

U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin
Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi

Banu Güner

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2011

U-Type Assembly Line Balancing Under The Influence Of Ergonomic Constraints
For Sustainable Production Flow

Banu Güner

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Industrial Engineering

May 2011

U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin
Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi

Banu Güner

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Servet Hasgöl

Mayıs 2011

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Banu GÜNER'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Servet HASGÜL

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof.Dr. A.Attila İŞLİER

Üye: Prof.Dr. Hadi GÖKÇEN

Üye: Doç.Dr.Yakup KARA

Üye: Doç.Dr.Nil ARAS

Üye: Yrd.Doç.Dr. Servet HASGÜL

<p>Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.</p> <p>Prof. Dr. Nimetullah BURNAK</p> <p>Enstitü Müdürü</p>

ÖZET

Günümüzde, işletmeler çok fonksiyonlu işçilerden yararlanma çabasındadırlar. Bu nedenle U-tipi montaj hattı yerleşimini benimsemektedirler. Ancak, U-tipi montaj hatlarını dengelerken ortaya çıkan istenmeyen durumlar, iş istasyonlarında artan iş yükünün getirdiği sorunlar ve ergonomik faktörler göz önüne alınmamaktadır.

Geleneksel Hat Dengeleme Problemlerinde olduğu gibi U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme (U-MHD) Problemi de insan unsurunu fazla dikkate almamakta, çoğunlukla iş yükünü istasyonlar arasında düzgün dağıtmakla yetinmektedir. Oysa hattın dengelenmesi yanında dengenin sürdürülebilirliği de hattın başarısında belirleyici bir rol oynamaktadır. Hattın dengelenmesinde genellikle iş istasyonu sayısını azaltmak tek amaç olarak benimsendiğinden insan unsuru göz ardı edilmektedir. İstasyon sayısını azaltmaya çalışırken işçiye taşıyabileceğinden fazla yük atanmaktadır. Bu atama, işçide yorgunluğun artmasına sebep olmaktadır. Sistemde, üretim hızında sapma gibi çeşitli sorunlar gözlenebilmektedir.

Bu çalışmada, insan unsurunu da göz önünde bulundurarak, istasyon sayısını artırma pahasına, daha sürdürülebilir bir dengelemeyi yapacak üç farklı model geliştirilmiştir. Bu modellerde dikkate alınabilecek ergonomik faktörler araştırılmıştır. Geliştirilen modellerin kullanılabilirliği literatürden alınan test problemleri üzerinde sınanarak gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımlar, hattın üretim hızında değişme ihtimalini ve işçilere fazla yük atanmasından dolayı oluşabilecek yorgunluk, dikkat dağılması gibi etkileri azaltacaktır. Böylece, karşılaşılabilecek iş kazaları ve kalite problemleri de enazlanacaktır ve daha sürdürülebilir bir hat dengelemesi elde edilmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: U-tipi montaj hatları, montaj hattı dengeleme problemi, ergonomik faktörler, bulanık hedef programlama.

SUMMARY

Nowadays, firms are trying to get more benefit from multi-functional workers. Consequently, they adopt U-type assembly lines. However, some undesirable situations arose at the stage of balancing, problems due to increased work load, and ergonomic factors are not taken into consideration.

Traditional assembly line models are contented with even distribution of tasks alone. Similarly U type assembly line balancing (UALB) models do not consider human factors too. However, sustainability is also a very important aspect along with balancing of the lines as the point of view of line performance. Decreasing of the number of stations is considered as the unique aim in line design in general, so human factors are neglected. Excessive workloads are assigned to workers to decrease the number of stations. Consequently fatigue on workers increase and various problems, like production rate fluctuations arise.

In this study, considering of the human factors three different models are developed to achieve more sustainable balance, at the expense of increasing the number of workstations. In these models, ergonomic factors are investigated. Usability of developed models is examined and proved on test problems from the literature. Suggested approaches can reduce the possibility of fluctuations on the output rate of the line and, the fatigue and carelessness causing from excessive workload. Thus, industrial accidents and quality problems will be minimized so more sustainable line balancing will be attained.

Keywords: U-type assembly lines, assembly line balancing problem, ergonomic factors, fuzzy goal programming.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince, deęerli katkılarını ve motive edici gűrűőlerini esirgemeyen danıőmanım Yrd. Do. Dr. Servet HASGŪL'e, tez izleme komitesinde yer alarak yol gűsterici űnerileriyle alıőmalarıma deęer katan Prof. Dr. Hadi GŲKEN'e ve Prof. Dr. A. Attila İŐLIER'e, gűsterdikleri sabır ve anlayıő için hayatımın vazgeilmezleri eőim, annem, babam ve kardeőime teőekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. MONTAJ HATLARI VE HAT DENGELEME	3
2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi	3
2.1.1 Hat dengeleme kavramı	3
2.1.2 Hat dengeleme probleminin yapı taşları.....	4
2.1.3 Hat dengelemede amaçlar.....	4
2.1.4 Hat dengeleme problemlerinde karşılaşılan kısıtlar	7
2.2 U-Tipi Montaj Hatlarının Gelişimi ve Sağladığı Yararlar	8
2.3 U- Tipi Montaj Hattı Dengelemede Tamsayı Programlama.....	10
2.4 U-Tipi Montaj Hatları Üzerine Yapılan Çalışmalar	15
3. MONTAJ HATLARINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR DENGELER İÇİN ERGONOMİ	19
3.1 Ergonomi.....	20
3.2 Montaj Hatları ve Ergonomi	23
3.3 U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesinde Ergonomik Faktörlerin Etkisi	25

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.4 Ergonomik Kısıtlar Altında U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi	26
3.4.1 İşçilere atanacak işler için toplam zorlanmanın dengeli dağıtılması	26
3.4.2 İşlerin risk düzeylerinin dikkate alınması.....	27
3.4.3 Çalışanların fizyolojik özelliklerinden kaynaklanan kısıtların dikkate alınması.....	27
3.4.4 Uyumsuz işlerin aynı istasyona atanmaması.....	28
3.4.5 İşçilere atama yaparken işi daha az sıkıcı (ya da daha ilgi çekici) hale getiren işlerin birleştirilmesi	28
3.4.6 Aynı iş alanına ya da işçiye çeşitli fiziksel aktivite gerektiren atamalardan sakınılması	29
3.4.7 Aynı istasyonda gruplanma gerekliliği.....	30
3.5 Ergonomik Faktörlere Yönelik Kısıtlar	31
3.5.1 Enerji gereksinim düzeyi.....	31
3.5.2 Uyumsuz iş elemanı çiftleri.....	31
4. VASIFLI VE VASIFSIZ İŞÇİLERİN BİRLİKTE ÇALIŞMASI DURUMUNDA SÜRDÜRÜLEBİLİR U-TİPİ MONTAJ HATTI Dengelemesi.....	33
4.1 Model	34
4.2 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	38
5. FARKLI PERFORMANS DEĞERLERİNE SAHİP İŞÇİLER İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR U-TİPİ MONTAJ HATTI Dengelemesi.....	51
5.1 Model	51
5.2 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	55

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6. U-TİPİ MONTAJ HATTI Dengelemesi için Bulanık Hedef Programlama Yaklaşımı.....	66
6.1 Bulanık Küme Teorisi.....	66
6.1.1 Bulanıklık kavramı.....	67
6.1.2 Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları	68
6.2 Bulanık Ortamda Karar Verme.....	69
6.3 U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Geliştirilmiş Bulanık Hedef Programlama Modelleri	70
6.4 U Tipi Montaj Hattı Dengelemesi için Ergonomik Faktörleri Dikkate Alan Bulanık Hedef Programlama Modeli	71
6.5 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	84
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Gölge Diyagram İlave Edilerek Genişletilmiş Öncelik Diyagramının Gösterimi.....	11
Şekil 4.1 Jackson test problemine ait öncelik diyagramı	39
Şekil 4.2 Buxey test problemi $C=47$ ve birinci veri kümesi için istasyonlara atanmış enerji gereksinim düzeyleri grafiği	49
Şekil 5.1 Jackson $C=13$ ve birinci veri seti için Urban'ın modeline göre elde edilen atama ve performans değeri kısıtlı atamayla elde edilen istasyon süreleri ...	58
Şekil 6.1 İş istasyonu sayısını temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu	72
Şekil 6.2 Çevrim süresini temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu	72
Şekil 6.3 Her bir istasyona atanan iş elemanı sayısını temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 İnsan davranışını basitleştirmede kullanılan varsayımlar	19
Çizelge 4.1 Jackson'ın test problemine ait veri seti.....	38
Çizelge 4.2 Test problemlerinin farklı çevrim süreleri için U-MHD ile elde edilmiş literatürdeki eniyi istasyon sayıları	39
Çizelge 4.3 Jackson test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri	40
Çizelge 4.4 Buxey test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri	40
Çizelge 4.5 Hahn test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri	41
Çizelge 4.6 Erkek ve kadın işçilerde iş ağırlığına göre harcanan enerji	42
Çizelge 4.7 Jackson test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kj/sn) değerleri	43
Çizelge 4.8 Jackson test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları.....	44
Çizelge 4.9 Buxey test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları.....	45
Çizelge 4.10 Hahn test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları.....	46
Çizelge 4.11 Ergonomik kısıtlar öncesi ihlal edilen uyumsuz iş elemanı çiftleri.....	47
Çizelge 4.12 Jackson test probleminde ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim düzeyleri (vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)	48
Çizelge 5.1 Jackson test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri ...	55
Çizelge 5.2 Buxey test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri.....	55
Çizelge 5.3 Hahn test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri	56
Çizelge 5.4 Jackson test problemi C=13 için Urban'ın modeli ile elde edilmiş atama	57

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.5 Jackson test problemi C=13 için Urban'ın modelinden elde edilen atamada, birinci veri setindeki performans değerleri etkisiyle gerçekleşecek istasyon süreleri	58
Çizelge 5.6 Jackson test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri	60
Çizelge 5.7 Jackson test probleminde ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim düzeyleri (performans değerli işçi modeline göre)	61
Çizelge 5.8 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Birinci veri seti).....	62
Çizelge 5.9 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (İkinci veri seti).....	63
Çizelge 5.10 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Üçüncü veri seti).....	64
Çizelge 6.1 Jackson test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi	77
Çizelge 6.2 Jackson test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri	78
Çizelge 6.3 Buxey test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi	78
Çizelge 6.4 Buxey test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri	79
Çizelge 6.5 Hahn test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi	79
Çizelge 6.6 Hahn test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri	80

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üretim sistemlerinde önemli bir birim olan montaj hatları, bünyesinde bir veya daha çok işlem yapılan ve birbiri ardına dizilmiş olan iş istasyonlarından oluşmaktadır.

Geleneksel hat dengeleme probleminde modellenen üretim hattı “düz” olarak düzenlenmektedir. İşletmelerdeki yerleşim, işgücü ve benzeri kısıtlardan dolayı bu geleneksel montaj hatları yetersiz kalmaktadır. Tam Zamanında Üretim (TZÜ) prensiplerinin uygulanabilmesi için üretim hattının “U” tipinde düzenlenmesiyle yeni bir hat tasarımı ortaya çıkmıştır. Geleneksel hatlardan farklı olarak U-tipi montaj hatlarında yerleşim U şeklinde olup, hattın giriş ve çıkışı aynı konumda bulunmaktadır.

Geleneksel hat dengeleme problemi ile U-tipi montaj hattı dengeleme (U-MHD) problemi arasındaki anahtar fark; geleneksel hat dengeleme probleminde, iş elemanlarının atanabilir iş elemanları kümesinden (öncülleri daha önceden atanmış iş elemanları) seçilerek ilgili istasyona atanması, U-MHD probleminde ise, atanabilir iş elemanları kümesinin öncülleri atanmış iş elemanları kümesi ile ardıları atanmış iş elemanları kümesinin birleşiminden oluşmasıdır.

Bu çalışmada, U-tipi montaj hatlarının sürdürülebilir şekilde dengelenmesinin ergonomik faktörlerle ilgisi araştırılmaktadır. Günümüzde, çok fonksiyonlu işçilerden yararlanma çabasında olan işletmeler genellikle U-tipi montaj hattı yerleşimini benimsemektedirler. Ancak, U-tipi montaj hatlarını dengelerken istenmediği halde ortaya çıkan durumlar, özellikle de iş istasyonlarında artan iş yükünün getirdiği sorunlar ve diğer ergonomik faktörler dikkate alınmamaktadır. Geleneksel düz hatların yerine, tasarlanması biraz karmaşık da olsa U-tipi montaj hatlarının tercih edilmesinin çeşitli yararları bulunmaktadır. Ancak literatürde de sıkça karşılaşılan istasyon sayısını azaltmaya yönelik tek amaç insan faktörünü göz ardı etmektedir. İstasyon sayısını azaltmaya çalışırken işçiye taşıyabileceğinden fazla yük atanması işçide oluşacak yorgunluğu artırmakta, bu da oluşturulan dengeden sapmaya varıncaya kadar sistemde çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. U hatlarını dengelerken ergonomik faktörlerin göz

önünde bulundurulması durumunda ise zaman içinde dengeden sapma ihtimali ve işçilere fazla yük atanmasından dolayı oluşabilecek yorgunluk, dikkat dağılması ve dolayısıyla iş kazaları ve kalite problemleri azaltılabilecektir. Bu nedenle hattı dengelerken daha insancıl bir atama yapabilmek için çalışmada önerilen modeller ergonomik faktörleri de içermektedir.

Çalışmanın ikinci bölümü montaj hatları ve hat dengeleme üzerine genel açıklamalardan oluşmaktadır.

Üçüncü bölümde montaj hattı dengeleme problemlerinde ergonomik faktörlerin etkisi üzerine bir kaynak araştırması bulunmakta ve hat dengelemede göz önünde bulundurulabilecek kısıtlar listelenmektedir. Bu bölümde ilave olarak önerilen modellerde göz önünde bulundurulan, ergonomik faktörlere yönelik kısıtlar tanıtılmaktadır.

