \geq b_0 - (1 - \lambda)p_0 & \longrightarrow \text{Bulanık kısıtlayıcılar} \\
 (Ax)_i \leq b_i + (1 - \lambda)p_i; \forall i & \dots\dots\dots(4.34) \\
 (Ex)_i \leq b_i & \longrightarrow \text{Bulanık olmayan kısıtlayıcılar} \\
 \lambda \in [0,1] & \\
 x \geq 0 &
 \end{array}$$

Zimmermann yaklaşımına göre, bulanık kısıtlar ve amaç, tolerans değerleri klasik doğrusal karar modeline çevrilerek belirlenen tolerans değerlerini maksimum derecede sağlayan (en yüksek üyelik derecesi sahip) bir çözüm araştırılır.

5. ERGONOMİK FAKTÖRLER VE MONTAJ HATTI DENGELEME

5.1. Ergonomi Bilimi ve Amacı

Ergonomi kelimesi, Yunanca ergo (iş) ve nomi (kural) sözcüklerinin birleşiminden türemiştir. İlk defa ergonomi kelimesi, Wojciech Jastrzebowski tarafından 1857 yılında Polonya'daki bir gazetede kullanılmıştır (Erdem 2000). ABD'de ise ergonomi, "İnsan Faktörü Mühendisliği" olarak geçmekte ve odak noktasında insan performansı ve sistem tasarımı yer almaktadır. Avrupa'da ergonomi kavramı iş psikolojisi, biyomekanik ve iş istasyonu tasarımına dayanmaktadır (Helander 1995).

Ergonomi günümüzde, birçok dünya ülkesinde insanın fizyolojik ve psikolojik zorlanma sınırlarının araştırılmasından, çevre koşullarının düzenlenmesine, iş güvenliğinden mola zamanlarının saptanmasına kadar çok çeşitli alanlarda yapılan araştırmalarla günden güne ortaya koyduğu somut veriler sayesinde önemli bilim dallarından biridir (Şimşek 1994).

Ülkemizde ergonomi kavramının pek yaygın olduğu söylenemez. Oysa ülkemizin içinde bulunduğu sanayileşme süreci ve sürecin ortaya çıkardığı sorunların temelinde insan faktörü ve çalışma ortamı uyumsuzluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ergonomi bilimine gerekli önem verilmesi durumunda, sosyo-ekonomik kalkınmamız açısından önemli aşamalar sağlanacaktır.

Ergonomi; insanların anatomik özelliklerini, antropometrik (insan bedeninin boyutlarına ilişkin) karakteristiklerini, fizyolojik kapasite ve toleranslarını göz önüne alarak, endüstriyel iş ortamındaki tüm faktörlerin etkisiyle oluşabilecek, organik, psikososyal stresler karşısında sistem verimliliği ve insan, makine, çevre uyumunun temel yasalarını ortaya koymaya çalışan çok disiplinli bir araştırma ve geliştirme alanıdır (Erkan 1996).

Bu bilim dalı anatomik, fizyolojik, psikolojik ve teknik bilgilerden yararlanarak, insan işinin, yapılabirlik ve dayanabilirlik sınırlarının belirlenmesi için yöntemler geliştirir. Ergonominin temel görevi, insana yönelik bir iş düzenlemesinin bilgilerini vermektir. Böylelikle ergonomi, işin insana ve insanın işe uyumu için gerekli koşulları belirler (MPM-REFA 1988).

Ergonomi, çalışanların fizyolojik kapasitesini ve toleranslarını gözeterek, iş ortamındaki tüm stres etkenlerini kontrol altına almayı ve çalışanların fizyolojik kapasitelerinin korunmasını, mümkünse yükseltilmesini hedefler. İnsan faktörünün sağlıklı bir ortamda ve psikosomatik sorunlardan uzak bulundurulması, verimlilik artışını da beraberinde getirmektedir. Yani, yorucu olmayan, hem zorlanmayan hem de yetenek israfına yol açmayan, dengeli ve uyumlu bir ortamda çalışmak, o işte verimliliğin uzun süre sürdürülmesini sağlayacaktır.

5.2. Ergonomik İş Sistemleri

Sistem, aralarında belirli bir ilişki bulunan, belirli bir amaç doğrultusunda bir araya gelmiş, bir sınır ile dış çevreden ayrılan, fiziki veya fiziki olmayan elemanların oluşturduğu topluluktur (Erdem 2000). Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere bir işletme, kuruluş hatta tüm ekonomi bir sistem olarak değerlendirilebilir. Sistem, endüstriyel faaliyetleri, hem yönetim kademesindeki işleri, hem de hizmet dalındaki çalışma yerleri için geçerliliği olan bir kavramdır (Bridger 1995). Endüstriyel faaliyetlerde ele alınan sistemlerin hemen hemen tümü sosyoteknik sistemlerdir. İş sistemlerinde, görevlerin gerçekleştirilmesi sürecinde insan ve üretim araçları girdiye etki ederek, muhtemel çevre koşulları altında çıktının oluşmasını sağlarlar.

İnsan ve üretim araçları, sistemi oluşturan öğeler arasındadır. İş sisteminin kapladığı alana girer girmez, sistemin elemanları olarak sayılırlar.

İş sistemlerinde 7 adet temel eleman vardır (MPM-REFA 1988):

Görev

Çalışana belirli bir amaca erişilmesini sağlayacak etkinlikte bulunması için verilen yönergedir. Görev, bir çalışan tarafından ekipman, araç ve gereçler yardımıyla girdileri çıktıya dönüştürmek için yapılan faaliyetler bütünüdür. Görev içerisinde yer alan faaliyetler, fiziksel ya da mantıksal olabilir. İş kavramı ise, çalışana atanan görevlerin bütününe temsil etmektedir.

İş Akışı

İş akışı, sistemin süreç veya zaman içindeki davranışı olarak tanımlanabilir. İş akışında girdinin, nerede (hangi atölyede veya hangi çalışma yerinde), ne zaman (hangi

zaman sırasına göre), ne ile (kim tarafından ve hangi üretim araçlarını kullanarak) göreve uygun olarak kullanılacağı belirtilir.

Girdi

İş sisteminin girdisi, genellikle işin konusunu oluşturan nesnelere dir. Girdiler göreve göre hal, biçim ve durum değişikliğine uğrar veya kullanılırlar. Sistemin nesnelere olan hammaddeler, yarı mamuller, malzeme ya da veriler girdi olarak adlandırılır.

Çıktı

İş sistemlerinden göreve göre hal, durum, biçim değişikliğine uğramış ya da kullanılmış olarak sistemi terk eden elemanlara verilen addır.

İnsan

İş sistemindeki göreve göre girdiyi, çıktıya dönüştüren kapasitedir.

Üretim Aracı

İş sisteminde görevin yerine getirilmesinde herhangi bir şekilde katkısı olan alet veya makineler, üretim ya da çalışma aracı olarak adlandırılır.

Çevre Koşulları

İş sistemini etkileyen ve bazı durumlarda da iş sistemi tarafından üretilen fiziksel, örgütsel ve sosyal etmenler çevre koşullarını oluşturur.

Çalışma yerlerinde karşılaşılan çoğu ergonomik problemler, sistem yaklaşımı dahilinde incelenebilir. Ergonomik sistemlerde bulunan birçok değişik faktör etkisi, sistemin elemanlarını da değişik biçimde etkilemektedir. Bundan dolayı, ergonomik açıdan iş sistemlerini incelemek, disiplinler arası bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır (Bridger 1995).

Ergonomik düzenlemelere gidilirken, sistemdeki çok yönlü etkileşimlerin değerlendirilmesinde karşılaşılabilecek problemlere çözüm üretirken, ekip çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Modern üretim sistemlerine ilişkin ergonomik kararların verilmesi aşamasında, mühendisler, yöneticiler, işçiler ve farklı medikal alanlarda çalışan kişiler bir araya getirilmelidir. Böylece, sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini

optimize etmek mümkün olabilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ergonomik düzenlemeleri yapacak grubun, çalışan ve makine arasındaki etkileşimi iyi gözlemlemesi ve işçinin performans limitlerinden daha fazla aşırı yüklemelerin sistemde önemli aksaklıklara (sakatlanma ve iş kazaları) yol açabileceğinin unutulmaması gerektiğidir.

5.3. Ergonomik Ölçütler

Bir çalışma sisteminin ergonomik olması, diğer bir deyişle insancılığı, araştırmacı Rohmert'e göre birbirini izleyen dört ölçüte göre belirlenir (Erdem 2000):

Yapılabilirlik

Bu ölçüt, bir çalışma sisteminin ergonomik olup olmadığını belirleyen birinci ölçüttür. Bir çalışmanın ergonomik olabilmesi için her şeyden önce bu çalışmanın gerektirdiği işlemlerin ve yüklenmelerin insanın biyolojik yeteneklerinin sınırları içinde olması gerekir.

Dayanabilirlik

Bu ölçüt, yapılabilirlik ölçütünün zaman boyutuyla ilişkilendirilmiş biçimidir. Yani bir çalışma sisteminin ergonomik olabilmesi için o çalışma sisteminin insandan istediği yetenek düzeyinin, “sürdürülebilir iş başarımı” sınırları içinde olması gerekir. Sürdürülebilir iş performans düzeyi, genç ve sağlıklı bir insanın belli bir süre boyunca sürdürebileceği en üst iş performansını anlatmaktadır.

Kabul Edilebilirlik

Bu ölçüte göre, dayanabilirlik sınırları içindeki koşulların toplumsal değer yargılarına uygun ve çalışanlar tarafından kabul edilebilir olması gerekir.

Hoşnutluk

Bir çalışmanın insanca olabilmesi için o çalışmanın, çalışmayı yapan kişinin hoşuna gitmesi gerekir. Bir çalışmanın kişide hoşnutluk duygusu yaratması için her şeyden önce, çalışmanın kişinin yeteneklerine uygun olması, aynı zamanda, onun beklentilerini ve özlemlerini yanıtlaması gerekir.

Ergonomik ölçütlere son yıllarda eklenen beşinci ölçüt ise “kendini gerçekleştirebilirlik” ölçütüdür. Bu ölçüte göre çalışma, kişinin kendini geliştirmesine katkıda bulunmalı, tüm yeteneklerini kullanmasını sağlamalıdır (İncir 1998).

5.4. Ergonomik İş İstasyonları

İşletmelerde, üretim planlamanın yanı sıra, iş istasyonlarının çalışanlara uygun tasarlanması da oldukça önemli faaliyetlerdir. Ancak çoğu mühendis, üretim planlamayı öncelikli konumda tutar ve iş istasyonlarının çalışanlara göre tasarlanması faaliyetini arka plana atar (Helander 1995).

Ergonomi biliminin ön gördüğü iş istasyonları boyutları, antropometrik veriler dahilinde tasarlanmayan iş istasyonlarında çalışan iş görenlerde bir süre sonra mental ve fiziksel açıdan zorlanmalar baş göstermekte ve bunun sonucunda verimlilik kayıpları oluşmaktadır. Oysa iş istasyonlarının boyutlandırılmasında yapılan küçük değişiklikler bile, işçinin ve sürecin üretkenliğinde büyük artışa yol açmış, bu durumun fark edilmesiyle birlikte araştırmacılar, çalışmalarını bu yöne kaydırmıştır.

Literatür incelendiğinde, iş istasyonlarının tasarımı ile ilgili ergonomik araştırmalar teorik ve uygulamaları durum çalışmalarından oluşmaktadır. Literatürdeki uygulamalı çalışmalarda herhangi bir iş yerindeki mevcut istasyonlarda insan makine ara kesitinin ergonomik kriterlere ve tavsiyelere göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Teorik çalışmalarda ise insana ve tekniğe yönelik laboratuvar deneyleri ön plana çıkmaktadır. İnsanın antropometrik, fizyolojik ve sosyolojik özelliklerinin daha iyi belirlenip buna göre vücut fonksiyonlarının en iyi şekilde gerçekleştirilebileceği sistemlerin özellikleri öngörülmüştür.

Ergonomik yaklaşımların giderek daha çok benimsendiği çağımızda, iş istasyonlarının tasarımına ilişkin çalışmalar hızla devam etmektedir.

Ancak, bu tez çalışmasında iş istasyonlarının tasarımından ziyade hat dengeleme açısından ergonomik yaklaşımlar incelenecektir ve literatürde montaj hattı dengeleme ile ergonomik faktörleri birlikte dikkate alan çalışmaların sayısı ne yazık ki yok denecek kadar azdır.

5.5 Ergonomik Faktörler Altında Montaj Hattı Dengeleme

Montaj Hattı Dengeleme Problemi günümüz rekabet koşullarında imalat sektöründe hala çözüm bekleyen önemli bir problemdir.

Montaj hatlarını tasarlama adına yapılan dengeleme çalışmalarında temel amaç, mevcut kaynaklardan faydalanma oranını maksimize etmektir. Bu amaç doğrultusunda iş öğeleri, istasyon süreleri birbirine eşit ya da çok yakın olacak şekilde istasyonlar arasında paylaşılır. Yani, geleneksel olarak montaj hattı dengeleme ile amaçlanan temel hedefler;

- Çalışma alanının en küçüklenmesi,
- Çevrim zamanını aşmamak,
- Öncelik koşullarını gerçekleştirmektir.

Oysa sanayide çalışan mühendislerle yapılan görüşmeler ve anketler doğrultusunda montaj hattı dengeleme problemi için yeni hedefler ortaya çıkmış, bu hedefleri gerçekleştirebilecek yeni modellerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur (Gunther vd 1983). Bu yeni hedeflerden bazıları:

- Çalışanların fizyolojik özelliklerinden kaynaklanan kısıtlara uyulması,
- İş yükü ataması yapılırken görevlerin zorluk derecelerinin de dikkate alınması
- İş yükü ataması yapılırken görevlerin taşıdığı tehlike riskinin de dikkate alınması
- Tesisin yerleşiminden kaynaklanan kısıtlara uyulması,
- Dikkat gerektiren işlere kalifiye işçilerin atanması vb'dir.

Bu çalışmada MHDP çözülmeye çalışırken, bugünün rekabet koşulları dikkate alınarak ergonomik faktörleri ve çalışanın performansındaki değişimleri modele ekleyerek dengeleme amaçlanmaktadır. Gerçek üretkenliğin, yalnızca işlerin işlem sürelerini dikkate alan hızlandırılmış hatlarla değil, aynı zamanda insan faktörünü de dikkate alan, insana değer veren ergonomik tasarımlardan geçtiği yadsınamaz bir gerçektir.

6. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA İLE ERGONOMİK MHDP

6.1. Basit MHDP

Basit MHDP; sadece bir ürünün üretildiği ve işlem sürelerinin kesin olarak bilindiği montaj hattı dengeleme problemlerini kapsamaktadır. Basit MHDP’de iki tip problem ele alınmaktadır: çevrim süresi verildiğinde görevlerin tamamlanması için gerekli istasyon sayısının en küçükleme veya istasyon sayısı verildiğinde çevrim süresinin en küçükleme. Birinci problem literatürde Tip I problemi (BMHDP-I); ikincisi, Tip II problemi (BMHDP-II) olarak isimlendirilmektedir.

Literatürde BMHDP ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda tamsayı programlama, dinamik programlama gibi çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Montaj hattı dengeleme problemlerinin modellenmesinde, genellikle 0-1 tamsayı programlama kullanılmaktadır. Patterson ve Albracht (1975) tarafından geliştirilen 0-1 tamsayı programlama modeli az sayıda değişken kullanması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (Gökçen ve Erel 1997). Bu çalışmada, ergonomik kısıtlar dikkate alınarak geliştirilecek model için Patterson ve Albracht’ın modeli temel olarak alınacaktır. BMHDP-I problemi için geliştirilen bu model aşağıda verilmektedir.

Karar Değişkenleri

Modelde iki tip karar değişkeni bulunmaktadır: Görevlerin iş istasyonlarına atanması ile ilgili karar değişkenleri ve iş istasyon sayısı ile ilgili karar değişkenleri. Bu değişkenlerden ilki 6.1 no’lu denklemde, ikincisi ise 6.2’de verilmiştir. Karar değişkenler 0 ve 1 değerlerini almaktadır. Bu durum 6.3 no’lu denklemle belirtilmiştir.

x_{ij} : i . görev j . istasyona atanması

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ görevi } j \text{ istasyonuna atanmışsa} \\ 0 & \end{cases} \dots\dots\dots(6.1)$$

z_j : j . istasyona görev atanması

$$z_j = \begin{cases} 1, & \text{istasyonuna atanmış görev varsa,} \\ 0, & \end{cases} \dots\dots\dots(6.2)$$

$$x_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \forall i, j. \dots\dots\dots(6.3)$$

Parametreler

BMHDP-1 probleminde tüm parametreler kesin olarak bilindiği kabul edilmektedir. Modeli oluşturmak için gerekli parametreler aşağıda verilmektedir.

C : Çevrim zamanı

t_i : i . görevin işlem süresi

m_{\max} : Maksimum istasyon sayısı

W_j : j . istasyonuna atanabilecek görevler kümesi

$\|W_j\|$: W_j kümesinin eleman sayısı

E_i : i görevinin öncelik ilişkisine göre atanabileceği en erken istasyon

L_i : i görevinin öncelik ilişkisine göre atanabileceği en geç istasyon

P_i : i görevinin öncüllerinin kümesi

S_i : i görevinin ardıllarının kümesi

Amaç Fonksiyonu

BMHDP-I amaç istasyon sayısının enküçüklenmesidir. 6.4 no'lu denklemde amaç fonksiyonu matematiksel olarak gösterilmektedir.

$$\text{Minimum } \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j \dots\dots\dots (6.4)$$

Atama kısıtı

Montaj hattı dengeleme probleminde görevler bölünemez en küçük iş parçası olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle her görevin tek bir istasyona atanması gerekir. Bu kısıt matematiksel olarak 6.5 no'lu denklemde verilmektedir.

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \dots\dots\dots (6.5)$$

Burada E_i ve L_i , i . işin en erken ve en geç atanabileceği iş istasyonu indisini göstermekte olup 6.6 ve 6.7 no'lu eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E_i = \left[(t_i + \sum_{j \in P_i} t_j) / C \right]^+ \dots \dots \dots (6.6)$$

$$L_i = m_{\max} + 1 - \left[(t_i + \sum_{j \in S_i} t_j) / C \right]^+ \dots \dots \dots (6.7)$$

Burada m_{\max} değeri, maksimum istasyon sayısı olup 6.8 no'lu denklem ile hesaplanmaktadır (Urban 1998).

$$m_{\max} = m_{\min} + 1 \dots \dots \dots (6.8)$$

İstasyon kısıtı

Bir istasyonun açılabilmesi için doğal olarak bu istasyona en az bir görevin atanmış olması gerekir. Eğer herhangi bir iş istasyonuna iş atanması yapılmış ise 6.9 no'lu kısıt sağlanmalıdır.

$$\sum_{i \in W_j} x_{ij} - \|W_j\| z_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots \dots \dots (6.9)$$

Çevrim zamanı kısıtı

Herhangi bir iş istasyonuna atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamı, çevrim zamanını aşamaz. Bu kısıt matematiksel olarak 6.10 no'lu denklemle ifade edilebilir.

$$\sum_{i \in W_j} t_i x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots \dots \dots (6.10)$$

Öncelik ilişkileri kısıtı

Bir görevin bir istasyona atanabilmesi için bu görevin öncüllerinin daha önce bir istasyona atanmış olması gerekir. Bunu yaparken öncelik diyagramları esas alınarak her bir görevin öncüller kümesi oluşturulur. Daha sonra (6.6) ve (6.7) no'lu denklemlerden faydalanılarak her bir görev için en erken atanabileceği istasyon ve en geç atanabileceği

istasyonlar belirlenir. 6.11 no'lu kısıt ise, öncelik ilişkilerinin korunarak görevlerin istasyonlara atanması sağlar.

$$\sum_{j=E_a}^{L_a} j(x_{a_j}) - \sum_{j=E_b}^{L_b} j(x_{b_j}) \leq 0 \quad \forall (a, b) \in P \dots\dots\dots(6.11)$$

Bu açıklamalar doğrultusunda BMHDP-I için geliştirilen model toplu olarak 6.12'de verilmektedir.

$$\text{Minimum} \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j$$

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i \in W_j} t_i x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, m_{\max}$$

$$\sum_{j=E_a}^{L_a} j(x_{a_j}) - \sum_{j=E_b}^{L_b} j(x_{b_j}) \leq 0 \quad \forall (a, b) \in P, \dots\dots\dots(6.12)$$

$$\sum_{i \in W_j} x_{ij} - \|W_j\| z_j \leq 0 \quad j=1, \dots, m_{\max}$$

$$x_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j.$$

6.2. Ergonomik MHDP

Yukarıdaki model klasik montaj hattı dengeleme problemleri için geliştirilmiş bir modeldir. Ancak bu modelde amaç, sadece öncüllük kısıtlarını sağlayarak ve her görevi yalnız bir istasyona atayarak belirli bir çevrim süresi için minimum istasyon sayısını sağlayacak şekilde görevleri iş istasyonlarına atamaktır. Oysa gerçek yaşam problemleri için bu model, çoğu zaman eksik ya da yetersiz kalmaktadır.

Bu tez çalışması ile, ergonomik faktörleri de dikkate alan bir montaj hattı dengeleme modeli geliştirilmiştir.

Ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP'nin varsayımları:

- Montaj hattında tek bir ürünün montajı büyük miktarlarda gerçekleşmektedir.
- Problemin öncelik diyagramı bilinmektedir.
- Bir görev iki ya da daha fazla iş istasyonu arasında bölüştürülemez.
- Bir görev kendisinden önce gelen görevler (öncülleri) tamamlanmadan başlayamaz.
- Görevlerin zorluk dereceleri, taşıdığı risk düzeyi ve monotonluk seviyesi bilinmektedir ve toplanabilmektedir.
- Görev zamanları deterministiktir. Ancak, tüm görevlerin zorluk dereceleri, risk düzeyi ve monotonluk seviyesi dikkate alınarak, görevlerin istasyonlara atanması yapılacağından, çevrim zamanı bulanık olarak kabul edilmektedir.

Ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP'nin kısıtları:

- Atama kısıtı
- Çevrim zamanı kısıtı
- Öncelik ilişkileri kısıtı
- Zorluk derecesi kısıtı
- Risk derecesi kısıtı
- Monotonluk kısıtı

Ergonomik kısıtlar şu şekildedir:

Zorluk derecesi kısıtı

Montaj hattında fiziksel çaba gerektiren görevlerin atamasını yaparken tüm zor görevlerin aynı istasyona ya da aynı işçiye atanmasını engellemek için 6.13 no'lu kısıt modele ilave edilmiştir. Burada, her bir görevin zorluk derecesi uzman ve çalışanın ortak görüşü doğrultusunda ifade edilmekte, daha sonra bu sözel ifadeler, değerlendirme skalası kullanılarak bulanık sayılara dönüştürülmektedir. Daha sonra, üretimin yapısı ve işletme koşulları dikkate alınarak belirlenen her bir istasyonda çalışan işçinin dayanabileceği zorluk derecesi belirlenerek, bu zorluk derecesini tüm istasyonlarda aşmamak üzere atama yapılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i \in W_k} h_i(x_{ij}) \leq H_j \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.13)$$

h_i : i görevinin zorluk derecesi

H_j : j istasyonunda işçilerin dayanabileceği maksimum zorluk derecesi

Risk derecesi kısıtı

Farklı sektörlerde farklı görevlerin yapılması sırasında tehlike riski oluşabilir ve tüm tehlike riski taşıyan işlerin aynı istasyona ya da aynı işçiye atanmasını engellemek için 6.14 no'lu kısıt modele eklenmiştir. Burada da uzman görüşünden yararlanılmakta ve her bir görevin taşıdığı tehlike riski belirlenerek karar vericinin istediği, tehlike riski düzeyi aşılmadan istasyonlara görevlerin atanması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i \in W_k} r_i(x_{ij}) \leq R_j \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.14)$$

r_i : i görevinin taşıdığı risk düzeyi

R_j : j istasyonunda işçilerin dayanabileceği maksimum risk düzeyi

Görevin Monotonluk Düzeyi

Montaj hatlarının pek çok avantajı olmasına rağmen, montaj hatlarına getirilen en büyük eleştiri, sürekli aynı işleri yapan işçilerin monotonluk nedeniyle yaptıkları işten yeterince tatmin olamamasıdır. Bu modele eklenen 6.15 no'lu denklem kullanılarak görevlerin işçilere atanması yapılırken monotonluk düzeyi dikkate alınarak eşit dağıtım yapılması hedeflenmektedir. Burada da yine çalışanlar ve uzman görüşleri doğrultusunda değerlendirme yapılmakta ve karar vericinin belirlediği seviye aşılmayacak şekilde istasyonlara görevlerin atanması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i \in W_k} b_i(x_{ij}) \leq B_j \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.15)$$

b_i : i görevinin monoton ve sıkıcılık derecesi

B_j : j istasyonunda işçilerin dayanabileceği maksimum sıkıcılık derecesi

Ergonomik düzenlemeler ile BMHDP- Tip I için geliştirilen model toplu olarak 6.16'de verilmektedir.

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimum } \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i \in W_j} t_i x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, m_{\max}$$

$$\sum_{j \in E_a}^{L_a} j(x_{aj}) - \sum_{j \in E_b}^{L_b} j(x_{bj}) \leq 0 \quad \forall (a, b) \in P,$$

$$\sum_{i \in W_j} x_{ij} - \|W_j\| z_j \leq 0 \quad j=1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.16)$$

$$\sum_{i \in W_k} h_i(x_{ij}) \leq H_j \quad j = 1, \dots, m_{\max}$$

$$\sum_{i \in W_k} r_i(x_{ij}) \leq R_j \quad j = 1, \dots, m_{\max}$$

$$\sum_{i \in W_k} b_i(x_{ij}) \leq B_j \quad j = 1, \dots, m_{\max}$$

$$x_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j.$$

6.3 Bulanık Doğrusal Programlama ile Ergonomik MHDP Modeli

Yukarıda detaylı olarak açıklanan ergonomik montaj hattı dengeleme modelinde, kısıtları incelendiğinde atama ve öncelik ilişkileri kısıtlarının deterministik ancak ergonomik faktörler olarak modele ilave edilen zorluk derecesi, risk derecesi ve sıkıcılık düzeyini belirleyen kısıtların bulanıklık içerdiği görülmektedir. Bu durum 0-1 tamsayılı programlama ile çözüm aranan BMHDP'ne farklı bir açıdan yaklaşılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bulanıklığın söz konusu olduğu yeni modelde, karar verici önceden belirlediği çevrim süresine ve ergonomik kriterlere mümkün olduğunca ulaşmak istemekte, aynı zamanda bu amacı gerçekleştirirken istasyon sayısının belli toleranslar dahilinde kalmasını arzu etmektedir. Bu durumda, yeni modelde bulanıklık durumunu dikkate alan düzenlemeler yapmak gerekmektedir. Bu düzenlemeler aşağıda açıklanmaktadır.

Bulanık çevrim zamanı

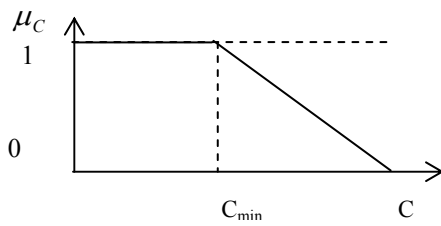
Her ne kadar çevrim zamanı, deterministik bir değer olsa da modelin çözümünde esnekliğin sağlanabilmesi için bulanık olarak alınmıştır. Modelde dikkate alınan risk, zorluk ve monotonluk derecelerinin dengeli bir şekilde dağıtılabilmesi için bu esnekliğin verilmesi gerekmektedir.

Modelde çevrim zamanı, bulanık olarak ele alındığından buna karşı gelen kısıt 6.17'deki gibi bulanık olarak ifade edilmektedir. Bu kısıt, karar vericinin, her iş istasyonunun çevrim zamanının “C civarında” olmasını istemektedir şeklinde yorumlanabilir.

$$\sum_{i \in w_k} t_i(x_{ij}) \leq C_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots \dots \dots (6.17)$$

Şekil 6.1'de çevrim süresinin bulanık olarak ifade etmek için kullanılan üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. C_{\min} , istenilen istasyon sayısı için gerekli minimum çevrim zamanını ya da karar vericinin istediği çevrim zamanı alt sınırını ifade etmektedir. C ise, çevrim zamanı üst sınırınıdır. Burada eğer karar vericinin istediği çevrim zamanı alt sınırına ulaşırsa, üyelik fonksiyonu $\mu_C=1$ değerini alacaktır. Belirlenen tolerans

aralığında çevrim zamanı üst sınırı aşıldığı takdirde ise, $\mu_C=0$ değerini alacaktır.



Şekil 6.1 Çevrim zamanı üyelik fonksiyonu

Çevrim süresi için tanımlanan üyelik fonksiyonu 6.18 no'lu eşitlikte verilmektedir.

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > C \\ 1 - \frac{(Ax)_i - C_{\min}}{C - C_{\min}} & \text{eğer } C_{\min} \leq (Ax)_i \leq C \dots\dots\dots(6.18) \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < C_{\min} \end{cases}$$

Burada $(Ax)_i$ çevrim süresine karşı gelen kısıtı göstermektedir.

Bulanık istasyon sayısı

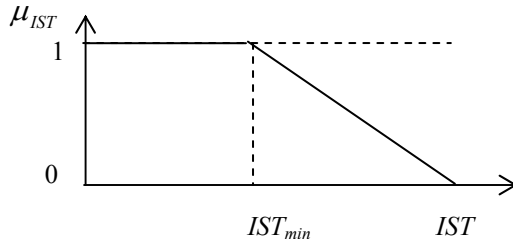
Çevrim zamanı bulanık olarak alındığı için, doğal olarak istasyon sayısının da bulanık olarak alınması gerekir. Yeni modelde, karar vericinin amacı, klasik modeldeki gibi istasyon sayısını en küçükleme olmakla birlikte, belirli bir değer aralığında olması da eş zamanlı olarak istenmektedir. Bu nedenle modelde amaç fonksiyonu, 6.19'daki gibi bulanık olarak ifade edilecektir.

$$mi\tilde{n} \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j \dots\dots\dots(6.19)$$

Eğer karar verici maksimum ve minimum istasyon sayısını önceden tespit edebilirse 6.19'daki bulanık amaç fonksiyonu, 6.20'deki gibi bulanık kısıta dönüştürülebilir.

$$\sum_j^{m_{\max}} z_j \lesseqgtr IST_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.20)$$

Burada $\dot{I}ST_{min}$, arzu edilen minimum istasyon sayısıdır. İstasyon sayısı için tanımlanan üyelik fonksiyonu, Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Burada $\dot{I}ST$, maksimum istasyon sayısıdır.



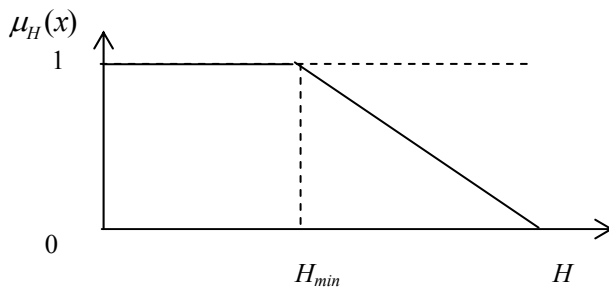
Şekil 6.2 İstasyon sayısı üyelik fonksiyonu

Bulanık olarak ifade edilen istasyon sayısı için üyelik fonksiyonu, 6.21’deki verilmektedir.

$$\mu_{IST}(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > IST \\ 1 - \frac{(Ax)_i - IST_{min}}{IST - IST_{min}} & \text{eğer } IST_{min} \leq (Ax)_i \leq IST \dots\dots\dots(6.21) \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < IST_{min} \end{cases}$$

Bulanık zorluk derecesi

Bu tez çalışmasında geliştirilen ergonomik faktörleri dikkate alan modelde, öncelikle işlerin zorluk dereceleri belirlenmekte ve daha sonra karar vericinin tüm iş istasyonlarında ulaşmak istediği zorluk derecesi tanımlanmaktadır. Tüm iş istasyonlar için zorluk derecesi, “yaklaşık H_{min} değeri civarında” olması arzu edilmektedir.



Şekil 6.3 Zorluk derecesi üyelik fonksiyonu

Şekil 6.3'te zorluk derecesi için kullanılan üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. H_{min} , her istasyon için arzu edilen zorluk seviyesini; H ise, maksimum zorluk seviyesini göstermektedir. Zorluk seviyesi için üyelik fonksiyonu, 6.22 no'lu eşitlikte verilmektedir.

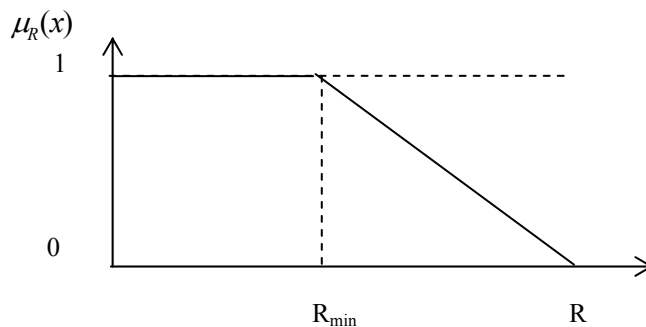
$$\mu_H(x) = \begin{cases} 0 & (Ax)_i > H \\ 1 - \frac{(Ax)_i - H_{min}}{H - H_{min}} & H_{min} \leq (Ax)_i \leq H \\ 1 & (Ax)_i < H_{min} \end{cases} \dots\dots\dots(6.22)$$

Modele ilave edilen zorluk derecesi kısıtı, 6.23'te verilmektedir. Bu kısıt ile amaçlanan, gerçek anlamda montaj hattında dengeye ulaşabilmek için, çalışanlar ve uzmanlar tarafından belirlenen her bir görevin zorluk derecelerini dikkate alarak tüm iş istasyonlarında homojen bir yapı elde edebilmektir. Böylece, her iş istasyonunda çalışan, işgören zorluk derecesi açısından birbirlerine neredeyse denk iş yapacaklar ve çalışma performansları açısından daha adil bir sistem işleyecektir.

$$\sum_{i \in w_k} h_i(x_{ij}) \leq H_{min} \quad j = 1, \dots, m_{max} \dots\dots\dots(6.23)$$

Bulanık risk derecesi

Ergonomik faktörleri dikkate alan modelde bir diğer faktör de işlerin taşıdığı tehlike riskidir. Risk derecesinin her istasyon için “yaklaşık R değeri civarında” olması arzu edilmektedir. Risk derecesi için kullanılan üyelik fonksiyonu, Şekil 6.4'te grafik olarak gösterilmektedir. Burada R_{min} , minimum risk seviyesi; R ise, maksimum risk seviyesini göstermektedir. Risk seviyesi için kullanılan üyelik fonksiyonu 6.24'te verilmektedir.