Dördüncü bölümde mevsimsel taleplere ayak uydurabilmek için geçici işçi çalıştıran firmalar için bir model önerisi yapılmakta, ergonomik kısıtların etkileri incelenmektedir.

Beşinci bölümde, farklı niteliğe sahip işçilerin farklı performans değerine sahip olacağı göz önünde bulundurularak model önerisi yapılmakta, ergonomik kısıtların etkileri incelenmekte, model test sonuçları değerlendirilmektedir.

Altıncı bölümde, bulanık ortamda karar vermede kullanılan bulanık hedef programlama modeli, ergonomik faktörleri içerecek şekilde düzenlenmekte ve ergonomik faktörlerin bulanık ortamdaki tatmin seviyelerine etkisi ortaya konmaktadır.

Elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmaların bulunduğu sonuç ve öneriler bölümüyle çalışma sona ermektedir.

BÖLÜM 2

MONTAJ HATLARI VE HAT Dengeleme

Sürekli üretim sistemlerinde, kitle talebin olduğu durumlarda yüksek üretim hızıyla talebi karşılamanın en makul yolu montaj hatlarının yapılandırılmasıdır (Ağpak vd., 2002b)

İmalat sistemlerinde son işlem genelde montaj olmakta, kitle üretimi yapan işletmelerde ise bu faaliyet montaj hatlarında yürütülmektedir.

Montaj hatları, bünyesinde bir veya daha çok iş parçası yapılan ve birbiri ardına dizilmiş olan iş istasyonlarından oluşur. Belli istasyonlardan sisteme giren hammadde veya yarı mamuller, montaj hatlarında işlendikten sonra ürün olarak hattan çıkarlar.

Montaj hattı dengeleme, iş parçalarının iş istasyonları arasında en uygun şekilde dağıtılmasını ve eniyi sayıda istasyonun oluşturulmasını amaçlar. Dengeleme sonucu eniyi istasyon sayısının belirlenmesiyle beraber, eniyi işçi sayısı da tespit edilmiş olur ve işletme, boş sürelerin enküçüklenmesiyle kapasitesinin daha büyük bir kısmını kullanabilir duruma gelir.

2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Bir veya birkaç ürün için kurulacak bir montaj hattı tasarlandığında; bu hattaki iş istasyonlarına ilişkin işlem sürelerinin dengelenmesi sorunu ortaya çıkar (Erkut ve Baskak, 1997). Dengeli bir hat “İşin bir istasyondan diğerine, istenilen hızda akmasını sağlayacak şekilde, yaklaşık eşit üretim hızındaki işlem kümelerinin seri olarak düzenlenmesi” şeklinde tanımlanabilir (Acar ve Eştaş, 1986).

2.1.1 Hat dengeleme kavramı

Endüstrileşme sürecinde, toplam işin öğelerine ayrılarak, bu iş parçalarının ayrı ayrı işçiler tarafından yapılmasıyla daha hızlı ve kitlesel (seri) ve daha ucuz üretim yapılabileceği görüşü ortaya çıkmıştır. Bunun sonucu olarak üretim, iş parçalarının

üzerinde değişik iş istasyonlarının bulunduğu belirli bir hat üzerinden geçirilmesi yoluyla yapılır (Erkut ve Baskak, 1997).

Montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli işler, bu işlerin aldıkları süreler ve aralarındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, işlerin bir performans ölçüsü eniyilenecek şekilde sıralı iş istasyonlarına atanması, montaj hattı dengeleme problemi olarak tanımlanmaktadır (Ağpak vd., 2002 b).

2.1.2 Hat dengeleme probleminin yapı taşları

Bir montaj hattının temel özelliği, iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona hareket etmesidir. Montaj hattında bir ürünün montajı, birçok parça, bileşen ve alt montajın bir araya getirilmesi ve bunların üzerinde bir takım işlemlerin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. İşlemleri yapacak olanlar, hat boyunca sıralanmış iş istasyonlarıdır. Hat dengeleme problemine ait temel yapı taşları da aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- İş Elemanı
- İş İstasyonu
- Öncelik Diyagramı
- Öncelik Matrisi
- İş Hacmi
- Çevrim Süresi
- İş İstasyonu Süresi

2.1.3 Hat dengelemede amaçlar

Montaj hattı dengeleme problemlerinde amaç, işin yapılışı ile ilgili kısıtları göz önünde bulundurarak belirlenen bir ölçütü eniyileyecek şekilde iş elemanlarının iş istasyonlarına atanmasıdır. Hat dengeleme problemlerinde dikkate alınan amaçlar iki temel tipte sınıflandırılmıştır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ghosh ve Gagnon,1989);

Teknik amaçlar:

- Verilen evrim süresi için iş istasyonu sayısının enkklenmesi,
- Verilen iş istasyonu sayısı için çevrim süresinin enkklenmesi,
- Hat boyunca toplam boş zamanın enkklenmesi,
- Dengeleme gecikmesinin enkklenmesi,
- Hat uzunluğunun enkklenmesi,
- İş istasyonlarının çevrim süresini aşma olasılığının enkklenmesi,

Ekonomik amaçlar:

- İşgücü, iş istasyonu ve bitmemiş işlerin toplam maliyetinin enkklenmesi,
- İşçilik maliyetinin enkklenmesi,
- Verimsizlik durumunda katlanılan toplam (ceza) maliyetin enkklenmesi,
- Stok, ayar ve boş zaman maliyetlerinin enkklenmesi,
- Süreç ii stok maliyetinin enkklenmesi,
- Net karın enbüyüklenmesi,

Teknik amaçlar arasında verilen çevrim süresi için iş istasyonu sayısının enkklenmesi en çok kullanılan amaç olmakla beraber verilen iş istasyonu sayısı için çevrim süresinin enkklenmesi ve hat boyunca toplam boş zamanın enkklenmesi de montaj hattı dengeleme problemleri için geliştirilmiş olan yöntemlerde sıklıkla kullanılan diğer teknik amaçlardır. Ekonomik olarak da işgücü, iş istasyonu ve bitmemiş işlerin toplam maliyetinin enkklenmesi ve işçilik maliyetinin enkklenmesi ençok kullanılan ekonomik amaçların başında gelir. Yaygın olarak kullanılan süre ve amaçlar şu şekilde açıklanabilir:

İstasyon Boş Süresi :

Her bir iş istasyonu için çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki farktır. Seçilen dengeleme lt genel olarak boş süre ile ilgili olmaktadır.

Denge Kaybı ve Dengeleme Gecikmesi :

İş istasyonları arasındaki montaj işlemlerinin dengesiz bir şekilde dağıtılmasından kaynaklanan boş zaman oranıdır. İş istasyonu için istasyon boş süresinin çevrim süresine oranından elde edilir ve elde edilen sonuç o istasyonun verimsizliğinin göstergesidir. C çevrim süresini, T_j ' de j. istasyonun süresini gösterdiğinde j. istasyonun denge kaybı:

$$d_j = \frac{C - T_j}{C}$$

n iş elemanı sayısı, t_i i. iş elemanının süresi ve m istasyon sayısını gösterdiğinde bütün hat için dengeleme gecikmesi olarak bilinen denge kaybı izleyen şekilde hesaplanır:

$$d = \frac{m * C - \sum_{i=1}^n t_i}{m * C}$$

Düzensizlik İndeksi :

İstasyon boş sürelerinden yararlanılarak hattın düzensizliğini belirleyen indekstir. Sıfıra yaklaşması hat dengelemenin başarılı olduğunu gösterir.

$$S.I = \sqrt{\sum_{j=1}^m (C - T_j)^2}$$

Hat Etkinliği :

İş hacminin çevrim süresi ile istasyon sayısının çarpımına oranı ile belirlenir. Bu ölçek, montaj hatları için önemlidir. Montaj hattındaki toplam işgücünün ne kadarlık bir yüzdesinin kullanıldığını gösterir.

$$\varepsilon = \frac{\sum_{j=1}^m T_j}{n * C} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n * C}$$

2.1.4 Hat dengeleme problemlerinde karşılaşılan kısıtlar

Hattın performansını arttırmak, istasyonlara eşit iş yükü dağıtımını sağlamak amacıyla yapılan hat dengeleme çalışmasında uyulması gereken bazı temel kurallar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Bütün işler ve iş elemanları iş istasyonlarına atanmalıdır,
- Bir iş elemanı sadece bir iş istasyonuna atanabilir,
- İş istasyonuna atanan elemanların toplam süreleri çevrim süresini geçemez,
- İş elemanları arasındaki teknolojik ilişkilerden ortaya çıkan ve işin yapılış sırasını etkileyen öncelik ilişkileri bozulamaz.

Bu temel kısıtların yanı sıra hat dengeleme probleminde ürünün ve hattın özelliğine göre oluşan kısıtlarla da karşılaşılabilir. Bu kısıtlara ait örnekler aşağıda verilmiştir (Ghosh ve Gagnon,1989);

- Bir grup iş elemanının aynı iş istasyonuna atanmasını engelleyen (negatif) veya bazı iş elemanlarının aynı iş istasyonunda yapılmasını gerektiren (pozitif) bölgesel kısıtlar,
- Paralel istasyonların gerekliliği,
- Donanım sayısının sınırlı olması,
- İstasyonların hattın sağında veya solunda olma gereği,
- Dar boğaz yaratan istasyonların bulunması,
- Hat uzunluğunun sınırlı olması,
- İşçiler için belirli bir hareket zamanının bulunması, v.d

Gerçek hayatta karşılaşılan hat dengeleme problemlerinin çözümünde teknolojik sınırlamalar, donanım kısıtları, iş istasyonu ile ilgili kısıtlar, çalışanlar ile ilgili sınırlamalar, süreçle ve tesisle ilgili sınırlamaların da göz önünde bulundurulması ve bu koşulları eniyileyecek uygun bir çözümün bulunması gerekmektedir.

2.2 U-Tipi Montaj Hatlarının Gelişimi ve Sağladığı Yararlar

Donanımın ve iş istasyonlarının yerleşim biçimi, montaj hatlarını etkileyen önemli etmendir. Hattın bulunduğu yer ve üretilecek ürünün özellikleri hattın alacağı şekli belirler. Montaj hatları fiziksel olarak değişik biçimlerde tasarlanabilir.

Geleneksel hat dengeleme probleminde modellenen üretim hattı “düz” olarak, diğer bir deyişle, bir hat boyunca biçimlendirilmiştir. İşletmelerdeki yerleşim, işgücü ve benzeri kısıtlardan dolayı geleneksel montaj hatları yetersiz kalmaktadır. Toyota'nın TZÜ (Tam Zamanında Üretim) prensiplerinin uygulanabilmesi için üretim hattını “U” tipinde düzenlemesiyle yeni bir hat tasarımı ortaya çıkmıştır. Geleneksel hatlardan farklı olarak U-tipi montaj hatlarında yerleşim U şeklinde olup, hattın giriş ve çıkışı aynı konumda bulunmaktadır.

Geleneksel hat dengeleme problemi ile U-tipi montaj hattı dengeleme (U-MHD) problemi arasındaki anahtar fark; geleneksel hat dengeleme probleminde, atanabilir işler kümesindeki iş elemanlarının (öncülleri daha önceden atanmış iş elemanları) seçilerek ilgili istasyona atanması, U-MHD probleminde ise, atanabilir işler kümesinin öncülleri atanmış iş elemanları kümesi ile ardılları atanmış iş elemanları kümesinin birleşiminden oluşmasıdır. İstasyona atanacak iş elemanları bu kümeden seçilecektir.

Geleneksel düz montaj hatlarını, U tipi yerleşim biçiminde düzenleme yoluyla, işçiler düz bir hat yerleşiminde mümkün olmayan iş elemanı birleştirmelerini yerine getirebilmek için U-tipi montaj hattının iki bacağı arasında hareket edebilirler. Bu esneklik TZÜ felsefesini benimsemiş firmalara, tesislerinde toplam işçi sayılarını muhtemelen azaltma ve bu şekilde daha etkin bir tesis yerleşimi yaratma imkanı verir.

Geleneksel düz hatların yerine U hatların tercih edilmesinin çeşitli yararları vardır. Bunlar (Miltenburg and Wijngaard, 1994; Okur, 1997);

- Yerleşim nedeniyle çalışanların birbirleriyle daha rahat görsel temas ve iletişim kurmaları sağlanır. Bu durum bir kalite problemi meydana geldiğinde daha çabuk belirlenmesini ve karar verilmesini sağlar.

- Çalışanlar U-tipi montaj hatlarında birçok işi yerine getirebilecek veya birçok farklı makineyi kullanabilecek yüksek beceriye sahip hale gelirler. Bu durumda çevrim süresinin veya üretim hızının değiştirilmesinin gerektiği zamanlarda işçiler herhangi bir makineye hemen uyum sağlayabilir. Ayrıca, çalışanlar birden fazla işi yerine getirebilme düzeyine ulaştıklarında işler arasındaki ilişkileri anlamaktadırlar. Böylece çalışanların gelişime daha iyi katkıda bulunmaları sağlanmaktadır.
- Tam zamanında üretim uygulamasının sonucunda talepteki değişikliklere uyum sağlanabilmesi kolaylaşmıştır. U hattının üretim hızı hatta yeni işçi ilave edilmesi veya işçi eksilmesi ile düzenlenebilmektedir. Talep düşük olduğunda hatta az işçi çalıştırılmakta ve bu durumda her bir işçi oldukça yüksek sayıda makineden sorumlu olduğundan hattın üretim hızı düşmektedir. Hattaki ürüne talep arttığı zaman ise, hatta işçi takviyesi yapılmaktadır. Bu durumda her bir işçi daha az sayıda makineden sorumlu olacağından üretim hızı ve üretim miktarı talebe uyumlu hale gelmektedir. Geleneksel düz hatlarda ise işçilerin farklı işlere ve farklı makinelere uyum sağlamaları güç olduğundan bu hatlarda tekrar dengeleme çalışması yapılması çok zordur. Bu tip hatlarda çevrim süresi genellikle değişmediğinden talepteki değişim hattın çalışma süresinin düzenlenmesi ile karşılanmaya çalışılır.
- U-tipi montaj hatlarında ihtiyaç duyulan istasyon sayısı en fazla geleneksel hatlarda ihtiyaç duyulan kadardır. Çünkü U-tipi montaj hatlarında işlerin istasyonlarda gruplandırılması için daha çok olasılık vardır.
- Stokların azaltılması, malzeme taşımalarının basitleştirilmesi, üretim planlaması ve kontrolünün kolaylaştırılması, takım çalışması ve problem çözmeye elverişli olması, daha iyi kalite kontrol sağlanması gibi birçok sebepten dolayı U hatlar tercih edilmektedir.