Şekil 6.4 Risk derecesi üyelik fonksiyonu

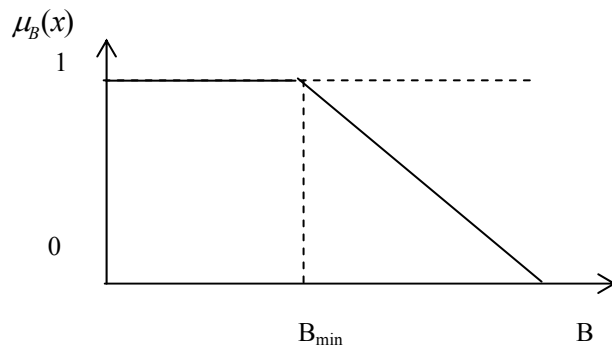
$$\mu_R(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > R \\ 1 - \frac{(Ax)_i - R_{\min}}{R - R_{\min}} & \text{eğer } R_{\min} \leq (Ax)_i \leq R \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < R_{\min} \end{cases} \dots\dots\dots(6.24)$$

Risk seviyelerine ilişkin olarak her istasyon için modele 6.24'teki kısıt eklenmelidir. Bu kısıt ile amaçlanan gerçek anlamda montaj hattında dengeye ulaşabilmek için, çalışanlar ve uzmanlar tarafından belirlenen her bir görevin taşıdığı tehlike riskini de dikkate alarak tüm iş istasyonlarında homojen bir yapı elde edebilmektir. Böylece, her iş istasyonunda tehlike riski açısından çalışanlar, denk iş yapacaklar ve özellikle iş kazaları açısından çok daha güvenli bir durum oluşturulmuş olacaktır.

$$\sum_{i \in w_k} r_i(x_{ij}) \leq R_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.25)$$

Görevin Monotonluk Derecesi

Montaj hatlarının pek çok faydası olmakla birlikte, geliştirildiği ilk günden itibaren bu hatlara getirilen en büyük eleştiri, monotonluk sonucunda ortaya çıkan sıkıcılık faktörüdür. Montaj hatlarının ana mantığını oluşturan işçilerin sürekli aynı işleri yapması, zamanla çalışanın yaptığı işten sıkılmasına sebep olmakta bu da verimlilikte kayıplara yol açmaktadır. Bu tezde geliştirilen matematiksel modelin dikkate aldığı bir diğer ergonomik faktör, işlerin monotonluk düzeyidir. İstasyonlar için monotonluk düzeyinin, “yaklaşık B_{\min} değeri civarında” olması arzu edilmektedir. Şekil 6.5'te monotonluk düzeyi için kullanılan üyelik fonksiyonu verilmektedir. B_{\min} , minimum monotonluk düzeyini; B ise, maksimum monotonluk düzeyini göstermektedir. Monotonluk düzeyi için tanımlanan üyelik fonksiyonu 6.26'da verilmektedir.



Şekil 6.5 Monotonluk derecesi üyelik fonksiyonu

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > B \\ 1 - \frac{(Ax)_i - B_{\min}}{B - B_{\min}} & \text{eğer } B_{\min} \leq (Ax)_i \leq B \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < B_{\min} \end{cases} \dots\dots\dots(6.26)$$

Monotonluk düzeyi için modele 6.27'deki kısıtın ilave edilmesi gerekir. Böylece, her iş istasyonunda çalışan işgören işlerin zamanla oluşturduğu monotonluk düzeyi açısından da birbirlerine neredeyse denk iş yapacaklardır.

$$\sum_{i \in W_k} b_i(x_{ij}) \leq B_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \dots\dots\dots(6.27)$$

Ergonomik faktörler dikkate alınırken geliştirilen model 6.28'de toplu olarak verilmektedir.

$$\begin{aligned} & \text{miñ} \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j \\ & \sum_{j \in E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_j^{m_{\max}} z_j \leq IST \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & \sum_{i \in W_k} t_i(x_j) \leq C_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & \sum_{j \in E_a}^{L_a} j(x_{a_j}) - \sum_{j \in E_b}^{L_b} j(x_{b_j}) \leq 0 \quad \forall (a, b) \in P \dots\dots\dots(6.28) \\ & \sum_{i \in W_{ij}} (x_j) - \|W_j\| z_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & \sum_{i \in W_k} h_i(x_{ij}) \leq H_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & \sum_{i \in W_k} r_i(x_{ij}) \leq R_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & \sum_{i \in W_i} b_i(x_{ij}) \leq B_{\min} \quad j = 1, \dots, m_{\max} \\ & x_{ij}, z_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j. \end{aligned}$$

Ergonomik faktörleri dikkate alan yukarıda model, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcı simetrik bir doğrusal programlama modelidir. Zimmermann tarafından önerilen yaklaşım dördüncü bölümde anlatıldığı gibi, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcılar için toleranslar kullanıldığında, maksimizasyon kararı olan bir doğrusal programlama modeline dönüştürülerek çözülmektedir. Burada, ek bir değişken olan λ 'nın kullanılması ile, simetrik bulanık doğrusal programlama modeli, geleneksel bir doğrusal programlama modeli olarak ifade edilmektedir. λ değişkeni, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların çözüm vektörü x tarafından eşanlı doyurulma derecesini göstermektedir (Özkan 2003). Modeli düzenlendiğinde, 6.29'daki geleneksel doğrusal programlama problemi elde edilmektedir.

maks λ

$$\mu_C(x) \geq \lambda$$

$$\mu_{IST}(x) \geq \lambda$$

$$\mu_H(x) \geq \lambda \dots\dots\dots(6.29)$$

$$\mu_R(x) \geq \lambda$$

$$\mu_B(x) \geq \lambda$$

$$\lambda \in [0,1]$$

maks λ

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} x_{ij} = 1$$

$$\sum_{j \in E_a}^{L_a} j(x_{a_j}) - \sum_{j \in E_b}^{L_b} j(x_{b_j}) \leq 0$$

$$\sum_{i \in W_k} t_i(x_j) + p_1 \lambda \leq C_{\min} + p_1$$

$$\sum_j^{m_{\max}} z_j + p_2 \lambda \leq IST_{\min} + p_2$$

$$\sum_{i \in W_k} h_i(x_{ij}) + p_3 \lambda \leq H_{\min} + p_3$$

$$\sum_{i \in W_k} r_i(x_{ij}) + p_4 \lambda \leq R_{\min} + p_4$$

$$\sum_{i \in W_i} b_i(x_{ij}) + p_5 \lambda \leq B_{\min} + p_5$$

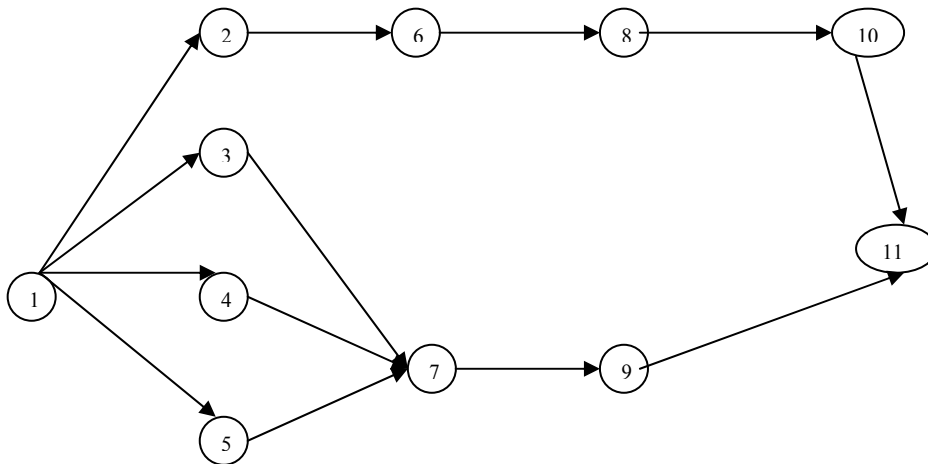
$$\lambda \in [0,1] \dots\dots\dots(6.30)$$

Bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların üyelik fonksiyonları modelde yerine konulduğunda, 6.30'daki doğrusal programlama modeline ulaşılmaktadır. Burada p_i , i . bulanık kısıtının tolerans değerini göstermektedir.

6.4 Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Modeli İçin Bir Uygulama

Bu tez çalışmasında geliştirilen ergonomik faktörleri dikkate alan bulanık tamsayı programlama modeli, literatürde yer alan test problemlerinden Jackson (1956) problemi üzerinde uygulanmış ve oluşturulan model LINGO paket programı ile çözülmüştür.

Problemden karar vericinin ulaşmak istediği istasyon sayısı "4 veya 5" istasyon şeklindedir. Planlanan çevrim süresi ise 11 dakika olup, 16 dakikaya kadar izin verilmektedir. Görevlerin öncelik ilişkileri Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6 Örnek problemin öncelik diyagramı

Bu problemin ergonomik faktörler dikkate alınarak yeniden modellenmesi için görevlere ilişkin zorluk derecesi, risk derecesi ve monotonluk düzeyinin belirlenmesi gerekmektedir. Her bir görev için bu değerler, rastsal olarak belirlenmiştir. Ancak uygulamada karşılaşılan montaj hattı dengeleme problemlerinde, bu değerler çalışanlar ve uzmanlarla yapılan görüşmeler sonunda elde edilmelidir.

Probleme ilişkin görevlerin işlem süreleri, zorluk dereceleri, risk seviyeleri ve monotonluk düzeyi Tablo 6.2'de verilmiştir. Tablo 6.1'de yer alan ergonomik özellikler, dilsel değişkenlerle ifade edilmiştir.

Tablo 6.1 Ergonomik faktör derecelendirme skalası

| BULANIK SAYI | DİLSEL DEĞİŞKEN | | |
|--------------|-----------------|---------------|---------------------|
| | Zorluk Derecesi | Risk Derecesi | Monotonluk Derecesi |
| 1 | Kolay | Risksiz | Monoton değil |
| 2 | Biraz Zor | Biraz riskli | Biraz Monoton |
| 3 | Zor | Tehlikeli | Monoton |
| 4 | Çok Zor | Çok Tehlikeli | Çok Monoton |

Daha sonra bu değerler Tablo 6.2’de verilen skala kullanılarak sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Ayrıca, karar verici, her bir istasyon için zorluk derecesinin, risk derecesinin ve monotonluk seviyesinin sınırlarını belirlemesi gerekmektedir. Problemden istasyonlar için zorluk derecesi 5, risk seviyesi 6 ve monotonluk düzeyi 7 olarak alınmıştır.