2.3 U- Tipi Montaj Hattı Dengelemede Tamsayı Programlama

Basit U-MHD probleminde en iyi çözümü sunan algoritmalarından birisi, Urban (1998) tarafından geliştirilen, tam sayılı programlama algoritmasıdır. Algoritma, problemin NP-hard yapıda olması nedeniyle ancak kısıtlı büyüklükteki problem kümeleri için iyi bir performans sağlayabilmektedir. Pek çok çalışmanın temeli bu modele dayandığından aşağıda ayrıntılı olarak tanıtılmıştır.

Urban'ın (1998), modelinde amaç; m adet ($j = 1, \dots, m$) iş istasyonuna atanacak ve tamamlanma süreleri t_i ($i = 1, \dots, n$) olan n iş elemanı olduğu varsayıldığında, verilen 1. tip problem (çevrim süresinin sabit olduğu, enküçük istasyon sayısının araştırıldığı) için ihtiyaç duyulan istasyon sayısının, m^* , C çevrim süresi içinde enküçüklenmesidir.

$$[m_{enk}] \leq m^* \leq m_{enb} \leq n$$

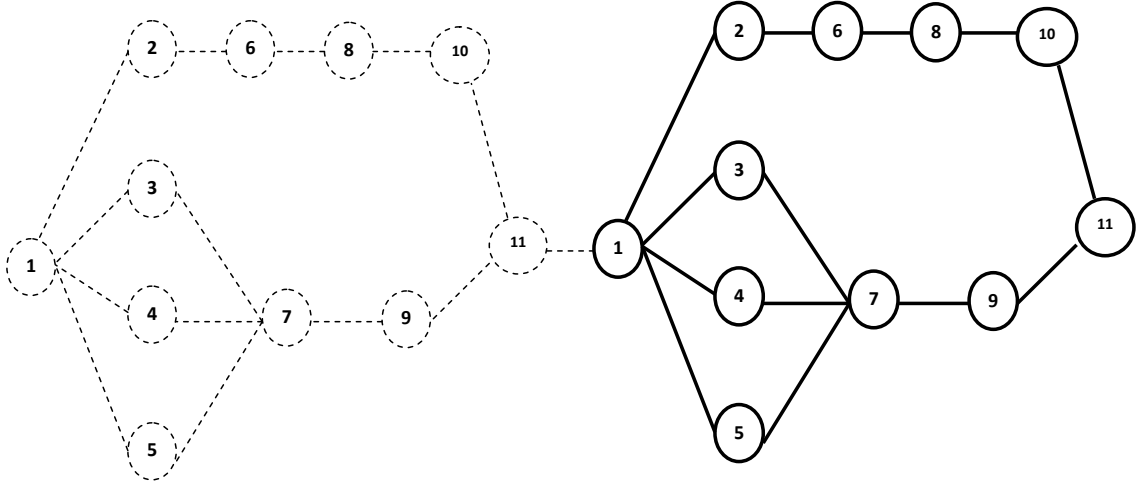
m_{enk} teorik olarak ihtiyaç duyulan enküçük istasyon sayısıdır. $[x]$, x 'e eşit veya büyük enküçük tamsayıyı verir.

$$m_{enk} = \frac{\sum_i t_i}{C}$$

m_{enb} ise ihtiyaç duyulabilecek enbüyük istasyon sayısıdır ve iş elemanı sayısından büyük olamaz.

U-MHD problemlerinin ayırt edici özelliği, montajın ilk ve son işleminin aynı istasyona atanabilmesinde olduğu gibi, işlerin istasyonlara ileri ve geri atanmasına da izin vermesidir. Geleneksel hatlarda bu tür bir uygulama gerçekleştirilemez. U-MHD probleminin tamsayı programlama yaklaşımı ile çözümünde Şekil 2.1' de gösterildiği gibi asıl öncelik diyagramına ilave edilen gölge bir öncelik diyagramından yararlanılmaktadır. Genişletilen diyagramın ortasından başlanılmasıyla asıl diyagramda

ileri, gölge diyagramda geri veya aynı anda her iki yöne de istasyonlara atama yapılarak en iyi dengeleme elde edilir (Urban,1998).



Şekil 2.1 Gölge Diyagram İlave Edilerek Genişletilmiş Öncelik Diyagramının Gösterimi

Urban'ın (1998) tam sayılı programlama modelinde kullanılan notasyon izleyen şekildedir .

i iş elemanları indisi,

j istasyonlar indisi,

n toplam iş elemanı sayısı,

m_{enb} enbüyük iş istasyonu sayısı,

m_{enk} teorik olarak ihtiyaç duyulan enküçük istasyon sayısı,

C çevrim süresi,

$P = \{1, \dots, p, \dots, |P|\}$:Öncelik ilişkilerini yansıtan düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi

($p = (r, s)$, r iş elemanı s iş elemanından hemen önce gelmektedir).

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{asıl diyagramdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{gölge diyagramdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$z_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyondan yararlanılması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

Bu durumda U-MHD problemi için geliştirilmiş tamsayılı programlama modeli aşağıdaki gibi gösterilir;

Model:

$$Enk \ Z = \sum_{j=[m_{enk}]+1}^{m_{enb}} z_j \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^{m_{enb}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad j = 1, \dots, [m_{enk}], \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C z_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb}, \quad (3b)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P, \quad (4a)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P, \quad (4b)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (5)$$

Modelin amacı ihtiyaç duyulan istasyon sayısının enküçüklenmesidir. İkinci kısıt kümesi her iş elemanının, ya asıl diyagramda ya da gölge diyagramda, sadece bir istasyona atanmasını sağlar. Üçüncü kısıt kümeleri her bir istasyona atanan iş elemanlarının sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmamasını sağlar, z_j değişkeni birinci $[m_{enk}]$ kısıtı için gerekli değildir, çünkü bu istasyonların gerekli olduğu bilinmektedir. Dördüncü kısıt kümeleri ise iş elemanları arasındaki öncelik ilişkilerinin uygulanmasını sağlar. Bu ilişkiler gölge diyagramda tersine çevrilmiştir. Elde edilen bu model $(2n + 1)m_{enb} - [m_{enk}]$ değişken ve $n + m_{enb} + 2|P|$ tane kısıt içermektedir (Urban,1998).

Gökçen ve Ağpak (2003), Urban'ın modeli üzerinde iyileştirmeler yaparak, değişken sayısını azaltmaya çalışmışlardır. Urban'ın modelinde tüm iş elemanlarının tüm istasyonlarda yapılabileceği varsayılmıştır. Gökçen ve Ağpak'ın modelinde ise iş elemanlarının atanabileceği istasyonlar için bir alt sınır yani ilk istasyon tanımlanmıştır. U-tipi montaj hatlarında görevler tüm istasyonlarda yapılabileceğinden bir üst sınır yani son istasyon belirlenmesi mümkün değildir.

Modelde kullanılan en erken istasyon ifadeleri şöyledir (Gökçen ve Ağpak, 2003);

OE_i : orijinal diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

FE_i : gölge diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

OP_i : orijinal diyagramdaki i iş elemanının öncülleri kümesi,

FP_i : gölge diyagramdaki i iş elemanının öncülleri kümesi,

olmak üzere;

$$OE_i = \left\lceil \frac{(t_i + \sum_{j \in OP_i} t_j)}{C} \right\rceil \quad i=1, \dots, n$$

$$FE_i = \left\lceil \frac{(t_i + \sum_{j \in FP_i} t_j)}{C} \right\rceil \quad i=n, n-1, \dots, 1$$

Burada dikkat edilmesi gereken, başlangıç noktasının genişletilmiş diyagramın orta noktası olduğudur.

Geliştirilen modellerde de iş elemanlarının atanmasında kullanılan bu alt sınırlar temel alınmakta, Urban'ın modeli de bu alt sınırları içerecek şekilde aşağıdaki şekliyle sonuç karşılaştırmalarında kullanılmaktadır.

Yeni sınırlar ile önerilen model aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

Model:

$$Enk Z = \sum_{j=[m_{enk}]+1}^{m_{enb}} z_j \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in OE_i}^{m_{enb}} (x_{ij}) + \sum_{j \in FE_i}^{m_{enb}} (y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n, \quad (2')$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad j = 1, \dots, [m_{enk}], \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq Cz_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb}, \quad (3b)$$

$$\sum_{j \in OE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{rj}) - \sum_{j \in OE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4a')$$

$$\sum_{j \in FE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{sj}) - \sum_{j \in FE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4b')$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (5)$$

2.4 U-Tipi Montaj Hatları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Basit U tipi hat dengeleme probleminde eniyi çözüm sunan yöntemlerden birincisi, Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından ortaya konan ve 20 iş elemanına kadar makul sürede çözüm sağlayabilen dinamik programlama modeli, diğeri ise Urban (1998) tarafından geliştirilen, 45 iş elemanı ve 15 istasyona kadar makul sürede çözüm sunabilen tam sayılı programlama modelidir. Her iki algoritma da problemin NP-hard yapıda olması nedeniyle ancak kısıtlı büyüklükteki problem kümeleri için iyi bir performans sağlayabilmektedirler.

Yine Miltenburg ve Wijngaard (1994), geleneksel MHD problemleri için geliştirilen sezgiselleri U tipi MHD problemine uyarlamışlardır. Sparling ve Miltenburg (1998), karışık modelli U tipi hat dengeleme probleminin çözümü için dört aşamalı bir sezgisel yöntem sunmuşlardır. Miltenburg (1998), belli bir sayıda U hatta sahip tesiste eniyi dengeyi bulan bir dinamik programlama algoritması sunmuştur. Çalışmada her bir U hattı 22 iş elemanından fazlasını içermemeli ve geniş öncelik diyagramlarına sahip olmamalıdır.

Nakade ve Ohno (1996), rassal U tipi hat dengeleme probleminin genel durumu için hattın beklenen çevrim süresinin alt ve üst sınırlarının tespiti üzerinde çalışmışlardır. Nakade ve Ohno (1997), parçaların imal sürelerinin, işlem sürelerinin ve işçinin makineler arasında yürüme sürelerinin bağımsız ve belirli rassal dağılmış değişken olduğu ve çoklu beceriye sahip tek bir işçinin çalıştığı U-tipi montaj hattı üzerine çalışma yapmışlardır. Nakade vd. (1997), birden fazla çok fonksiyonlu işçinin olduğu ve herbir işçinin, çeşitli makinalardan sorumlu olduğu U tipi montaj hatları üzerinde çalışmışlardır. Ohno ve Nakade (1997), çok fonksiyonlu bir işçinin olduğu U-tipi montaj hattını dikkate almışlardır. Operasyon süreleri ve işçinin makineler arasındaki yürüme süreleri sabit alınarak, işçinin bekleme süresi ve hattın çevrim süresinin belirlenmesine yönelik çalışmışlardır. Aynı çalışmada, hatta birden fazla işçinin olması durumu da analiz edilmiştir.

Ajenblit ve Wainwright (1998), U-tipi hat dengeleme problemi için genetik algoritma çözümü geliştirmişlerdir. Nakade ve Ohno (1999), yine birden fazla çok

fonksiyonlu işçinin olduğu U-tipi montaj hattını analiz etmişlerdir. Talebi karşılayacak en az işçi sayısı kısıtı altında, çevrim süresini enküçükleyecek eniyi işçi ataması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, tüm süreç, işlem ve yürüme zamanları deterministik olarak dikkate alınmıştır.

Scholl ve Klein (1999), U-tipi hatları dengelemek amacıyla dal-sınır tekniğini kullanan ve oldukça etkin sonuçlar üretebilen ULINO (U Line Optimizer) sezgiselini geliştirmişlerdir. Yöntem, 45 iş elemanından büyük problemler için oldukça etkin çözümler sunabilen, literatürdeki tek çalışma olarak bilinmektedir.

Cheng vd. (2000), düz ve U-tipi hat yerleşimlerinin, hatta üretilen ürünlerin kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kim vd. (2000), karma-modelli U-hatlarının dengelenmesi ve sıralama problemini aynı anda çözen ve “co-evolutionary algorithm” olarak adlandırılan, yapay zeka algoritmasının kullanıldığı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Miltenburg (2000), U-tipi hatlarda arızaların etkisini incelemiştir. Miltenburg (2001a), U tipi hatlarla ilgili olarak pratikteki örneklerini içeren kapsamlı bir çalışma da yapmıştır. Çalışmada 114 adet Amerikan ve Japon U hattı analiz edilmiştir. Miltenburg’un (2001b), tek parça akışlı üretim üzerine bir literatür araştırması da bulunmaktadır.

Ağpak ve Gökçen (2001), U-tipi montaj hatlarının dengelenmesi için bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem, geleneksel problemler için geliştirilen COMSOAL yönteminin, U-tipi montaj hattı dengeleme problemlerini çözebilecek şekilde düzenlenmesiyle oluşturulmuştur (U-COMSOAL).