Tablo 6.2 Örnek problemin görevler ve özellikleri

| Görevler | Görev Süreleri | Zorluk Dereceleri | Risk Dereceleri | Monotonluk Düzeyi |
|----------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 6 | Zor | Riskli | Çok Monoton |
| 2 | 2 | Kolay | Riskli değil | Monoton |
| 3 | 5 | Çok zor | Riskli | Monoton |
| 4 | 7 | Kolay | Riskli değil | Çok Monoton |
| 5 | 1 | Zor | Biraz Riskli | Biraz Monoton |
| 6 | 2 | Biraz Zor | Biraz Riskli | Monoton |
| 7 | 3 | Zor | Biraz Riskli | Biraz Monoton |
| 8 | 6 | Zor | Riskli | Biraz Monoton |
| 9 | 5 | Çok Zor | Riskli | Çok Monoton |
| 10 | 5 | Biraz Zor | Biraz Riskli | Monoton |
| 11 | 4 | Zor | Riskli | Çok Monoton |

Verilen bilgiler doğrultusunda, Jackson problemi için ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP’nin matematiksel modelde, 6.31 no’lu denklem, amaç fonksiyonunu göstermektedir. Burada karar verici istasyon sayısının yaklaşık olarak 4 yada 5 olmasını istemektedir. Modele ait kısıtlar ayrı ayrı ele alınıp aşağıda açıklanmaktadır.

$$\min \sum_{j=1}^4 z_j \dots\dots\dots (6.31)$$

İstasyon kısıtı

MHDP'ne eklenen 6.32 no'lu kısıt, istasyona görev atanması durumunda, istasyonun açılmasını ve z_j 'nin 1 değerini almasını, açılmaması durumunda ise 0 değerini almasını sağlamaktadır.

$$\begin{aligned}
 x_{11} + x_{21} + x_{51} + x_{61} - 4z_1 &\leq 0 \\
 x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} + x_{62} + x_{82} + x_{10,2} - 8z_2 &\leq 0 \\
 x_{23} + x_{33} + x_{43} + x_{53} + x_{63} + x_{73} + x_{83} + x_{93} + x_{10,3} - 9z_3 &\leq 0 \\
 x_{24} + x_{34} + x_{44} + x_{54} + x_{64} + x_{74} + x_{84} + x_{94} + x_{104} - 9z_4 &\leq 0 \\
 x_{25} + x_{35} + x_{45} + x_{55} + x_{65} + x_{75} + x_{85} + x_{95} + x_{105} + x_{115} - 10z_5 &\leq 0 \\
 x_{96} + x_{10,6} + x_{11,6} - 3z_6 &\leq 0
 \end{aligned} \tag{6.32}$$

Her bir görevin yalnızca bir istasyona atanması kısıtı

Bu kısıtın oluşturulabilmesi için her bir görevin atanabileceği en erken ve en geç istasyonun bulunması gerekmektedir. Problemdaki öncelik ilişkilerinden hareketle hesaplanan E_i ve L_i değerleri Tablo 6.3'te verilmektedir.

Tablo 6.3 Örnek problemin E_i ve L_i değerleri

| Görev | E_i | L_i |
|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 5 |
| 3 | 2 | 4 |
| 4 | 2 | 5 |
| 5 | 1 | 5 |
| 6 | 1 | 5 |
| 7 | 3 | 5 |
| 8 | 2 | 5 |
| 9 | 3 | 6 |
| 10 | 2 | 6 |
| 11 | 5 | 6 |

Bu değerlere göre her bir işin atanabileceği istasyonlar 6.33 no'lu kısıtta verilmektedir.

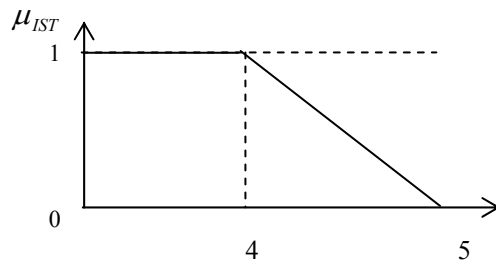
$$\begin{aligned}
x_{11} + x_{12} &= 1 \\
x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} &= 1 \\
x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} &= 1 \\
x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} &= 1 \\
x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} &= 1 \\
x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} &= 1 \dots\dots\dots(6.33) \\
x_{73} + x_{74} + x_{75} &= 1 \\
x_{82} + x_{83} + x_{84} + x_{85} &= 1 \\
x_{93} + x_{94} + x_{95} + x_{96} &= 1 \\
x_{10,2} + x_{10,3} + x_{10,4} + x_{10,5} + x_{10,6} &= 1 \\
x_{11,5} + x_{11,6} &= 1
\end{aligned}$$

İstasyon sayısı kısıtı

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 \leq 4 \dots\dots\dots(6.34)$$

Örnek problem için karar vericinin hedeflediği istasyon sayısı 4'tür. Bu durum, 6.34 ile sağlanmaktadır. Karar verici tarafından izin verilen tolerans ise 1'dir. En fazla 5 iş istasyonunun açılmasına izin verilmektedir. İstasyon sayısına ilişkin üyelik fonksiyonu, 6.35 no'lu denklemde verilmiş olup, Şekil 6.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$\mu_{IST}(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > 5 \\ f_i(Ax_i) & \text{eğer } 4 \leq (Ax)_i \leq 5 \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < 4 \end{cases} \dots\dots\dots(6.35)$$



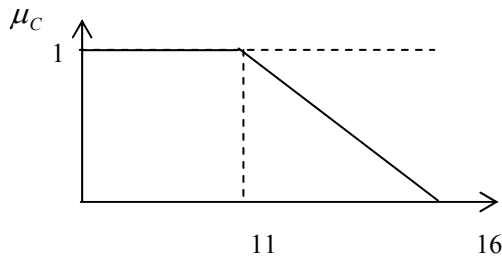
Şekil 6.7 İstasyon sayısı üyelik fonksiyonu

Çevrim zamanı kısıtı

Örnek problem için karar verici, çevrim zamanının 11 dakika olmasını hedeflemektedir. Ancak ergonomik açıdan hattın dengelenebilmesi için 16 dakikalık

çevrim zamanına kadar izin vermektedir. Modele 6.37 no'lu kısıt ilave edilerek koşul sağlanmaktadır. Çevrim zamanına ilişkin üyelik fonksiyonu ise, 6.38 no'lu denklemde verilmiş olup, Şekil 6.8'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 6x_{11} + 2x_{21} + x_{51} + 2x_{61} &\leq 11 \\
 6x_{12} + 2x_{22} + 5x_{32} + 7x_{42} + x_{52} + 2x_{62} + 6x_{82} + 5x_{102} &\leq 11 \\
 2x_{23} + 5x_{33} + 7x_{43} + x_{53} + 2x_{63} + 3x_{73} + 6x_{83} + 5x_{93} + 5x_{10,3} &\leq 11 \\
 2x_{24} + 5x_{34} + 7x_{44} + x_{54} + 2x_{64} + 3x_{74} + 6x_{84} + 5x_{94} + 5x_{10,4} &\leq 11 \\
 2x_{25} + 5x_{35} + 7x_{45} + x_{55} + 2x_{65} + 3x_{75} + 6x_{85} + 5x_{95} + 5x_{10,5} + 4x_{11,5} &\leq 11 \\
 5x_{96} + 5x_{10,6} + 4x_{11,6} &\leq 11
 \end{aligned} \tag{6.37}$$



Şekil 6.8 Çevrim zamanı üyelik fonksiyonu

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > 16 \\ f_i(Ax_i) & \text{eğer } 11 \leq (Ax)_i \leq 16 \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < 11 \end{cases} \tag{6.38}$$

Öncelik ilişkileri kısıtı

BMHDP-I'in temel kısıtlarından biri olan öncelik ilişkileri kısıtı, ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP için de değişmemektedir. Bu kısıt belirsizlik içermediğinden bulanık değil, doğrusal olarak ifade edilmektedir. Örnek probleme ait öncelik ilişkileri kısıtı modelde 6.39 no'lu denklem ile sağlanmaktadır.

Zorluk Derecesi kısıtı

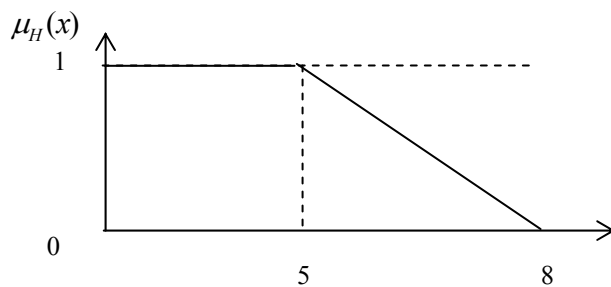
Problemdede, karar vericinin hedeflediği istasyon zorluk derecesi 5'tir. Bu durum, 6.40 ile sağlanmaktadır. Karar verici tarafından izin verilen tolerans ise 3'tür. Burada, karar vericinin derecelendirme skalasını kullandığı ve her iş istasyonunda en fazla iki tane çok zor işin aynı işçi tarafından yapılacağı varsayımı yapılmıştır. İstasyonlardaki

işlerin zorluk derecesine ait üyelik fonksiyonu, 6.41 no'lu denklemde verilmiş olup, Şekil 6.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
x_{11} + 2x_{12} - x_{21} - 2x_{22} - 3x_{23} - 4x_{24} - 5x_{25} &\leq 0 \\
x_{11} + 2x_{12} - 2x_{32} - 3x_{33} - 4x_{34} - 5x_{35} &\leq 0 \\
x_{11} + 2x_{12} - 2x_{42} - 3x_{43} - 4x_{44} - 5x_{45} &\leq 0 \\
x_{11} + 2x_{12} - x_{51} - 2x_{52} - 3x_{53} - 4x_{54} - 5x_{55} &\leq 0 \\
x_{21} + 2x_{22} + 3x_{23} + 4x_{24} + 5x_{25} - x_{61} - 2x_{62} - 3x_{63} - 4x_{64} - 5x_{65} &\leq 0 \\
2x_{32} + 3x_{33} + 4x_{34} + 5x_{35} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} &\leq 0 \\
2x_{42} + 3x_{43} + 4x_{44} + 5x_{45} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} &\leq 0 \dots\dots\dots(6.39) \\
x_{51} + 2x_{52} + 3x_{53} + 4x_{54} + 5x_{55} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} &\leq 0 \\
x_{61} + 2x_{62} + 3x_{63} + 4x_{64} + 5x_{65} - 2x_{82} - 3x_{83} - 4x_{84} - 5x_{85} &\leq 0 \\
3x_{73} + 4x_{74} + 5x_{75} - 3x_{93} - 4x_{94} - 5x_{95} - 6x_{96} &\leq 0 \\
2x_{82} + 3x_{83} + 4x_{84} + 5x_{85} - 2x_{10,2} - 3x_{10,3} - 4x_{10,4} - 5x_{10,5} - 6x_{10,6} &\leq 0 \\
3x_{93} + 4x_{94} + 5x_{95} + 6x_{96} - 5x_{11,5} - 6x_{11,6} &\leq 0 \\
2x_{10,2} + 3x_{10,3} + 4x_{10,4} + 5x_{10,5} + 6x_{10,6} - 5x_{11,5} - 6x_{11,6} &\leq 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
3x_{11} + 2x_{21} + 3x_{51} + 2x_{61} &\leq 5 \\
3x_{12} + 2x_{22} + x_{32} + 2x_{42} + 3x_{52} + 2x_{62} + 2x_{82} + 3x_{10,2} &\leq 5 \\
x_{33} + 2x_{43} + 3x_{53} + 2x_{63} + 2x_{73} + 2x_{83} + 3x_{93} + 3x_{10,3} &\leq 5 \\
2x_{24} + x_{34} + 2x_{44} + 3x_{54} + 2x_{64} + 2x_{74} + 2x_{84} + 3x_{94} + 3x_{10,4} &\leq 5 \dots\dots\dots(6.40) \\
2x_{25} + x_{35} + 2x_{45} + 3x_{55} + 2x_{65} + 2x_{75} + 2x_{85} + 3x_{95} + 3x_{10,5} + 3x_{11,5} &\leq 5 \\
3x_{96} + 3x_{10,6} + 3x_{11,6} &\leq 5
\end{aligned}$$

$$\mu_H(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > 8 \\ f_i(Ax_i) & \text{eğer } 5 \leq (Ax)_i \leq 8 \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < 5 \end{cases} \dots\dots\dots(6.41)$$



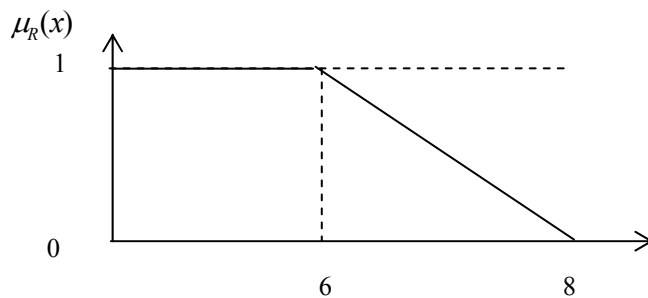
Şekil 6.9 Zorluk derecesi üyelik fonksiyonu

Risk Derecesi kısıtı

Problemde, karar vericinin hedeflediği istasyon risk derecesi 6'dır. Bu durum, 6.42 ile sağlanmaktadır. Karar verici tarafından izin verilen tolerans ise 2'dir. İstasyonlardaki işlerin taşıdığı tehlike riski düzeyine ait üyelik fonksiyonu, 6.43 no'lu denklemde verilmiş olup, Şekil 6.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 2x_{11} + 3x_{21} + 3x_{51} + 2x_{61} &\leq 6 \\
 2x_{12} + 3x_{22} + 2x_{32} + 3x_{42} + 3x_{52} + 2x_{62} + x_{82} + x_{10,2} &\leq 6 \\
 2x_{33} + 3x_{43} + 3x_{53} + 2x_{63} + 2x_{73} + x_{83} + 2x_{93} + x_{10,3} &\leq 6 \\
 3x_{24} + 2x_{34} + 3x_{44} + 3x_{54} + 2x_{64} + 2x_{74} + 2x_{84} + 2x_{94} + x_{10,4} &\leq 6 \\
 3x_{25} + 2x_{35} + 3x_{45} + 3x_{55} + 2x_{65} + 2x_{75} + x_{85} + 2x_{95} + x_{10,5} + 3x_{11,5} &\leq 6 \\
 2x_{96} + 1x_{10,6} + 3x_{11,6} &\leq 6
 \end{aligned} \dots\dots\dots(6.42)$$

$$\mu_R(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > 8 \\ f_i(Ax_i) & \text{eğer } 6 \leq (Ax)_i \leq 8 \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < 6 \end{cases} \dots\dots\dots(6.43)$$



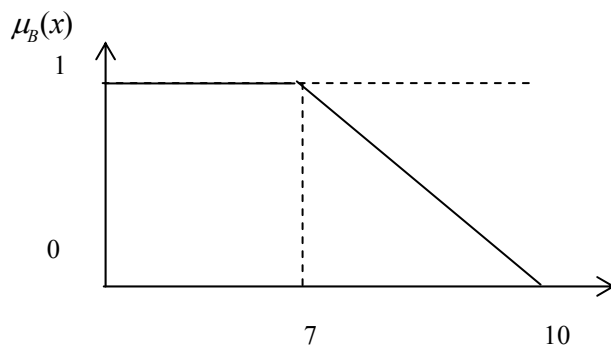
Şekil 6.10 Risk derecesi üyelik fonksiyonu

Monotonluk Kısıtı

Problemde, dikkate alınan son ergonomik faktör, monotonluktur ve karar vericinin hedeflediği monotonluk düzeyi her iş istasyonu için 7'dir. Bu durum, 6.44 ile sağlanmaktadır. Karar verici tarafından izin verilen tolerans ise 3'tür. İstasyonlardaki işlerin tekrarı ve sıkıcılığı dikkate alınarak monotonluk düzeyi dilsel değişkenlerle tanımlanmakta ve derecelendirme skalası kullanılarak dönüştürme yapıldığı varsayılmaktadır. Monotonluk düzeyine ait üyelik fonksiyonu, 6.45 no'lu denklemde verilmiş olup, Şekil 6.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
3x_{11} + 3x_{21} + 2x_{51} + 3x_{61} &\leq 7 \\
3x_{12} + 3x_{22} + 3x_{32} + 2x_{42} + 2x_{52} + 3x_{62} + 3x_{82} + x_{102} &\leq 7 \\
3x_{33} + 2x_{43} + 2x_{53} + 3x_{63} + x_{73} + 3x_{83} + 2x_{93} + 2x_{103} &\leq 7 \\
3x_{24} + 3x_{34} + 2x_{44} + 2x_{54} + 3x_{64} + x_{74} + 2x_{84} + 2x_{94} + 2x_{104} &\leq 7 \\
3x_{25} + x_{35} + 2x_{45} + 2x_{55} + 3x_{65} + x_{75} + 3x_{85} + 2x_{95} + 2x_{105} + 3x_{115} &\leq 7 \\
2x_{96} + 2x_{106} + 3x_{116} &\leq 7
\end{aligned} \tag{6.44}$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Ax)_i > 10 \\ f_i(Ax_i) & \text{eğer } 7 \leq (Ax)_i \leq 10 \\ 1 & \text{eğer } (Ax)_i < 7 \end{cases} \tag{6.45}$$



Şekil 6.11 Monotonluk derecesi üyelik fonksiyonu

Oluşturulan modelin çözümünde, Zimmermann Yaklaşımı kullanıldığında yeni model 6.46'daki haline dönüşmektedir.

$$\begin{aligned}
\max \lambda \\
z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + \lambda &\leq 5 \\
x_{11} + x_{12} &= 1 \\
x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} &= 1 \\
x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} &= 1 \\
x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} &= 1 \\
x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} &= 1 \\
x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} &= 1 \\
x_{73} + x_{74} + x_{75} &= 1 \\
x_{82} + x_{83} + x_{84} + x_{85} &= 1 \\
x_{93} + x_{94} + x_{95} + x_{96} &= 1 \\
x_{10,2} + x_{10,3} + x_{10,4} + x_{10,5} + x_{10,6} &= 1 \\
x_{11,5} + x_{11,6} &= 1 \\
6x_{11} + 2x_{21} + x_{51} + 2x_{61} + 5\lambda &\leq 16
\end{aligned} \tag{6.46}$$

$$\begin{aligned}
&6x_{12} + 2x_{22} + 5x_{32} + 7x_{42} + x_{52} + 2x_{62} + 6x_{82} + 5x_{10,2} + 5\lambda \leq 16 \\
&2x_{23} + 5x_{33} + 7x_{43} + x_{53} + 2x_{63} + 3x_{73} + 6x_{83} + 5x_{93} + 5x_{10,3} + 5\lambda \leq 16 \\
&2x_{24} + 5x_{34} + 7x_{44} + x_{54} + 2x_{64} + 3x_{74} + 6x_{84} + 5x_{94} + 5x_{10,4} + 5\lambda \leq 16 \\
&2x_{25} + 5x_{35} + 7x_{45} + x_{55} + 2x_{65} + 3x_{75} + 6x_{85} + 5x_{95} + 5x_{10,5} + 4x_{11,5} + 5\lambda \leq 16 \\
&5x_{96} + 5x_{10,6} + 4x_{11,6} + 5\lambda \leq 16 \\
&x_{11} + 2x_{12} - x_{21} - 2x_{22} - 3x_{23} - 4x_{24} - 5x_{25} \leq 0 \\
&x_{11} + 2x_{12} - 2x_{32} - 3x_{33} - 4x_{34} - 5x_{35} \leq 0 \\
&x_{11} + 2x_{12} - 2x_{42} - 3x_{43} - 4x_{44} - 5x_{45} \leq 0 \\
&x_{11} + 2x_{12} - x_{51} - 2x_{52} - 3x_{53} - 4x_{54} - 5x_{55} \leq 0 \\
&x_{21} + 2x_{22} + 3x_{23} + 4x_{24} + 5x_{25} - x_{61} - 2x_{62} - 3x_{63} - 4x_{64} - 5x_{65} \leq 0 \\
&2x_{32} + 3x_{33} + 4x_{34} + 5x_{35} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} \leq 0 \\
&2x_{42} + 3x_{43} + 4x_{44} + 5x_{45} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} \leq 0 \\
&x_{51} + 2x_{52} + 3x_{53} + 4x_{54} + 5x_{55} - 3x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} \leq 0 \\
&x_{61} + 2x_{62} + 3x_{63} + 4x_{64} + 5x_{65} - 2x_{82} - 3x_{83} - 4x_{84} - 5x_{85} \leq 0 \\
&3x_{73} + 4x_{74} + 5x_{75} - 3x_{93} - 4x_{94} - 5x_{95} - 6x_{96} \leq 0 \\
&2x_{82} + 3x_{83} + 4x_{84} + 5x_{85} - 2x_{10,2} - 3x_{10,3} - 4x_{10,4} - 5x_{10,5} - 6x_{10,6} \leq 0 \\
&3x_{93} + 4x_{94} + 5x_{95} + 6x_{96} - 5x_{11,5} - 6x_{11,6} \leq 0 \\
&2x_{10,2} + 3x_{10,3} + 4x_{10,4} + 5x_{10,5} + 6x_{10,6} - 5x_{11,5} - 6x_{11,6} \leq 0 \\
&3x_{11} + 2x_{21} + 3x_{51} + 2x_{61} + 3\lambda \leq 8 \\
&3x_{12} + 2x_{22} + x_{32} + 2x_{42} + 3x_{52} + 2x_{62} + 2x_{82} + 3x_{10,2} + 3\lambda \leq 8 \\
&x_{33} + 2x_{43} + 3x_{53} + 2x_{63} + 2x_{73} + 2x_{83} + 3x_{93} + 3x_{10,3} + 3\lambda \leq 8 \\
&2x_{24} + x_{34} + 2x_{44} + 3x_{54} + 2x_{64} + 2x_{74} + 2x_{84} + 3x_{94} + 3x_{10,4} + 3\lambda \leq 8 \\
&2x_{25} + x_{35} + 2x_{45} + 3x_{55} + 2x_{65} + 2x_{75} + 2x_{85} + 3x_{95} + 3x_{10,5} + 3x_{11,5} + 3\lambda \leq 8 \\
&3x_{96} + 3x_{10,6} + 3x_{11,6} + 3\lambda \leq 8 \\
&2x_{11} + 3x_{21} + 3x_{51} + 2x_{61} + 2\lambda \leq 8 \\
&2x_{12} + 3x_{22} + 2x_{32} + 3x_{42} + 3x_{52} + 2x_{62} + x_{82} + x_{10,2} + 2\lambda \leq 8 \\
&2x_{33} + 3x_{43} + 3x_{53} + 2x_{63} + 2x_{73} + x_{83} + 2x_{93} + x_{10,3} + 2\lambda \leq 8 \\
&3x_{24} + 2x_{34} + 3x_{44} + 3x_{54} + 2x_{64} + 2x_{74} + 2x_{84} + 2x_{94} + x_{10,4} + 2\lambda \leq 8 \\
&3x_{25} + 2x_{35} + 3x_{45} + 3x_{55} + 2x_{65} + 2x_{75} + x_{85} + 2x_{95} + x_{10,5} + 3x_{11,5} + 2\lambda \leq 8 \\
&2x_{96} + 1x_{10,6} + 3x_{11,6} + 2\lambda \leq 8 \\
&3x_{11} + 3x_{21} + 2x_{51} + 3x_{61} + 3\lambda \leq 10 \\
&3x_{12} + 3x_{22} + 3x_{32} + 2x_{42} + 2x_{52} + 3x_{62} + 3x_{82} + x_{10,2} + 3\lambda \leq 10 \\
&3x_{33} + 2x_{43} + 2x_{53} + 3x_{63} + x_{73} + 3x_{83} + 2x_{93} + 2x_{10,3} + 3\lambda \leq 10 \\
&3x_{24} + 3x_{34} + 2x_{44} + 2x_{54} + 3x_{64} + x_{74} + 2x_{84} + 2x_{94} + 2x_{10,4} + 3\lambda \leq 10 \\
&3x_{25} + x_{35} + 2x_{45} + 2x_{55} + 3x_{65} + x_{75} + 3x_{85} + 2x_{95} + 2x_{10,5} + 3x_{11,5} + 3\lambda \leq 10 \\
&2x_{96} + 2x_{10,6} + 3x_{11,6} + 3\lambda \leq 10 \\
&\lambda \in [0, 1]
\end{aligned}$$

Yukarıda verilen problem ergonomik faktörlerin model üzerindeki etkilerini göstermek için önce zorluk düzeyi, risk seviyesi ve monotonluk düzeyi dikkate alınmadan çözülmüş, daha sonra bu faktörler dikkate alınarak yeniden çözülmüştür. Birinci modelde sadece çevrim süresi ve istasyon sayısı bulanık olarak alınmış, problemin en iyi çözümü Tablo 6.4'te özetlenmiştir. Eniyi çözümde çevrim zamanı 12 dakika ve istasyon sayısı 4 olarak bulunmuştur. Amaç fonksiyonunun değeri, 0.8 olmaktadır çünkü istenen çevrim süresi tam olarak sağlamamaktadır. Montaj hattına, birinci istasyona, 1,2, ve 6 no'lu görevler; ikinci istasyona, 3,5, ve 8 no'lu görevler; üçüncü istasyona 4 ve 10 no'lu görevler ve son istasyona da 7, 9 ve 11 no'lu görevler atanmaktadır ve istasyonlar arasında dengeli bir dağıtım söz konusudur.