Chand ve Zeng (2001), rassal iş elemanı süresinin düz hat ve U hat yerleşimi üzerindeki etkisini incelemişler, farklılıkları açıklayan çeşitli analitik sonuçları ve benzetim sonuçlarını sunmuşlardır. Erel vd. (2001), U hatlarının dengelenmesi için tavlama benzetimi temelli yeni bir algoritma geliştirmişlerdir.

Ağpak ve Gökçen (2002 a), U-tipi montaj hattı literatüründeki ilk bulanık tamsayı programlama (U-FP) modelini geliştirmişlerdir. Ağpak ve diğerleri (2002 b) iş elemanı zamanlarının normal dağılımla ifade edildiği (rassal) U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir sezgisel yöntem de önermişlerdir.

Guerrero ve Miltenburg (2003), iş elemanı sürelerinin rassal olduğu durum için U hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Nakade ve Ohno (2003), U hatlarına işçi atamasında ayrı ayrı atama ve atlı karınca atamasını kullanmışlardır. Ayrı ayrı atamada, her bir işçi tek tip makine setinde görev alır ve her bir makinede aynı işçi her çevrimde parçaları işler. Atlı karınca atamasında, tüm işçiler tüm makinelerde aynı sırada görev alır.

Aase vd. (2003), U-MHD problemi için dal-sınır algoritmasını kullanan bir sezgisel geliştirmişlerdir. Gökçen ve Ağpak (2003), Urban tarafından geliştirilen model üzerinde iyileştirmeler yaparak, değişken sayısını azaltmaya çalışmışlardır.

Aase vd. (2004), U hat yerleşiminin işgücü verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Gamberini vd. (2004), U tipi montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için hem işgücü hem de tamamlanmama maliyetini enküçüklemeyi amaçlayan bir sezgisel geliştirmişlerdir. Önerilen model maliyet enküçüklemesi ve iş elemanlarının yeniden atanması arasında uzlaşık bir değer elde etmek için çok amaçlı yaklaşım temelindedir.

Kara vd. (2004a), karışık modelli U-tipi montaj hatlarında dengeleme ve model sıralaması probleminin çözümü için tavlama benzetimi tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Kara ve Özcan (2004), karışık modelli U-tipi montaj hatlarının paralel iş istasyonları ile dengelenmesi için bir sezgisel yöntem önermişlerdir.

Tekin vd. (2004), montaj işlemlerine ait iş elemanlarının tamamlanma zamanları, ortalaması ve standart sapması bilinen belirli bir olasılık dağılımına uyan karışık modelli U-tipi montaj hatlarında, hat dengelemesini ve model sıralamasını eşzamanlı olarak gerçekleştiren bir sezgisel geliştirmişlerdir.

Gökçen vd. (2005), basit U-MHD problemi için en kısa yol modeli geliştirmişlerdir. Bu model geleneksel montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilen modeli temel almaktadır.

Chiang ve Urban (2006), rassal U-MHD problemi için yeni bir sezgisel önermişlerdir. Önerilen sezgisel başlangıç uygun çözüm modülü ve çözüm iyileştirme modülü olmak üzere iki ana prosedürden oluşmaktadır.

Gökçen ve Ağpak (2006), basit U-MHD problemine hedef programlama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Model Urban'ın geliştirdiği tamsayılı programlama modelini temel almaktadır. Model U hat yerleşimi için ilk çok ölçütlü karar verme yaklaşımını içermektedir.

Urban ve Chiang (2006), rassal iş elemanı sürelerine sahip U-MHD problemi için eniyi çözüm metodolojisi geliştirmeye çalışmışlardır. Ele aldıkları problemi, şans kısıtları (chance constraints) için adım adım (piecewise) yaklaşımını kullanarak doğrusal, tamsayılı programlama şeklinde modellemişlerdir.

Kim vd. (2006), karma modellenli U-MHD için eşzamanlı olarak hat dengeleme ve model sıralama problemini çözen ve “endoymbiotic evolutionary algorithm” olarak adlandırılan yeni bir genetik yaklaşım geliştirmişlerdir.

Kara vd. (2007), karma modellenli U-tipi montaj hatlarında dengeleme ve model sıralaması probleminin çözümünde birbirleri ile çelişen üç farklı hedefin aynı anda en iyilenmesini amaçlayan bir sezgisel yöntem sunmuşlardır. Çalışmada iş elemanı sürelerinin deterministik olduğu kabul edilmiştir.

Ağpak ve Gökçen (2007), rassal geleneksel ve U-MHD problemleri için şans-kısıtlı (chance-constrained) programlama tekniğini kullanarak yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Shewchuk (2007), U hatları için işçi sayısını enküçükleyen ve tamamlanmış işi enbüyükleyen işçi atama problemini ele almıştır. Özcan ve Peker ise (2007), karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemleri için yeni bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir.

BÖLÜM 3

MONTAJ HATLARINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR DENGE İÇİN ERGONOMİ

İnsan faktörleri mühendisliği araştırmaları göstermiştir ki; insanların kendilerini diğer cansız işgörenlerden ayıran kendine has nitelikleri mevcuttur. Bu nedenle geleneksel çizelgelemede, kaynaklarla ilgili pek çok varsayımın insan tarafından yerine getirilen görevler sıralanırken uygulanabilir olmadığı vurgulanmaktadır. Çizelge 3.1’de insan davranışını basitleştirmek için kullanılmakta olan pek çok varsayım özet şeklinde sunulmaktadır (Boudreau vd., 2003; Lodree vd. 2009).

Çizelge 3.1 İnsan davranışını basitleştirmede kullanılan varsayımlar

-
1. İnsanlar önemli bir faktör değildir (Makineleri insansız inceleyen pek çok modelde, bu sebeple insan yönü göz ardı edilir)
 2. İnsanlar deterministiktir ve davranışları önceden kestirilebilir. İnsanlar her zaman işe hazırdır (mola yok, devamsızlık yok, vb.). İş elemanı süreleri deterministiktir. Hata yapılmaz ya da hatalar rassal olarak meydana gelir. İşçiler aynıdır (aynı hızda çalışır, aynı değere sahiptir, aynı güdüleyicilere yanıt verir).
 3. İşçiler bağımsızdır (fiziksel ya da psikolojik olarak birbirlerinden etkilenmezler).
 4. İşçiler durağandır. Öğrenme, yorgunluk ya da diğer örnekler yoktur. Problem çözme yeteneği yoktur.
 5. İşçiler ürün ya da hizmetin parçası değildir.
 6. İşçiler duygusuzdur ve gurur, sadakat ve utanma gibi faktörlerden etkilenmez.
 7. İş tamimiyle gözlenebilir. Ölçüm hatası göz ardı edilir.
-

Bu gibi varsayımlar, modelleme ve matematik işlemlerini kolaylaştırırken çok önemli özellikleri ihmal eder. İnsan faktörü birbirinden farklı davranışlar sergileyen, çevresel etkilere farklı tepkiler veren, belirli olduğu varsayılmayacak bir sistem bileşenidir. İnsan görevlerini sıralama problemlerinde insanla ilgili faktörler önemli rol oynamaktadır. Etki eden faktörlerden bazıları günlük biyolojik değişim, yorgunluk, stres ve uyarılma, toplam iş yükü şeklinde sıralanabilir. İnsan performansını etkileyen

diğer faktörlere örnek olarak, beceri, öğrenme ve unutma, bireysel farklılıklar, insan limitleri, dikkat ve insan sağlığı ile ilişkili performans ölçümlerini sayılabilir.

Aynı iş yükü altında iki kişi farklı zorlanabilir; yaptıkları iş aynı da olsa güçlü bir işçinin zorlanması, hastalıktan yeni kalkmış bir başka işçinin zorlanmasından çok daha alt düzeydedir.

Günlük yaşamımızda bir referans değere gereksinimimiz olduğunda hep ortalama değerlerden hareket etme alışkanlığımız vardır. İnsanın yetenekleri söz konusu olunca da ortalama değerleri düşünürüz. Halbuki pek çok özellik ortalama değerden öylesine büyük sapmalar gösterebilir ki, ortalama değerler temel alınarak yapılmış bir iş yeri düzenlemesi bazı hallerde işe yaramayabilir. Özellikler kişiden kişiye büyük farklılıklar arz ederek değişirken, kişinin kendisinde de iki zaman dilimi arasında özellik değişikliği olabilir (Babalık, 2007).

İnsan faktörünü dikkate alan ergonomik tasarımlar, hem çalışanlara yönelik çözümler sağlayacak hem de üretkenliği artıracaktır.

3.1 Ergonomi

Dünyada endüstri devrimi ile birlikte insanlarda sağlık-hastalık-iş arasında bir ilişki olduğu düşüncesi ağırlık kazanmaya başlamış ve bu alanda araştırmalara önem verilmiştir. Bu araştırmaların oluşturduğu bilim dalına da pek çok ülkede ERGONOMİ adı verilmiştir. İşbilim ise çalışan insanla ilgilenen tüm bilimleri içeren bir bilim dalı olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle İŞBİLİMİ ergonomiyi de içine alan daha geniş bir bilim dalı olarak kabul edilmiştir (Babalık, 2007).

Babalık'a (2007) göre İşbilim, iş süreçlerinin teknik ve sosyal alanlarla olan bağlarını analiz eden ve aşağıda sayılan amaçlara ulaşmayı sağlayacak düzenlemeleri öneren bir bilim dalıdır. Amaçları, işgörenin üretken olarak verimli bir işte çalışmasının temini ve bu süreçte

- a) Zararsız, yapılabilir, dayanılabilir, iş koşullarının sağlanması,
- b) İş içeriği, işin çevre koşulları, işin karşılığı olarak ücretlendirmeyi, iş birliği ve iş bölümü ile ilgili sorunların incelenmesi, kurallarının belirlenmesi,

- c) İş görene işin özelliğine uygun serbestlik vererek, yeteneğini geliştirme, yeni yetenekler edinme, diğer iş görenlerle karşılıklı iş bölümü ve iletişim sayesinde kişiliğini geliştirme olanağının sunulması ve
- d) İşçinin işinde mutlu kılınması olarak sıralanmaktadır.

Bu listeye göre işbilimin amaçlarının aslında işletmelerin ekonomik başarılarının temel faktörü olduğu, burada insanın da ortaya koyduğu performansla bu amaçlara ulaşmayı garantileyen ana öge olduğu ortaya çıkar.

Bu açıklamalardan sonra işbilim için şu tespitler yapılabilir:

- a) İşbilim insanın tek başına veya başkalarının da katkısıyla, gerektiğinde iş ortamını oluşturan tezgah, takım, el aleti gibi teknolojik öğelerden de yararlanarak yaptığı işi inceler.
- b) İşbilim yapılan işin koşullarını, iş görene etkisini ve sonuçlarını, bu sonuçların işgörenin davranışındaki, performansındaki değişiklikleri araştırır.
- c) İşbilim işin değerlendirilmesini, işe ilişkin sosyal problemleri sorgular.
- d) İşbilim işi insancılaştırarak yönde iş koşullarını etkileyen faktörleri inceler.

İşbilimi böylesine geniş bir alana yerleştirdikten sonra, bunun bir dalı olarak ergonominin tanımı da şu şekilde yapılabilir: Ergonomi özellikle iş gören ile teknik sistem arasındaki ilişkiyi inceleyen; sayılar ve birimlere dayanarak iş ve işyeri düzenlemelerini yapan; ana amacı insanın özellikleri ve istekleri, beklentilerine uygun iş düzenlemeleri gerçekleştirmek olan uygulamaya yönelik bir bilim dalıdır.

İşbilim uygulamada iki temel bölüme ayrılabilir (Babalık, 2007). Birincisi iş içeriğini, iş akışını, iş ve zaman etüdünü, personel seçimini inceleyen makro ergonomi, diğeri de iş yeri, iş ortamı ve iş aletlerinin teknik şekillendirilmesi, düzenlenmesini inceleyen mikro ergonomidir. Mikro ergonominin ana konusu yapılacak işin, çevre koşullarının ve insan-makine etkileşiminin analizi ile tüm iş sisteminin performansını artırmak ve iş görene etkiyen yükü azaltmaktır.

Bir iş yerinde her işgörene aynı yük paylaştırılsa bile, kişiler farklı özelliklere, yeteneklere, sınırlara sahip olduklarından farklı düzeyde zorlanırlar. Yük

değerlendirilirken yükün düzeyi kadar, yükün süresi de önemlidir. Yükün düzeyi zaman içinde değişir.

İş yükü işgörende kişinin kendine has, bireysel özelliklerine bağlı olarak bir etki oluşturacaktır. Kişinin fiziksel özellikleri, yeteneği, becerisi, deneyimine göre iskelet, kaslar, kalp, solunum sistemi, duyu organları, ter bezleri, merkezi sinir sistemi ve deride zorlanma meydana gelir. Zorlanma kişisel özelliklere bağlı olduğundan, aynı iş yükü, farklı insanlarda farklı zorlanmalara neden olur. Yük taşıma deneyimi olan sağlıklı işçi ile bu konuda deneyimsiz, zayıf bir büro çalışanın 25 kg.lık kutuyu dört kat yukarıya taşımadaki zorlanmalarının farklı olacağı gibi...

Yük, işin yapılmasında, insana karşı gösterilen ve işgörenin yenmesi gereken bir dirençtir. Kişinin zorlanması ise sadece iş sisteminden gelen yüke bağlı değildir, aynı zamanda onun kişisel özelliklerine de bağlıdır. İş yapabilecek özelliklere sahip olmak, o iş için gerekli yeteneğe sahip olmak demektir. Her insan belirli konularda, belirli düzeyde farklı yeteneğe sahiptir. Kişiye özgü farklılıklar dolayısıyla bu yeteneğinin iş esnasında kullanabileceği, sunabileceği bir sınır vardır. Yetenek genelde doğuştan sahip olunan bir özelliktir ama eğitim, antrenman ve uygulamalarla geliştirilebilir. Bu yeteneğinin ne kadarını işinde kullanacağı ise, kişinin işe hazır ve gönüllü olma düzeyine bağlıdır. İşe gönüllülük hali ise hem bedensel yetenekle hem de güdülenmeyle doğru orantılıdır. Yetenek varsa ve işgören işe gönüllü ise, iş düzenlemesi ve iş organizasyonu da doğru yapıldıysa, iş sisteminden hem nitelik hem de nicelik açısından iyi bir ürün çıkar.