Tablo 6.4 Örnek problemin klasik model BDP sonuçları

| Üyelik Derecesi | İstasyon 1 | İstasyon 2 | İstasyon 3 | İstasyon 4 |
|-----------------|------------|------------|------------|-------------|
| 0,8 | 1,2,6 (10) | 3,5,8 (12) | 4,10 (12) | 7,9,11 (12) |

Eğer karar verici bu çözümü uygulamaya koymuş olsaydı her bir iş istasyonu için Tablo 6.5'te verilen sonuçlar elde edilecekti. Tablo 6.5 sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yalnızca çevrim zamanı ve istasyon sayısı dikkate alınarak hat dengelendiğinde, atanan görevlerin zorluk dereceleri, tehlike riski ve monotonluk açısından istasyonlar arasında hiç de eşit dağılmadığı görülmektedir. Örneğin, üçüncü ve dördüncü istasyonların zamanı aynı olmasına rağmen, dördüncü istasyondaki işçi üçüncü istasyonda çalışan işçiye göre neredeyse üç katı zorlukta işleri yapmaktadır. İstasyonlar arasında, işlerin zorluk derecesi ya da risk derecesi açısından homojen bir yapı söz konusu değildir. Bu durum, elbette çalışanın performansını olumsuz yönde etkileyecek ve üretimde kayıplara yol açacaktır.

Tablo 6.5 Örnek problemin klasik model (Ergonomik değerlendirme)

| | İstasyon 1 | İstasyon 2 | İstasyon 3 | İstasyon 4 |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| Görevler | {1,2,6} | {3,5,8} | {4,10} | {7,9,11} |
| İstasyon zamanı | 10 | 12 | 12 | 12 |
| Zorluk derecesi | 6 | 9 | 3 | 10 |
| Risk derecesi | 6 | 8 | 3 | 8 |
| Monotonluk | 10 | 6 | 7 | 10 |

Aynı problem ergonomik kısıtlar dikkate alınarak yeniden çözülmüş ve problemin en iyi çözümü Tablo 6.6'da özetlenmiştir. Eniyi çözümde 1 ve 3 no'lu görevler ilk istasyona, 2,4, 5 ve 7 no'lu görevler ikinci istasyona, 6,8 ve 10 no'lu görevler üçüncü istasyona ve 9 ve 11 no'lu görevler dördüncü istasyona atanmaktadır. Çevrim zamanı, 13 dakika olup; istasyon sayısı, yine 4 olarak bulunmuştur. Tabloda, karar vericinin 0,33 oranında doyuma ulaştırıldığı, yani üyelik fonksiyonun 0,33 olarak hesaplandığı görülmektedir.

Tablo 6.6 Örnek problemin ergonomik model BDP sonuçları

| | İstasyon 1 | İstasyon 2 | İstasyon 3 | İstasyon 4 |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Görevler | {1,3} | {2,4,5,7} | {6,8,10} | {9,11} |
| İstasyon zamanı | 11 | 13 | 13 | 9 |
| Zorluk Derecesi | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Risk Derecesi | 6 | 6 | 7 | 6 |
| Monotonluk | 7 | 9 | 8 | 8 |

Her iki model birlikte karşılaştırıldığında, ergonomik faktörlerin dikkate alınması ile hattın çevrim zamanında 1 birimlik artış olmaktadır. Buna karşılık, dört istasyondaki görevler arasındaki zorluk dereceleri açısından eşit bir dağılım olduğu görülmektedir. Ayrıca, tehlike riski taşıyan işlerin istasyonlar arasındaki dağılımı da yaklaşık olarak eşittir. Diğer ergonomik faktör olan, işlerin monotonluk derecesi ise dört istasyonda da yaklaşık olarak 8 civarında bulunmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Montaj hatları, günümüzün küreselleşen dünyasında düşük maliyetlerle etkin sistemler geliştirmeyi amaçlayan işletmeler için oldukça önemli üretim sistemleridir ve bir hattın kurulması ya da yeniden düzenlenmesi oldukça pahalı bir yatırımdır. Bu nedenle, hattın başlangıçta etkin bir şekilde düzenlenmesi önemlidir.

Literatür incelendiğinde, konuya ilişkin pek çok çalışma yapıldığı görülmüştür. Ancak pratikte uygulanabilir ve insan faktörünü dikkate alan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bunun pek çok sebebi olmakla birlikte başlıca sebebi, uygulamada hat dengeleme esnasında ortaya çıkan, görevlerin zorluk dereceleri, taşıdıkları tehlike riski gibi işgücü performansında farklılığa yol açan faktörlerin göz ardı edilmesidir.

Bu tez çalışmasında, işletmeler için stratejik öneme sahip olan montaj hattı dengeleme problemi ergonomik faktörleri dikkate alarak yeniden düzenlenmiş ve geliştirilen matematiksel model ile iş istasyonlarına görevlerin atanması işin zorluk derecesi, tehlike riski taşınması ve monoton olup olmama durumu göz önüne alınarak yapılmıştır. Aksi takdirde, zaman içinde üretimde darboğaz ve tikanıklıklar ve bunun sonucunda da verimlilik kayıpları ve iş güvenliği açısından problemler söz konusu olacaktır.

Geliştirilen matematiksel model ile ilk kez ergonomik faktörler dikkate alınarak montaj hattı dengeleme probleminde görevlerin istasyonlara atanması yapılmıştır. Literatürde yer alan Jackson problemi için belirlenen çevrim süresi ve diğer kısıtlar altında istasyon sayısının en küçüklenmesi gerçekleştirilirken, işlerin sıklık düzeyi, risk seviyesi ve zorluk dereceleri belirlenmiş ve bu değerler dilsel değişkenlerden bulanık sayılara atanarak modele yeni kısıtlar olarak eklenmiştir. Yeni modelin bulanıklık içermesi sebebiyle, bulanık doğrusal programlama kullanılarak karar vericiye belirlenen toleranslar dahilinde en küçük istasyon sayısını sağlayan çözüm sunulmuştur. Bulanık doğrusal programlama çözüm yaklaşımlarından Zimmermann Yaklaşımı, modelin simetrik yapısı ve verilerin karar verici tarafından başlangıçta belirlendiği düşünülerek tercih edilmiştir. Ancak, gelecek çalışmalarda bulanık doğrusal

programlama yaklaşımlarından Werners ve parametrik programlama gibi yaklaşımlar kullanılarak çözümler karşılaştırılabilir.

Geliştirilen model LINGO paket programında çözülmüş, Jackson probleminin ergonomik faktörleri dikkate alınmadan ve dikkate alarak kurulan modellerinde, görevlerin istasyonlara atanmasında farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Yalnızca çevrim zamanını en küçükleyerek hattın dengelendiği klasik modelde atanan görevlerin zorluk dereceleri, tehlike riski ve monotonluk açısından istasyonlar arasında hiç de eşit dağılmadığı görülmektedir. Buna karşılık ergonomik faktörlerin dikkate alındığı yeni modelde tüm istasyonlardaki görevler arasındaki zorluk dereceleri, tehlike riski ve monotonluk açısından eşit bir dağılım olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışanın performansını üzerindeki olumsuz etkilerin ortadan kalkmasına, iş kazalarının sıkça rastlandığı tekrarlanan, zor ve riskli işlerin eşit dağılması ile azalmasına ve üretimde verimlilik artışlarına sebep olacaktır.

Bu çerçevede tez çalışmasının sonucunda,

- İşgücü performansında farklılığa yol açan, işin zorluk derecesi, sıkıcı olup olmama durumu, tehlike riski taşınması gibi ergonomik faktörleri de dikkate alarak, montaj hattı dengeleme problemi gerçek hayat problemine daha uygun hale getirilmiştir.
- Problemin yapısından kaynaklan belirsizliklerin bulanık mantık yaklaşımı ile geliştirilen matematiksel model doğrultusunda ortadan kaldırılması ve sayısallaştırılması sağlanmıştır.

Sonuç olarak bugünün rekabet koşullarında üretkenlikteki artış ve karlılığın yalnızca işlerin işlem sürelerini dikkate alan hızlandırılmış hatlarla değil, aynı zamanda insan faktörünü de dikkate alan, insana değer veren ergonomik tasarımlardan geçtiği yadsınamaz bir gerçektir. Böylece işgücünün verimliliği üretim hattına yansiyacak ve gerçek anlamda üretkenlik ve karlılık sağlanmış olacaktır.

7.2. Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Günümüzde insana verilen değer ve değişen koşullara uyum sağlama yeteneği, işletmelerin rekabet ortamında öne çıkabilmeleri için gerekli olan kavramlardır. Yalnızca sayısal oranlardaki artış, üretkenlikte ya da verimlilikte artış anlamına gelmemektedir. Artık elindeki en değerli kaynak olan işgücünü etkin kullanabilmek

önem kazanmıştır. Bu nedenle, montaj hatlarının dengelenmesinde işletmelerin ergonomik faktörleri dikkate alan bu matematiksel model ile gerçek anlamda üretkenliği sağlaması planlanmaktadır. Ancak, henüz ilk kez literatüre kazandırılan bu model, 11 işli Jackson problemi için çözülmüş olup, gerçek hayat problemleri için görev sayılarının çok daha fazla olması durumunda sezgisel yaklaşımlarla birlikte kullanılarak daha da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Malek, L. and Boucher, T.O. (1985) A Framework for The Economic Evaluation of Production System and Product Design Alternatives for Robot Assembly, *International Journal Of Production Research*, 23: 197-208
- Acar, N. (1996) Üretim Planlaması Yöntem Uygulamaları, *MPM Yayınları*, 288s
- Ağpak, K. (2001) Tek Modelli Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Bir Sezgisel Metot, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 96s
- Ağpak, K. ve Gökçen, H. (2002) Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4:29-40
- Ağpak, K. and Gökçen, H. (2005) Assembly Line Balancing:Two Resource Constrained cases, *International Journal of Production Economics*, 96:129-140
- Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N.N ve Özel, S. (2002) Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4):115-124
- Anderson, E.J. and Ferris, M.C. (1994) Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assembly Line Balancing Problem, *ORSA Journal on Computing*, 6: 161-173
- Arcus, A.L. (1966) COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, 4:259-277
- Aslan, D. (2001) Montaj Hattı Dengeleme, Üretim Planlama ve Kontrol, *Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi*, İzmir, 221s
- Bao, S., Winkel, J., Mathiassen, S.E and Houshang, S. (1997) Interactive Effect of Ergonomics and Production Engineering on shoulder-neck exposure –A Case Study of Assembly Work in China and Sweden, *International Journal of Ergonomics*, 20:75-85
- Baker, K.R., Powell S.G. and Pyke, D.F. (1990) Buffered and Unbuffered Assembly Systems With Variable Processing Times, *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 3: 200-223
- Baybars, I. (1986) A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problems, *Management Science* 32: 909-932
- Becker C. and Scholl A. (2006) A Survey On Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research*, 168: 694-715
- Bowman E.H. (1960) Assembly Line Balancing by Linear Programming, *Operations Research*, 8:385-389

- Boysen N., Fliedner M. and Scholl A. (2006a) A Classification of Assembly Line Balancing Problems, *European Journal of Operational Research*, 183(2):674-693
- Boysen N., Fliedner M. and Scholl A. (2006b) Assembly Line Balancing: Which Model to Use When, *European Journal of Operational Research*, in press doi:10.1016/j.ejon. 10.010
- Bridger R. S. (1995) Introduction to Ergonomics, *M.c. Graw Hill Inc.*, New York, 1-15
- Bullinger H.J., Ralley P.J. and Schipfer J. (1997) Some Aspects of Ergonomics in Assembly Planning, *International Journal of Ergonomics*, 20:389-397
- Cadenas, J.M. and Verdegay, J.L. (2000) Using Ranking Functions in Multi-objective Fuzzy Linear Programming, *Fuzzy Sets and Systems*, 111: 47-53
- Çakır, B. (2006) Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme için Tavlama Benzetimi Algoritması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 105s
- Çalkır, S. (2000) Genetik Algoritma ile Montaj Hattı Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 98s
- Carraway, R.L. (1989) A Dynamic Programming Approach to Stochastic Assembly Line Balancing, *Management Science*, 35: 459-471
- Çelik, S.H. (2000) Bulanık Rastgele Doğrusal Programlama, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 100s
- Chiang, W.C. (1998) The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem, *Annals Of Operations Research*, 77: 209-227
- Cobb, C. F. (2002) Fuzzy Logic, Alabama *Journal of Mathematic*, Spring:13-19
- Dervitsiotis, K.N. (1981) Operations Management, *McGraw-HillBook Company*
- Erdem, M.A. (2000) Ergonomik İş İstasyonu Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 151s
- Erel, E. (1991) Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi Üzerinde Yapılan Araştırmalar, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 3:13
- Erkan, N. (1996) Ergonomi Verimlilik Sağlık ve İş Güvenliği için İnsan Faktörü Mühendisliği, *Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları*, Ankara, 373:13-56
- Ertuğrul, İ. (1996) Bulanık Mantık ve Bir Üretim Planlamasında Uygulama Örneği, Yüksek Lisans tezi, *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Denizli
- Falkenauer, E. (2005) Line Balancing in the Real World, Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM 05, *Lumiere University of Lyon*, France

- Fonseca D. J., Guest C.L., Elam M. and Karr C.L. (2005) A Fuzzy Logic Approach to Assembly Line Balancing, *Mathware & Soft Computing*, 12:57-74
- Gen M., Tsujimura Y. and Li Y. (1996) Fuzzy Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms, *Computers and Industrial Engineering*, 31:631-634
- Gökçen, H. (1997) Çok Modelli Montaj Hatlarında Model Parti Sıralarının Belirlenmesi: Dal ve Sınır Yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (1)
- Gökçen, H. (1994) Karışık modelli Deterministik montaj hattı dengeleme problemleri için yeni modeller, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Gökçen, H. and Erel, E. (1997) A Goal Programming Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing, *International Journal of Production Economics*, 48: 177-185
- Gunther R.E., Johnson G.D. and Peterson R.S. (1983) Currently Practised Formulations for the Assembly Line Balance Problem”, *Journal of Operations Management*, 209-221
- Günay K., Çetin T. ve Baykoç Ö.F. (2004) Montaj Hattı Dengelemede Geleneksel ve U Tipi Hatların Karşılaştırılması ve Bir Uygulama”, *Teknoloji*, 3:351-359
- Güner H. (2005) Bulanık AHP ve Bir İşletme için Tedarikçi Seçimi Problemine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 130s
- Hansen, B.K. (1996) Fuzzy Logic and Linear Programming Find Optimal Solutions for Meteorological Problems, *Term Paper for Fuzzy Logic Course at Technical University of Nova*, Scotia
- Helander, M.G. (1995) A Guide to Ergonomics of Manufacturing, *Taylor&Francis*, 7-63, London
- Helgeson, W.B. and Birnie, D.P. (1961) Assembly Line Balancing using Ranked Positional Weight Technique, *Journal of Industrial Engineering*, 12:394-398
- Ignall, E.J. (1965) A Review of Assembly Line Balancing” *Journal of Industrial Engineering*, 16:4
- İncir, G. (1998) Çoklu Vardiya Çalışmasının Ergonomik Tasarımı, *Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları*, 624:29-38
- Jackson, J.R. (1956) A Computing Procedure for a Line Balancing Problem, *Management Science*, 3:261-271
- Johnson, R.V. (1988) Optimally Balancing Large Assembly Lines with “FABLE”, *Management Science*, 34:240-253

- Kaymak, U. and Sousa, J.M. (2001) Weighted Constraints in Fuzzy Optimization, *ERIM Report Series Research in Management*, ERS-2001-19-LIS, 21p
- Kılınççı, O. and Bayhan, G.M. (2006) A Petri Net Approach for Simple Assembly Line Balancing Problems, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 30: 1165-1173
- Kilbridge, M.D. and Wester L. (1961) The Balance Delay Problem, *Management Science*, 8:69-84
- Kim, Y.K., Kim, S.J. and Kim, J.Y. (2000) Balancing and Sequencing Mixed-Model U Lines with a Co-Evolutionary Algorithm, *Production Planning and Control*, 8: 754-764
- Lapierre, S.D., Ruiz, A. and Soriano, P. (2006) Balancing Assembly Lines with Tabu Search” *European Journal Of Operational Research* 168 (3): 826-837
- Lin, L., Drury, C.G. and Kim, S.W. (2001) Ergonomics and Quality in Paced Assembly Lines, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* , 11(4):377-382
- Lit, P., Latinne, P., Rekiek, B. and Delchambre, A. (2001) Assembly Planning with an Ordering Genetic Algorithm, *International Journal of Production Research*, 39(16): 3623-3640
- Miltenburg, J. and Wijngaard J. (1994) The U-line Balancing Problem, *Management Science*, 40:1378-1388
- Monden, Y. (1998) Toyota Production System – An Integrated Approach to Just-in-Time, *3rd ed. Kluwer*, Dordrecht
- MPM-REFA (1988) İş Etüdü Yöntem Bilgisi Kitabı, *Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları*, Ankara, 544: 93-107
- Moodie, C.L. and Young, H.H. (1965) A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumptions of Constant or Variable Work Element Times, *Journal of Industrial Engineering*, 16:23-29
- Özkan, M. (2002) Bulanık Doğrusal Programlama ve Bir Tekstil İşletmesinde Uygulama Denemesi, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Bursa
- Özkan, M. (2003) Bulanık Hedef Programlama, *Ekin Kitabevi*, Bursa
- Öztürk, A. (1997)Yöneylem Araştırması, 5.baskı, *Ekin Kitabevi*, Bursa
- Patterson, J.H. and Albracht, J.J. (1975) Assembly Line Balancing: Zero-One Programming with Fibonacci Search, *Operations Research*, 23(1): 166-172
- Röder, A. and Tibken, B. (2006) A Methodology for Modeling İnter-Company Supply Chains and for Evaluating a Method of İntegrated Product and Process Documentation, *European Journal of Operational Research* 169:1010–1029

- Salveson, M.E. (1955) The Assembly Line Balancing Problem, *The Journal of Industrial Engineering*, 6(3): 18-25
- Scholl, A. and Becker, C. (2006) State of the Art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research*, 168: 666-693
- Scholl, A. and Klein, R. (1997) SALOME:A Bidirectional Branch and Bound Procedure for Assembly Line Balancing , *INFORMS Journal On Computing*, 9: 319-334
- Scholl, A. and Klein, R. (1999) ULINO: Optimally Balancing U-shaped JIT Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, 37(4) : 721-736
- Scholl, A. and Voss, S. (1996) Simple Assembly Line Balancing–Heuristic Approaches, *Journal of Heuristics* 2: 217–244
- Şen, Z. (2001) Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, *Bilge Kültür Sanat Yayınları*, İstanbul, 172 s
- Şimşek, M. (1994) Mühendislikte Ergonomik Faktörler, *Marmara Üniversitesi Yayınları*, 547: 161-177
- Talbot, F.B. and Patterson, J.H., (1984) An Integer Programming Algorithm with Network Cuts for Solving The Assembly Line Balancing Problem, *Management Science*, 30:85-99
- Tuncel, S.Ö. (1997) Bulanık Doğrusal Programlama, Doktora Tezi, *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara
- Tuş, A. (2006) Bulanık Doğrusal Programlama ve Bir Üretim Planlamasında Uygulama Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Denizli, 204s
- Türe, H. (2006) Bulanık Doğrusal Programlama ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Ankara, 113s
- Tsujimura, Y., Gen, M. and Kubota, E. (1995) Solving Fuzzy Assembly-line Balancing Problem with Genetic Algorithms, *Computers and Industrial Engineering*, 29:543-550
- Ural, G.F. (2006) Bulanık Doğrusal Programlama Kullanılarak Bir Sanayi Kuruluşunda Üretim Planlama Çalışmasının Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Kocaeli, 144s
- Urban, T.L (1998) Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines, *Management Science*, 44(5):738–741
- Urban, T.L. and Chiang, W.C. (2006) Balancing Unpaced Synchronous Production Lines, *University of Tulsa Oklahoma USA* , working paper
- Wang, D.W. (1997) An Inexact Approach for Linear Programming Problems with Fuzzy Objective and Resources, *Fuzzy Sets and Systems*, 89(1):61–68

- Werners, B. (1987) An Interactive Fuzzy Programming System, *Fuzzy Sets and Systems*, 23:131-147
- Yapıcı, N. (2000) Bulanık Doğrusal Programlamaya Sinir Ağları Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya
- Yeow, P.H.P. and Sen, R.N. (2006) Productivity and Quality Improvements Revenue Increment and Rejection Cost Reduction in the Manual Component Insertion Lines through the Application of Ergonomics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36:367-377
- Yılmaz, Ö.F. (1998) Bulanık Doğrusal Programlama İle Asgari Ücretin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara
- Zadeh, L.A. (1975) The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning-I, *Information Sciences*, 8:199-249
- Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy Sets, *Information Control*, 8:338-353
- Zimmermann, H.J. (1991) Fuzzy Set Theory and Its Applications, *Kluwer Academic Publishers*, Massachusetts

ÖZGEÇMİŞ

- Adı, Soyadı : Elif ÖZGÖRMÜŞ
- Ana Adı : Yaşar
- Baba Adı : Mustafa
- Doğum Yeri ve Tarihi : Üsküdar, 26.09.1978.
- Lisans Eğitimi ve Mezuniyet Tarihi : Dokuz Eylül Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 2003.
- Çalıştığı Yer : Pamukkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü.
- Bildiği Yabancı Dil, Aldığı Belgeler : İngilizce, TOEFL ıbt 89
Almanca.
- Mesleki Etkinlikleri : TMMOB üyeliği.