Yukarıda anlatılanların sonucu olarak diyebiliriz ki, zorlanma tüm kısmi yüklerin düzeyi ve süresine bağlı, ayrıca kişinin özelliklerine göre de değişen bir olgudur.

İşgörenin özellikleri (fiziksel ve zihni sağlığı, gücü, eğitimi, deneyimi vb.), iş yükünü dengede tutan faktörlerdir. Zorlanmayı arttıran, sadece iş yükünün artması değildir. Eğer kişinin özellikleri yükü dengeleyebiliyorsa, kişinin zorlanması pek fazla olmayacaktır. Ama hastalık sonrası nekahat dönemi, deneyimsizlik, motivasyon azlığı vb. nedenler kişinin özelliğini iş yapabilme yeteneğini olumsuz etkiliyorsa veya normal koşullarda da işçi için bu iş yükü büyükse zorlanma elbette büyük olacaktır.

3.2 Montaj Hatları ve Ergonomi

Montaj hatlarının tasarımında ve dengelenmesinde ergonomik faktörleri dikkate alan çalışmaların sayısı ne yazık ki çok azdır. Sanayideki mühendisler ile yapılan bir anket sonucunda Gunther vd. (1983), hat dengeleme için belirlenen amaç ve kısıtların pek çok gerçek hayat problemi için yetersiz kaldığını göstermişlerdir. Bu çalışma, gerçek hayat montaj hattı dengeleme problemlerinde insan faktörünün göz ardı edilemeyeceğini vurgulayan ilk çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsan faktörünü dengeleme sırasında dikkate alan çalışmalardan biri, Özgörmüş'e (2007) aittir. Çalışmasında düz hat dengeleme için işlerin zorluk derecelerini, risk ve monotonluk düzeylerini dikkate almıştır. Zorluk derecesi, risk ve monotonluk düzeylerini bulanık olarak tanımlamıştır.

Corominas vd. (2008), çalışmalarında, talepteki mevsimsel değişikliklere uyum sağlayabilmek amacıyla geçici işçi çalıştıran işletmelere yönelik bir tamsayılı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır. Amaç, geçici işçi maliyetini enküçükmektir.

Choi (2009), işlerin tekrar etme sıklığı ve ağırlığından, çevresel sebeplerden ve uygunsuz duruşlardan (postür) kaynaklanan risk faktörlerini dikkate alarak karma modellenli montaj hatları için hedef programlama yaklaşımı ile çözüm aramıştır.

Costa ve Miralles (2009), engelli işçilerden etkin olarak faydalanılabilmesi için, montaj hatlarında iş dönüşümü belirleme amacıyla, bu işçilerin iş elemanı süreleriyle ilgili performanslarını içeren karma tamsayılı doğrusal model ve sezgisel bir ayrıştırma modeli önermişlerdir.

Aşağıda bahsi geçen çalışmalar ise montaj hatlarındaki mevcut durumları araştıran çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bao vd. (1997), Çin ve İsveç'teki benzer montaj hatlarında, iş elemanlarının işçilerde meydana getirdiği omuz-boyun rahatsızlıklarını incelemiş ve farklılıkları ortaya koymuşlardır.

Duquette vd. (1997), uçak montaj işçilerinin sırtla ilgili iş elemanlarını zorluk açısından algılamalarına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında işin süresi, içeriği, iş postürü ve harcanan güç faktörlerini dikkate almışlardır.

Freiboth vd. (1997), Avrupa otomotiv endüstrisindeki çeşitli tipte montaj hatlarında, ergonomik faktörler dikkate alınarak otomasyonun artırılmasıyla, hem işçiler üzerindeki yüklerin azaltılmasının sağlanacağını hem de daha verimli hatlara ulaşılacağını ortaya koymuştur.

Hägg vd. (1997), otomotiv montaj hattında çalışan işçilerin el hareket pozisyonlarının bilek-kolda yarattığı kassal iş yükünü incelemiştir.

Häkänen vd. (1997), römork montaj işçileri üzerinde yaptığı incelemeyle, sırt ve üst gövdenin maruz kaldığı kassal zorlanma yükünün hangi iş elemanları için daha fazla olduğunu ortaya koymuştur.

Zetterberg vd. (1997), bir montaj hattında çalışan işçilerin yaşadığı boyun ve kol problemlerinin sebeplerini iş memnuniyeti, fiziksel yük ve cinsiyet açısından incelemiştir.

Norman vd. (1998), otomotiv montaj hattında omuriliğin maruz kaldığı yük ve gövde duruşunun bel ağrısı ile ilişkisini belirlemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Chryssolouris vd., (2000) çalışmalarında çevrim süresini belirlemek için ergonomik faktörleri göz önünde bulundurmuşlardır.

Potvin vd. (2000), otomotiv döşemesi montajında tekrarlı, elle yapılan iş elemanlarının kabul edilebilir limitleri için iki farklı grup üzerinde bazı ergonomik faktörleri dikkate alan bir psikofiziksel çalışma yapmışlardır.

Lin vd. (2001), iş istasyonlarındaki ergonominin ürün kalitesi üzerindeki etkisini incelemiştir.

Medbo (2003), çalışmada, paralel montaj hatlarında, işçinin malzemelere erişim kolaylığı ve erişim hareketlerinin bilişsel olarak öğrenilmesi üzerine bir araştırma yapmıştır.

Wartenberg vd. (2004), bir otomotiv endüstrisinde montaj noktaları için verilen toleransların (alan olarak) işçilerin hızı, duruşsal (postural) davranışları ve hareketleri üzerinde güçlü etkisi olduğunu ortaya koyan bir çalışma yapmışlardır.

Kazmierczak vd. (2005), bir otomobil demontaj hattında çalışan işçilerin mevcut fiziksel iş yüklerini ve işler için harcanan süreleri incelemiş ve demontaja değer katan iş elemanlarının mekanikleştirilmesiyle işçilerin maruz kalacağı fiziksel yüklerin azaltılabileceği sonucuna varmışlardır.

Lin ve Chan (2007), çalışmalarında kas iskelet sistemi risk faktörlerinin ve kas iskelet sistemi semptomlarının azalmasına ergonomik iş istasyonu tasarımının etkisini değerlendirmişlerdir.

Landau vd. (2008), yaşlı ve genç montaj işçileri üzerinde kas iskelet sistemi hastalıkları için bir araştırma yapmışlardır.

Balasubramanian vd. (2009), çalışmalarında sabit ve dinamik ayakta duruşları (postür) analiz etmişlerdir. Montaj hattındaki iş elemanları gibi monoton uzun süre ayakta yapılan görevlerin artan yorgunluğa, aktif kaslarda ağrı ve sertliğe neden olduğunu ileri sürmektedirler. Sabit ayakta çalışmanın kaslara kan akışını azalttığını, yorgunluk başlangıcını hızlandırdığını ve bacak, sırt ve boyun kaslarında ağrıya sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Arai vd. (2010), endüstriyel robotların işçilerde yarattığı mental gerilim üzerine bir çalışma yapmışlardır.

3.3 U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesinde Ergonomik Faktörlerin Etkisi

U-tipi montaj hatlarının pek çok faydası olmasına karşın genellikle istasyon sayısını azaltmaya yönelik faydasından yararlanma çabası mevcuttur. Ancak U hatlarını dengelerken, iş istasyonlarında artan iş yükünün getirdiği sorunlar ve diğer ergonomik faktörler dikkate alınmamaktadır. U hatlarını dengelerken ergonomik faktörlerin göz önünde bulundurulması durumunda, yapılan dengeden sapma olması ihtimali ve işçilere fazla yük atanmasından dolayı oluşabilecek yorgunluk, dikkat dağılması ve dolayısıyla iş kazaları ve kalite problemleri enazlanmış olacaktır.

Geleneksel U tipi montaj hattı dengeleme problemlerinde iş elemanlarının öncelik ilişkileri sağlanarak, istasyon boş süreleri enküçüklendiğinde hattın dengeye ulaştığı söylenmektedir. Ancak iş elemanlarının süreleri; işlerin zorluğu ve risk derecesi gibi bazı faktörler hakkında bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle ergonomik faktörleri dikkate almadan yapılan dengelemenin sürdürülebilir olması beklenmemelidir.

U tipi montaj hatlarında iş elemanlarını gruplama imkanı düz hatlara göre daha fazla olduğundan işçinin çalışma ortamı daha karmaşık ve dinamik bir hale gelmektedir. İşlerin istasyonlara atanması sırasında, işçilerin atanan tüm işleri fiziksel ve zihinsel açıdan kaldırabileceği kabulü vardır. İşçilerin atanan işlerden dolayı maruz kaldıkları zorlanmaların ergonomik açıdan değerlendirilmesi yapılmamaktadır. U hatlarının pek çok yararı olmasına rağmen literatürde çoğunlukla iş gücü sayısını azaltma yönlü bir fayda beklentisinden söz edilmektedir. İş gücünü azaltırken, işçilere yüklenen işlerin ergonomik açıdan dengeli dağıtılıp dağıtılmadığına pek önem verilmemektedir. Eğer dengeleme yapıldığında ergonomik olarak işçilere kaldırabileceğinden fazla yüklenme yapılmışsa bir süre sonra yorgunluk görülecek, bu da dengeden sapmalara neden olacaktır. İşçinin aşırı yorgunluktan dolayı dikkatinde dağınıklar olduğunda, iş kazaları meydana gelecek ya da kalite problemleri oluşmaya başlayacaktır. Bu nedenle iş elemanlarını çok daha farklı şekillerde gruplama imkanı olan U-tipi montaj hatlarında özellikle ergonomik faktörleri de dikkate alarak daha gerçekçi ve insancıl bir dengeleme yapılmalıdır.

3.4 Ergonomik Kısıtlar Altında U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi

Montaj hatlarının dengelenmesi sürecinde göz önünde bulundurulabilecek faktörler için yapılan araştırma sonucunda, modele eklenerek ergonomik iyileşme sağlayacağı düşünülen kısıtlar izleyen bölümlerde tanıtılmıştır.

3.4.1 İşçilere atanacak işler için toplam zorlanmanın dengeli dağıtılması

İşçilerin iş elemanlarını yerine getirirken maruz kaldıkları zorlanma istasyonlara dengeli bir şekilde dağıtılmalıdır. Örneğin, iş elemanları için ihtiyaç duyulacak enerji gereksinimleri işin yapısına göre birbirinden farklılık gösterebilir. Bu durumda süre

olarak kısa fakat enerji gereksinimi açısından zor iş elemanlarını aynı istasyonda grupladığımızda işçiye kaldırabileceğinden fazla yük atanabilir. Bu da zaman içinde işçinin yorulmasına, dikkatinin dağılmasına hatta iş kazalarına sebep olabilir. Bu nedenle iş elemanlarının yapısına göre ihtiyaç duyacakları enerji miktarları göz önünde bulundurularak atama yapılabilir. Bir başka örnek ise, bir istasyonda gruplanmış iş elemanlarının işçinin sürekli aynı kas grubuna yüklenmesine neden olabilmesidir. Bu durumda işçi zamanla bu kas grubunda rahatsızlık hissetmeye başlayacaktır. Bir süre sonra oluşacak yorgunluk sebebiyle iş elemanını yapma süresi ve kalitesi değişecek, kaslarındaki zorlanma meslek hastalığı riskini artıracaktır. Bu nedenlerle zorlanmanın işlerin taşıdığı niteliklere göre işçilere dengeli dağıtılması ve bu yükün insanın kaldırabileceği sınırlar içinde kalması sağlanmalıdır.

3.4.2 İşlerin risk düzeylerinin dikkate alınması

İşyerlerinde iş elemanları yerine getirilirken çeşitli tehlike riskleri oluşabilmektedir. Tehlike riski taşıyan iş elemanlarının aynı işgörene atanması mevcut riski daha da artıracaktır. Bu nedenle risklerin işçilere dengeli bir şekilde dağıtılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Riski sayısal tekniklerle tanımlamak mümkün olduğu gibi niteliksel tekniklerle de (Yüksek, Orta, Küçük vb.) tanımlamak mümkündür.

3.4.3 Çalışanların fizyolojik özelliklerinden kaynaklanan kısıtların dikkate alınması

İşçilerin fiziksel kapasiteleri işin gereğine uymayabilir (Örn: uzun boylu bir işçinin daha iyi yapabileceği iş elemanına kısa boylu bir işçi atanmamalıdır).

Montaj hattında görev alacak işçilerden birinin ya da bir kaçının fiziksel engelleri bulunabilir. Bu durumda bu engeller göz önünde bulundurularak dengeleme yapılmalıdır.

İşçilerin tümü fizyolojik özelliklerine bağlı olarak iş elemanlarını aynı sürede gerçekleştiremeyebilir. Bu durumda standart süreyi temel alarak montaj hattının dengelenmesi o dengenin korunmasını engelleyecektir.

Bahsedilen ve benzeri nedenlerle montaj hattı dengelemede işçilerin fizyolojik özellikleri göz ardı edilmemelidir.

3.4.4 Uyumsuz işlerin aynı istasyona atanmaması

Montaj hatlarında yerine getirilecek iş elemanları arasında uyumsuzluk ilişkileri bulunabilmektedir. Örneğin iş elemanlarından bazıları kirli el işi iken bazıları temiz el işi olabilir. Bu iş elemanlarının aynı istasyonda gruplanması durumunda, işçi kirli el işini yerine getirdikten hemen sonra elini temizlemeli ve temiz el işini yapmalıdır. Bu durum işçinin hem iş yükünü artıracak hem de stresin ve strese bağlı pek çok sorunun ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu gibi iş elemanlarının aynı istasyonda gruplanması uygun olmayacaktır.

Uyumsuzluk ilişkisine sahip iş elemanlarına bir başka örnek olarak aynı istasyonda gruplandığında işçinin vücut konumunu iş süresince değiştirmesine izin vermeyecek, aynı kas gruplarının sürekli gergin kalmasına neden olabilecek iş elemanlarının aynı süreç içinde varlığı gösterilebilir. Bu tür iş elemanlarının aynı istasyona atanması, o istasyondaki tekrarlı iş elemanlarını yerine getiren işçinin kas ve iskelet sisteminde sorunlara yol açacaktır. İş ve işyeri düzenlemelerinde vücut konumunun en az yorucu ve en az enerji harcamayı gerektiren konumda olması, bundan daha önemlisi de, konum doğru belirlenmiş olsa bile, iş süresince vücut konumunun değiştirilebileceği, aynı kas gruplarının sürekli gergin kalmayacağı bir düzenleme oluşturulması önemlidir. (Babalık, 2007).

3.4.5 İşçilere atama yaparken işi daha az sıkıcı (ya da daha ilgi çekici) hale getiren işlerin birleştirilmesi

İmalatta mal ve malzemelerin bir bölümünün ya da tamamının, ustalık isteyen iş ve işlemlerden oluşan bir bütün olmaktan çıkarılarak, hızlı üretim teknolojisi yaklaşımı

ile basit iş ve işlemlere dönüştürüldüğü istasyon ya da bant üretimi şeklindeki sistemlere geçiş, işgörenlerin kişisel yeteneklerini dışlayarak tüm imalat insiyatiflerini ellerinden almaktadır. Pazar taleplerini karşılama ve imalat hızını artırma, eniyi verim ve kalite zorlamaları, hızlı imalat tekniklerini gündeme getirmiş, çoğu iş ve işlemler monoton ve çok tekrarlanan iş şekillerine dönüşmüştür (Erkan, 1997).

Hızlı üretim sistemleri iş yaşamına parça başı ya da üretim karşılığı ücret gibi yaklaşımları da getirmiştir. Daha fazla kazanç için aşırı yüklenerek çalışmak, beden yorgunluğu ve ruhsal bunalımlar gibi sorunları ortaya çıkarmıştır. Hızlı üretim teknikleri işçi sağlığı ve güvenliği açısından da sorunlar yaratmakta ve iş kazaları çoğalmaktadır.

Hızlı üretim sistemlerinin işgörenler üzerinde yarattığı olumsuzlukları enazlamak için iş ortamındaki tatminlerini iyileştirme gerekliliği doğmaktadır. İşgörenlerin sistem içinde yerine getirmekten daha çok zevk aldıkları, kendilerini mutlu hissettikleri iş elemanları mutlaka vardır. Bu tür iş elemanları işçilerin çalışma alanında gruplandığında işgören tatmini sağlanabilecektir. İşçilerin işlere yönelik tercihleri montaj hatlarının dengelenmesi sırasında dikkate alınırsa, onlar için yaptıkları işler daha ilgi çekici hale gelecektir ya da en azından daha az sıkıcı olacaktır.

Hem işgören hem de işveren tatmini aynı anda göz önünde bulundurmak istendiğinde, işçilerin işlere yönelik yetenekleri de model içine dahil edilebilir. İşçilerin sevdiği iş başka, yetenekli olduğu iş başka olabilir. Her ikisini de dikkate alarak toplamı eniyilenebilir.

3.4.6 Aynı iş alanına ya da işçiye çeşitli fiziksel aktivite gerektiren atamalardan sakınılması

U-tipi montaj hatlarında çoğunlukla karşılaşılan bir durum ürüne ait ilk ve son iş elemanının birinci istasyona bir başka deyişle aynı işçiye atanması durumudur. Eğer işçi ilk iş elemanı için hattı besleme ve nihai ürünün sistemden çıkarılması ilave görevlerini de yerine getiriyorsa, üzerindeki iş yükü için diğer işçilerle aynıdır denemez. Bu nedenle hattın ilk ve son iş elemanının aynı kişiye atanması durumunda ya ilave bir iş

elemanı atanması engellenmeli ya da hattı besleme ve boşaltma işleri de dengelemede dikkate alınan iş elemanları arasına eklenmelidir.

Montaj hattının besleme ve boşaltılma işleri dışında kalan iş elemanlarından da fiziksel aktivite açısından diğerlerine göre daha yorucu görevler var olabilir. Bu tür görevlerin de aynı işçiye atanması engellenmelidir.

3.4.7 Aynı istasyonda gruplanma gerekliliği

Bir ürünü meydana getiren iş elemanlarından bazıları yerine getirilirken dikkat, özel yetenek, tecrübe ya da eğitim gerekiyor olabilir. Bu tür iş elemanlarının kalifiye işçilerin görev alacağı istasyonlara atanması, iş elemanının kaliteli olarak yerine getirilişi açısından önemlidir. Bu iş elemanları kalifiye olmayan vasıfsız bir işçiye atandığında hem ürün açısından hem de vasıfsız işçi açısından sorun yaratacaktır. Bu iş elemanları vasıflı işçilere atanmalıdır.

Bir başka yaklaşım, ortak gereç kullanılan iş elemanlarının aynı istasyona atanması gerekliliğidir. Bu atama hattaki alet ihtiyacını azaltacaktır. Bir işçiye atanan iş elemanlarının farklı gereçlerle yapılıyor olması, işçinin hem iş yükünü artıracak hem de zihinsel olarak diğer çalışanlara göre daha çok yorulmasına neden olacaktır. Başka bir örnek olarak, bazı iş elemanlarının özel aydınlatmaya ihtiyaç duyması verilebilir. Bu durumda bu tür iş elemanları farklı istasyonlara atandığında özel aydınlatma düzeneği kurulması gereken istasyon sayısı, hem de gereksiz aydınlatmaya maruz kalan işçi sayısı artacaktır.

Ortak parça kullanılan iş elemanlarının da aynı istasyona atanması gerekir. Böylece hattaki parça stoku sayısı azalacaktır. Parça stoğu sayısının azalması işçilerin de zihinsel yükünü azaltacaktır.

Aynı istasyona benzer beceri gerektiren iş elemanlarının atanması da hatta ihtiyaç duyulacak becerili işçi sayısını azaltacaktır.

Bahsi geçen kısıtlar montaj hattı dengelenmesinde dikkate alındığında hem sistem açısından hem de işçi açısından daha dengeli ve daha sürdürülebilir bir

dengeleme elde edileceği açıktır. İzleyen bölümlerde bu kısıtlardan bazılarının dikkate alındığı yaklaşımlar tanıtılmaktadır.

3.5 Ergonomik Faktörlere Yönelik Kısıtlar

Montaj hatlarının dengelenmesi sürecinde göz önünde bulundurulabilecek faktörler için yapılan araştırma sonucunda, modellere eklenerek ergonomik iyileşme sağlayacağı düşünülen kısıtlar Bölüm 3.4'de tanıtılmaktadır. İşçi üzerindeki yükü dengeli dağıtmak için bu kısıtlardan seçilen ikisi modellere eklenerek bunların etkileri sınanmıştır. Seçilen kısıtlar izleyen alt başlıklarda ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır.

3.5.1 Enerji gereksinim düzeyi

İş elemanları için ihtiyaç duyulacak enerji gereksinimleri işin yapısına göre birbirinden farklılık gösterebilir. Bu durumda süre olarak kısa fakat enerji gereksinimi açısından zor iş elemanlarını aynı istasyonda grupladığımızda işçiye kaldıracabileceğinden fazla yük atanabilir. Bu da zaman içinde işçinin yorulmasına, dikkatinin dağılmasına hatta iş kazalarına sebep olabilir. Bu nedenle iş elemanlarının yapısına göre ihtiyaç duyacakları enerji miktarları göz önünde bulundurularak atama yapılmalıdır. Temel amaç, işçilerin işleri yapmak için harcayacakları enerji miktarlarını istasyonlara dengeli bir şekilde dağıtarak, belirli bir üst limiti aşmasını engellemektir

3.5.2 Uyumsuz iş elemanı çiftleri

Montaj hatlarında yerine getirilecek iş elemanları arasında uyumsuzluk ilişkileri bulunabilmektedir. Örneğin iş elemanlarından bazıları kirli el işi iken bazıları temiz el işi olabilir (Corominas vd., 2008). Bu iş elemanlarının aynı istasyonda gruplanması durumunda, işçi kirli el işini yerine getirdikten hemen sonra elini temizlemeli ve temiz el işini yapmalıdır. Bu durum işçinin hem iş yükünü artıracak hem de stresin ve strese bağlı pek çok sorunun ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu tür iş elemanlarının aynı istasyona atanması uygun olmayacaktır. Uyumsuzluk ilişkisine sahip iş elemanlarına bir başka örnek verilecek olursa; aynı istasyonda gruplandığında işçinin vücut konumunu iş

süresince değiştirmesine izin vermeyecek, aynı kas gruplarının sürekli gergin kalmasına neden olabilecek iş elemanları aynı süreç içinde var olabilir. İş ve işyeri düzenlemelerinde vücut konumunun en az yorucu, en az enerji harcamayı gerektiren konum olması, bundan daha önemlisi de, konum ne kadar doğru belirlenmiş olsa da, iş süresinde vücut konumunun değiştirilebileceği, aynı kas guruplarının sürekli gergin kalmayacağı bir düzenleme oluşturulmalıdır (Babalık, 2007). Bu tür iş elemanlarının aynı istasyona atanmasının, o istasyondaki tekrarlı işleri yerine getiren işçinin kas ve iskelet sisteminde sorunlara yol açması kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle işçi açısından ergonomik olarak uyumsuzluk ilişkisi bulunan, fazladan yük getiren iş elemanlarının aynı istasyonda gruplanması doğru olmayacaktır. Geliştirilen modellerde bu gruplamayı önleyecek kısıt mevcuttur.

BÖLÜM 4

VASIFLI VE VASIFSIZ İŞÇİLERİN BİRLİKTE ÇALIŞMASI DURUMUNDA SÜRDÜRÜLEBİLİR U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ

İşletmeler üretimlerinde artış ya da azalma olduğu dönemlerde hattı yeniden dengeleme gerekliliği duymakta, hattın üretimini artırmak için geçici işçi alma yoluna gitmektedirler. Ancak alınan geçici işçiler vasıfsız olduğundan hattı dengelerken bu durum göz önünde bulundurulmamaktadır. Corominas vd. (2008), İspanyada motosiklet montajı yapan bir işletmede yaptıkları çalışmada, vasıflı ve vasıfsız işçi ayrımını dikkate alarak düz hat dengelemesi için bir model geliştirmişlerdir. Bu bölümde tanıtılacak model için bahsi geçen çalışma ve Urban'ın (1998) tam sayılı programlama modeli temel alınmaktadır. Modelde, Bölüm 2.3'de tanıtılan Gökçen ve Ağpak'ın (2003) değişken sayısını azaltmak için formüle ettiği iş elemanlarının atanmasına yönelik alt sınır yani atanabilecekleri ilk istasyonlar da kullanılmaktadır.

Geliştirilen yaklaşımda, geçici işçilerin iş elemanlarını yapmak için “standart”tan (sürekli işçi tarafından ihtiyaç duyulan süre) daha çok süreye gereksinim duyacakları dikkate alınmaktadır. Sonuçta, iş elemanı süresi işi yapan işçi tipine bağlı olmaktadır. Daha belirgin anlatılırsa, bir iş elemanı vasıfsız bir geçici işçiye atanmışsa standart süre 1'den büyük bir çarpanla çarpılmaktadır. İşletmede bu çarpan 2 ise aynı iş elemanını yapmak için geçici işçi sürekli işçinin 2 katı daha fazla süreye gereksinim duyar. Geçici işçilerin yapabildiği tüm iş elemanları için kullanılacak çarpanlar, birbirlerine yaklaşık olarak eşittir. Burada ek olarak, geçici işçiye atanan bir istasyonun yanında sürekli (ve vasıflı) bir işçiye atanmış en azından bir istasyon olması kısıtı da eklenmiştir. Bunun sebebi her bir vasıfsız (geçici) işçinin yanında çalışacak, gerekli olursa yardım edebilecek en azından bir tane vasıflı işçi ihtiyacı olmasıdır. Bu durumda hem vasıflı işçiler çok boş kalmayacak, hem de vasıfsız işçilerin üzerindeki stres azaltılmış olacaktır.

Çalışmada amaç, alınan geçici işçi sayısını enküçükmektir. Bu amaç geçici işçi maliyetini de enazlamış olacaktır.

Geliştirilen modelde vasıflı- vasıfsız işçi ayrımı ile ele alınan iş elemanı süreleri kısıtının yanında, işçilerin iş elemanlarını yaparken yaşadıkları zorlanmayı azaltmak için Bölüm 3.5’de tanıtılmış olan ergonomik kısıtlar da göz önünde bulundurulmaktadır.

4.1 Model

İnsan performansı, fiziksel ve zihinsel iş yükünün her ikisinden de yoğun şekilde etkilenebilir. Ağır iş yükü insanda genellikle yorgunluk ve strese yol açabilir ve korkunç sonuçlara neden olabilir. Kritik iş elemanlarını yerine getirirken yetersizlik, güçsüzlük ortaya çıkabilir. Hafif iş yükü dikkat eksikliği ve bıkkınlık nedeniyle hatalar ortaya çıkarabilir (Huey and Wickens, 1993).

Şüphesiz insan davranışı ile ilgili sayısız faktör bulunmaktadır. U-tipi montaj hatlarını dengelerken tüm işçilerin tüm işleri aynı şekilde yaptığı varsayılmaktadır. Yani işçiler çoklu beceriye sahiptir. Ancak gerçek hayat problemlerinde bu mümkün olamayabilir.

Bu tür durumların dengeleme sırasında göz önünde bulundurulması hatta uzun dönemde ortaya çıkacak sorunları yok edecektir. Belirli bir çevrim süresi üzerinden yapılan uzun dönemli planlar işçilerin iş elemanlarını standart sürede tamamlayamayacağından gerçekleştirilemeyecektir. Aynı zamanda işçilere dayatılan çevrim süresi içinde iş elemanlarını tamamlama zorunluluğu, onları strese ve aşırı yorulmaya maruz bırakacaktır. Bu da zaman içinde işe karşı bıkkınlık, isteksizlik, aşırı yorgunluk sonucu dikkat dağılması ve ardından iş kazaları ve kalite sorunlarına yol açacaktır. Vasıflı işçilerle eşdeğer tutulan vasıfsız işçiler onlarla aynı sürede aynı yükte iş elemanlarını yerine getirmeye çalışırken kendilerini bir süre sonra beceriksiz ve değersiz hissetmeye başlayacaklardır. Tüm bunları engellemek için geliştirilmiş olan vasıflı vasıfsız işçi ayrımını dikkate alan U-tipi montaj hattı dengeleme modeli aşağıda tanıtılmaktadır.

U-MHD problemi için geliştirilen modelde kullanılan notasyon izleyen şekildedir;

i : iş elemanları indisi,

j : istasyonlar indisi,

W : kadrolu işçi sayısı (sürekli ve vasıflı)

t_i : sürekli bir işçi tarafından yapıldığında i iş elemanının süresi ($i = 1, \dots, n$)

n : toplam iş elemanı sayısı,

m_{enb} : enbüyük iş istasyonu sayısı,

m_{enk} : teorik olarak ihtiyaç duyulan enküçük istasyon sayısı,

C : çevrim süresi,

β : geçici bir işçi tarafından yapıldığında i iş elemanının süresini belirlemek için t_i ile çarpılan katsayı (>1)

e_i : i iş elemanı için saniyede ihtiyaç duyulan enerji miktarı,

E : her bir istasyona atanabilecek toplam enerji düzeyi için bir sınır değer

$P = \{1, \dots, p, \dots, |P|\}$: Öncelik ilişkilerini yansıtan düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi

($p = (r, s)$, r iş elemanı s iş elemanından hemen önce gelmektedir).

U : uyumsuz işlerden oluşan ikili iş elemanları kümesi,

OE_i : orijinal diyagrama göre i işinin ilk yapılabileceği istasyon,

FE_i : gölge diyagrama göre i işinin ilk yapılabileceği istasyon,

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{asıl diyagramdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{gölge diyagramdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$z_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyondan yararlanılması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$v_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyonun geçici bir işçiye atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

Model varsayımları listelenecek olursa:

1. Kadrolu işçiler iş elemanlarını standart sürede tamamlamaktadırlar.
2. Geçici işçiler vasıfsızdır ve standarttan daha uzun sürede iş elemanlarını tamamlamaktadırlar.
3. Geçici (vasıfsız) işçiler için kullanılacak çarpanlar, birbirlerine yaklaşık olarak eşittir.
4. İş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
5. Paralel iş istasyonlarına izin verilmemektedir.
6. İşçilerin yürüme zamanları göz ardı edilmektedir.

Model:

$$Enk \ Z = \sum_{j=1}^{m_{enk}} v_j \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in OE_i} (x_{ij}) + \sum_{j \in FE_i} (y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C - \frac{\beta - 1}{\beta} C \cdot v_j \quad j = 1, \dots, [m_{enk}] \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \cdot z_j - \frac{\beta - 1}{\beta} C \cdot v_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enk} \quad (3b)$$

$$\sum_{j \in OE_r} (m_{enk} - j + 1) (x_{rj}) - \sum_{j \in OE_s} (m_{enk} - j + 1) (x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4a)$$

$$\sum_{j \in FE_s} (m_{enk} - j + 1) (y_{sj}) - \sum_{j \in FE_r} (m_{enk} - j + 1) (y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4b)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E - \frac{\beta - 1}{\beta} E \cdot v_j \quad j = 1, \dots, [m_{enk}] \quad (5a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E \cdot z_j - \frac{\beta - 1}{\beta} E \cdot v_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb} \quad (5b)$$

$$(x_{kj} + y_{kj}) + (x_{lj} + y_{lj}) \leq 1 \quad \forall (k, l) \in U \quad (6)$$

$$v_j + (1 - z_j) \leq 1 \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb} \quad (7)$$

$$z_{j+1} \leq z_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb} - 1 \quad (8)$$

$$v_1 + v_2 \leq 1 \quad (9a)$$

$$v_j + v_{j+1} + v_{j+2} \leq 2 \quad j = 2, \dots, m_{enb} - 3 \quad (9b)$$

$$v_{m_{enb}-1} + v_{m_{enb}} \leq 1 \quad (9c)$$

$$W + \sum_{j=1}^{m_{enb}} v_j + \sum_{[m_{enk}]+1}^{m_{enb}} (1 - z_j) = m_{enb} \quad (10)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j, v_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (11)$$

Modelde amaç fonksiyonu geçici işçi sayısını enküçükler; (2) numaralı kısıt her bir iş elemanının tek bir istasyona atanmasını sağlar; (3a) ve (3b) her istasyondaki toplam iş elemanı süresinin C çevrim süresi üst sınırından (eğer istasyona vasıflı işçi atanmışsa) ya da $\frac{1}{\beta} \cdot C$ 'den (istasyona vasıfsız bir işçi atanmışsa) büyük olamayacağını ifade eder; (4a) ve (4b) iş elemanları arasındaki öncelik koşullarını sağlar; (5a) ve (5b) istasyonlara atanan iş elemanlarının ihtiyaç duyacağı enerji düzeyleri toplamının işçinin sürekli performans sınırında kalmasını garantiler; (6) ikili iş elemanları arasındaki uyumsuzluk koşullarını sağlar; (7) geçici bir işçinin boş bir istasyona atanmasına izin vermez; (8) bir istasyon boşsa, izleyen istasyonun da boş olmasını sağlar, böylece boş olmayan istasyonlar birbirini takip eder ve kullanılan istasyonların birbirini izler şekilde sıralanmasını garanti eder; (9a), (9b) ve (9c) her bir vasıfsız işçinin en azından bir

vasıflı işçinin yanında konumlandırılmasını sağlar; (10) vasıflı işçi, vasıfsız işçi ve boş istasyon sayısı toplamının modeldeki potansiyel istasyon sayısına eşit olmasını sağlar ve (11) değişkenlerin 0-1 tamsayı niteliğini ifade eder.

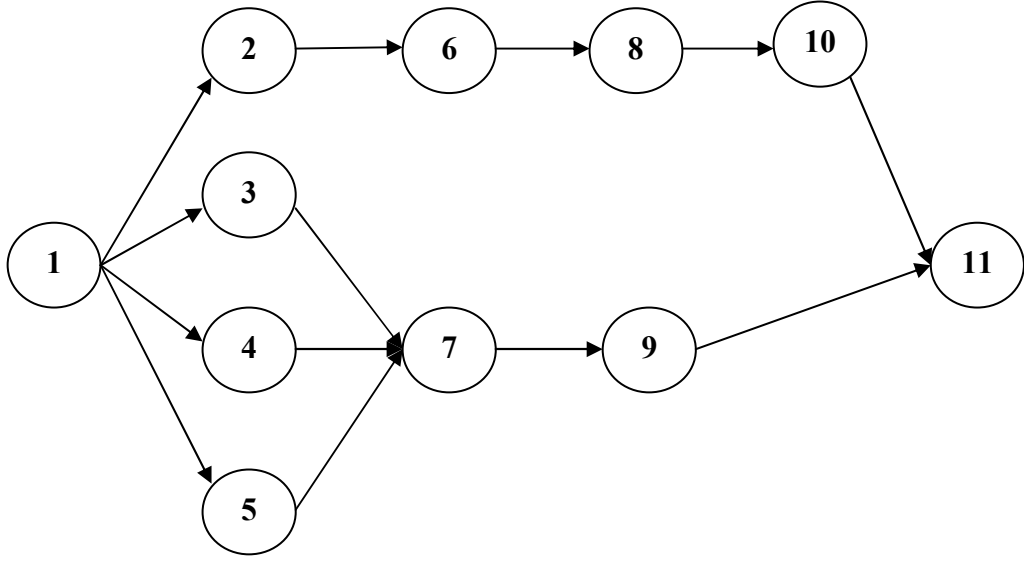
4.2 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Önerilen modeller küçük boyutlu problemlerin testi için klasik test problemlerinden olan 11 iş elemanlı Jackson'ın (1956), orta büyüklükteki problemlerin testi için 29 iş elemanlı Buxey'in (1974) ve büyük boyutlu problemlerin testi için Hahn'ın test problemleri (<http://www.assembly-line-balancing.de/>) üzerinde test edilmiştir. Jackson test problemine ait veriler ve öncelik diyagramı Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de görülmektedir. Buxey ve Hahn'ın test problemi verileri sırasıyla Ek-1 ve Ek-2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Jackson'ın test problemine ait veri seti

İş elemanı j	Ardıl (j)	İş elemanı Süresi t(i)
1	{2,3,4,5}	6
2	{6}	2
3	{7}	5
4	{7}	7
5	{7}	1
6	{8}	2
7	{9}	3
8	{10}	6
9	{11}	5
10	{11}	5
11	{}	4

Çizelge 4.2'de ele alınan test problemlerinin, farklı çevrim süreleri için U-MHD ile elde edilmiş literatürdeki eniyi istasyon sayıları görülmektedir (<http://www.assembly-line-balancing.de/>). İlgili çevrim süreleri için önerilen model üzerinde testler yapılmış ve değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1 Jackson test problemine ait öncelik diyagramı

Çizelge 4.2 Test problemlerinin farklı çevrim süreleri için U-MHD ile elde edilmiş literatürdeki eniyi istasyon sayıları

Problem	Çevrim süresi	U-MHD'ye göre eniyi istasyon sayısı
Jackson	7	7
Jackson	9	6
Jackson	10	5
Jackson	13	4
Jackson	14	4
Jackson	21	3
Buxey	27	13
Buxey	30	11
Buxey	33	10
Buxey	36	9
Buxey	41	8
Buxey	47	7
Buxey	54	6
Hahn	2004	8
Hahn	2338	7
Hahn	2806	5
Hahn	3507	5
Hahn	4676	3

Testler enerji gereksinim düzeyine yönelik kısıt kümesi (5a ve 5b kısıtları) ve uyumsuz iş elemanı çiftlerine yönelik kısıtın (6 numaralı kısıt) modelde yer almaması durumunu da içermektedir. Böylece ergonomik kısıtlar dikkate alınmadığında işçilere nasıl dengesiz bir iş yükü atandığı görülebilmektedir.

Geliştirilen veri türetme sistematiği ile modelin ihtiyaç duyduğu parametre değerleri test problemleri için izleyen şekilde bulunmuş ve model testlerinde kullanılmıştır.

Uyumsuz iş elemanı çiftleri, birbirinden bağımsız olarak düzgün dağılım yaklaşımıyla kullanıcının atayabildiği bir orana bağlı olarak türetilmektedir. Test problemindeki her bir iş elemanı için türetilmiş rassal sayılar bu orandan küçükse, ilgili iş elemanına 1 ile n (iş elemanı sayısı) arasında düzgün dağılmış bir tamsayı türetilmesi yoluyla ikili iş elemanları belirlenmektedir.

Testler için üç farklı grup veri türetilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Test problemleri için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftlerine yönelik veri setleri Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5’de yer almaktadır.

Çizelge 4.3 Jackson test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri

Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
(6,10)	(2,6)	(2,3)
	(6,8)	(5,6)
		(6,8)
		(9,11)

Çizelge 4.4 Buxey test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri

Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
(4,23)	(1,16)	(5,19)
(7,29)	(4,16)	(16,20)
(14,15)	(2,14)	(6,27)
(6,16)	(14,17)	
	(20,21)	

Çizelge 4.5 Hahn test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri

Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
(12,21)	(4,26)	(4,11)
(13,47)	(6,49)	(5,33)
(15,31)	(10,17)	(7,42)
(10,21)	(20,36)	(10,35)
(12,23)	(35,36)	(11,22)
(31,34)	(1,36)	(17,28)
(46,47)	(40,45)	(23,38)
	(36,44)	(30,40)
		(30,47)
		(32,48)
		(19,49)

Jackson test problemi için türetilmiş uyumsuz iş elemanı çiftleri izleyen şekilde açıklanabilir; birinci veri setinde yalnızca 6 ve 10. iş elemanlarının aynı istasyona atanmaması gerekmektedir. Bu iş elemanları aynı istasyona bir başka deyişle aynı kişiye atandığında işçinin ergonomik açıdan zorlanması artmaktadır. İkinci veri seti Jackson problemi için iki uyumsuz iş elemanı çiftine sahiptir (2 ile 6, 6 ile 8). Üçüncü veri setinde ise dört tane uyumsuz iş elemanı çifti bulunmaktadır (2 ile 3, 5 ile 6, 6 ile 8, 9 ile 11). İşçilere iş yükü açısından daha dengeli bir atama yapmak ve zorlanmayı azaltmak için bu iş elemanı çiftlerinin aynı istasyonda gruplanmaması gerekmektedir. Modelde yer alan (6) numaralı kısıt uyumsuz iş elemanı çiftlerinin aynı istasyonda gruplanmasını önlemektedir.

Ergonomik açıdan daha dengeli bir atama yapılmasını sağlayacak enerji gereksinim düzeyi kısıt kümesine yönelik veri sistematiği için gerekli olan enerji gereksinimi verileri Babalık'ın (2007), iş faaliyetleri için harcanan enerji miktarları aralıklarından hareketle türetilmektedir.

U-tipi montaj hatları için enerji gereksinimine ilişkin olarak geliştirilen kısıtlar izleyen şekildedir;

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E \quad j = 1, \dots, [m_{enk}] \quad (5a')$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E Z_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb} \quad (5b')$$

Yukarıdaki modelde (5a) ve (5b) olarak belirtilen kısıtları tanımlamaktadır. Enerji gereksinim düzeyine yönelik kısıtlar süreye bağlı olduğundan geliştirilen modellerde, işçilerin iş elemanlarını yapma süresine bağlı olarak düzenlenmektedir.

e_i parametresi için literatürdeki test problemlerine yönelik veri bulunmadığından çalışmada Babalık'ın (2007) Çizelge 4.6'da görülen 8 saatlik vardiyada "erkek ve kadın işçilerde iş ağırlığına göre harcanan enerji" miktarı verilerinden yararlanılarak veriler elde edilmektedir. Başlangıçta her bir iş elemanının ağırlığı 5'li skaladan (Çok hafif iş, Hafif iş, Orta ağır iş, Ağır iş, Çok ağır iş) rassal olarak elde edilir. Ardından ilgili ağırlık düzeyi için geçerli sayısal aralıktan (kJ birimiyle harcanan enerji) düzgün dağılıma uygun olarak enerji düzeyi türetilip, bu düzeyin 1 sn için karşı gelen değeri kullanılır.

Çizelge 4.6 Erkek ve kadın işçilerde iş ağırlığına göre harcanan enerji

İşin Ağırlığı	Erkek İşçiler(kJ)	Kadın İşçiler(kJ)
Çok hafif iş	<2100	<1600
Hafif iş	2100-4200	1600-3200
Orta ağır iş	4200-6300	3200-4800
Ağır iş	6300-8400	4800-6400
Çok ağır iş	8400-10500	6400-8000

Her bir istasyona atanabilecek toplam enerji düzeyi için üst sınırı temsil eden E parametresi için, sürekli performans sınırını geçmeyecek bir değer kullanılması gerekmektedir. Sürekli performans sınırı iş hekimliğine göre şu şekilde tanımlanır:

Sürekli performans sınırı, enerji sunumu ve gereksiniminin dengede kaldığı, çok fazla yorulmadan ve özel molalara gereksinim göstermeden 8 saatlik bir vardiya boyunca yapılabilen en büyük işi ifade eder. Sekiz saatlik vardiya süresince beklenilebilir, umulabilir sürekli performans sınırı olarak erkeklerde ~8600 kJ enerji, kadınlarda ~5800 kJ enerji değerleri literatürde kabul görmüş enbüyük değerlerdir (Babalık, 2007). E parametresi belirlenirken kabul görmüş bu değerler ve çevrim süreleri dikkate alınmaktadır.

Jackson problemine yönelik enerji gereksinim düzeyi kısıtı için iş elemanlarının ağırlık düzeylerine göre türetilmiş enerji gereksinim miktarları kJ/sn birimi cinsinden (üç veri seti için) Çizelge 4.7' de görülmektedir. Buxey ve Hahn test problemleri için türetilmiş veri setleri ise Ek-3 ve Ek-4'de verilmektedir.

Çizelge 4.7 Jackson test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kJ/sn) değerleri

<u>İş Elemanı No</u>	<u>Birinci Veri Seti</u>	<u>İkinci Veri Seti</u>	<u>Üçüncü Veri Seti</u>
1	0.181	0.256	0.017
2	0.123	0.339	0.238
3	0.099	0.363	0.147
4	0.143	0.097	0.133
5	0.009	0.196	0.185
6	0.090	0.129	0.088
7	0.147	0.259	0.334
8	0.101	0.050	0.079
9	0.325	0.204	0.183
10	0.137	0.129	0.291
11	0.158	0.135	0.312

Yapılan testlerde vasıfsız işçilerin iş elemanı süresi çarpanı $\beta=1.5$ olarak kabul edilmiştir. Kadrolu çalışan vasıflı işçi sayıları $(m_{enb} - 2)$ şeklinde modellere yansıtılmıştır.

Modellerin çözümü için GAMS 21.6 (General Algebraic Modeling System) matematiksel paket programındaki CPLEX çözücüsünden faydalanılmıştır.

Model sonuçları, ergonomik kısıtlar eklenmeden ve eklendikten sonraki sonuçlara göre değerlendirilmektedir. Bu şekilde ergonomik kısıtların önemi vurgulanmaya çalışılmaktadır. Jackson, Buxey ve Hahn test problemlerinde vasıflı vasıfsız işçi modeline göre gerçekleşen istasyon sayısı değişimleri Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10'da görülmektedir.

İstasyon sayılarının verildiği çizelgelerde görüldüğü üzere, ikinci veri seti için gevşetilmiş çözümlerin bulunduğu testler hariç, diğerlerinde ergonomik kısıtların eklenmesi sonucunda istasyon sayısında en fazla bir artış olmuştur. Sürekliliğini koruyabilecek bir denge istediğimizden bu artış bizim için önemli değildir. İşçilere istasyon sayısını enküçüklemeye çalışırken taşıyabileceklerinden daha fazla yük atandığında montaj hattının dengesinde, bir süre sonra planlanan üretim hızını gerçekleştiremeyecek şekilde bozulma olacaktır. Bu bozulma önerilen modelle engellenebilecektir.

Çizelge 4.8 Jackson test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları

C	U-MHD'ye Göre Eniyi İst. Sayısı	Ergonomik Kısıtlar Öncesi		Ergonomik Kısıtlar Sonrası					
		İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	Birinci Veri Seti İçin		İkinci Veri Seti İçin		Üçüncü Veri Seti İçin	
				İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı
7	7	7+1	2	7+1	2	7+1	2	7+1	2
9	6	6	1	6	1	6	1	6	1
10	5	5	1	5+1	2	5+2*	3*	5+1	2
13	4	4	1	4+1	2	4+2*	3*	4+1	2
14	4	4	1	4+1	2	4+2*	3*	4+1	2
21	3	3	1	3+1	2	3+2*	3*	3+1	2

* Ergonomik kısıtlar modele eklendikten sonra, ikinci veri setinde çevrim süreleri 10, 13, 14 ve 21 için tamsayı uygun bir çözüm bulunamamıştır. Elde edilen değerler m_{enb} değerinin bir üst değere artırılması (gevşetilmesi) sonucu elde edilmiş

değerlerdir. Yeni enbüyük istasyon sayısı m_{enb}' olarak gösterilirse, kadrolu çalışan işçi sayıları, diğer testlerle aynı olabilmesi için ($m_{enb}' - 3$) olarak alınmıştır.

Çizelge 4.9 Buxey test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları

C	U-MHD'ye Göre Eniyi İst. Sayısı	Ergonomik Kısıtlar Öncesi		Ergonomik Kısıtlar Sonrası					
		İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	Birinci Veri Seti İçin		İkinci Veri Seti İçin		Üçüncü Veri Seti İçin	
				İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı
27	13	13	1	13+1**	2**	13	1	13	1
30	11	11+1	2	11+1	2	11+1	2	11+1	2
33	10	10+1	2	10+1	2	10+1	2	10+1	2
36	9	9+1	2	9+1	2	9+1	2	9+1	2
41	8	8+1	2	8+1	2	8+1	2	8+1	2
47	7	7+1	2	7+1	2	7+1	2	7+1	2
54	6	6+1	2	6+1	2	6+1	2	6+1	2

** Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılamamışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Birinci veri seti ve $C=27$ için elde edilen sayılar haricinde tümünde ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası istasyon sayıları ve geçici işçi sayıları aynı olmaktadır. Ergonomik kısıtlar sonuçları kötüleştirmemektedir. Böylece aynı istasyon sayısı ile işçiler için daha ergonomik atamalar gerçekleşmektedir.

Hahn test problemine göre elde edilen sonuçlarda da ergonomik kısıtlar istasyon sayılarını kötüleştirmemektedir. İstasyon sayısındaki kötüleşme geliştirilen modelle en çok bir artışla karşımıza çıkmaktadır. Bu durum daha sürdürülebilir bir denge için kabul edilebilir olmalıdır. Çünkü planlanan üretim hızı sağlanamazsa kayıplar hem firma açısından hem de işçi açısından daha fazla olacaktır.

Çizelge 4.10 Hahn test probleminin ergonomik kısıtlar öncesi-sonrası istasyon ve geçici işçi sayıları

C	U-MHD'ye Göre Eniyi İst. Sayısı	Ergonomik Kısıtlar Öncesi		Ergonomik Kısıtlar Sonrası					
		İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	Birinci Veri Seti İçin		İkinci Veri Seti İçin		Üçüncü Veri Seti İçin	
				İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı	İst. Sayısı	Geçici İşçi Sayısı
2004	8	8	1	8	1	8	1	8	1
2338	7	7	1	7	1	7	1	7	1
2806	5	5+1	2	5+1	2	5+1	2	5+1	2
3507	5	5	1	5	1	5	1	5	1
4676	3	3+1	2	3+1	2	3+1	2	3+1	2

Hahn test problemine göre elde edilen sonuçlarda da ergonomik kısıtlar istasyon sayılarını kötüleştirmemektedir. İstasyon sayısındaki kötüleşme geliştirilen modelle en çok bir artışla karşımıza çıkmaktadır. Bu durum daha sürdürülebilir bir denge için kabul edilebilir olmalıdır. Çünkü planlanan üretim hızı sağlanamazsa kayıplar hem firma açısından hem de işçi açısından daha fazla olacaktır.

Ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden elde edilen atamalarda, uyumsuz iş elemanı çiftlerinin aynı istasyona atanma durumları incelenmiş ve Çizelge 4.11'de özetlenmiştir.

Uyumsuz iş elemanı çiftlerinin aynı istasyonlarda gruplanması işçi açısından istenmeyen bir durumdur. Bu tür iş elemanlarının aynı istasyonda gruplanması işçinin iş yükünü artıracak, fiziksel ve zihinsel zorlanmaya maruz kalmasına neden olacaktır. Geliştirilen ergonomik kısıtlı model, vasıflı ve vasıfsız işçiler için bu durumu engellemektedir.

Çizelge 4.11 incelendiğinde test problemleri için türetilmiş ve Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5'de verilmiş uyumsuz iş elemanı çiftlerinin, ihlal oranları görülebilmektedir. Örneğin, Hahn test probleminde modele ergonomik kısıtlar dahil edilmeden önce,

C=4676 için yapılan testlerde, üçüncü veri seti için türetilmiş 11 uyumsuz iş elemanı çiftinden, 3 uyumsuz iş elemanı çiftinin aynı istasyonlarda gruplandığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.11 Ergonomik kısıtlar öncesi ihlal edilen uyumsuz iş elemanı çiftleri

Problem	C	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
Jackson	7	1/1	0/2	1/4
	9	0/1	1/2	1/4
	10	0/1	1/2	2/4
	13	1/1	1/2	2/4
	14	0/1	0/2	2/4
	21	0/1	0/2	1/4
Buxey	27	0/4	0/5	0/3
	30	3/4	0/5	0/3
	33	0/4	0/5	0/3
	36	0/4	1/5	0/3
	41	2/4	1/5	1/3
	47	1/4	0/5	0/3
	54	2/4	0/5	0/3
Hahn	2004	1/7	1/8	2/11
	2338	2/7	1/8	2/11
	2806	1/7	0/8	0/11
	3507	1/7	2/8	3/11
	4676	3/7	3/8	3/11

Ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden önce bir başka incelenen durum da, enerji gereksinim düzeylerinin üç veri seti için nasıl atandığıdır. Ergonomik kısıtsız elde edilen atamalarda, enerji gereksinim düzeylerinin istasyonlara dağılımı Jackson test problemi için Çizelge 4.12’de görülmektedir.

Buxey ve Hahn test problemleri için ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden önce elde edilen enerji gereksinim düzeyleri Ek-5 ve Ek-6’da verilmektedir.

Çizelge 4.12 Jackson test probleminde ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim düzeyleri (vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)

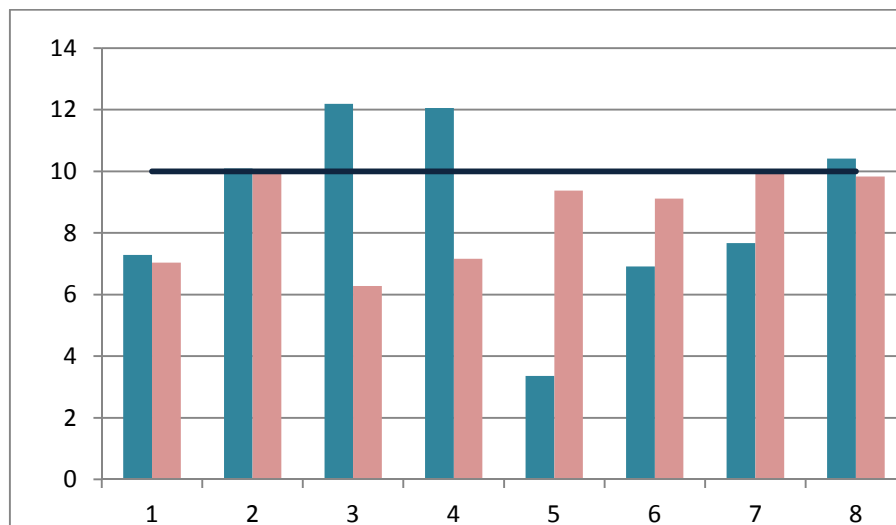
C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
7	2	1	0.948	0.810	1.872
		2	1.625	1.020	0.915
		3	0.675	1.460	1.781
		4	1.086	1.536	0.102
		5	1.001	0.679	0.931
		6	0.741	2.493	1.211
		7	0.865	0.903	1.631
		8	0.606	0.300	0.474
9	2	1	1.317	1.185	2.703
		2	2.066	1.797	1.917
		3	1.001	0.679	0.931
		4	1.095	1.732	0.287
		5	0.909	0.450	0.711
		6	0.921	2.751	1.387
10	2	1	1.718	2.076	1.350
		2	2.31	1.665	2.370
		3	0.909	0.450	0.711
		4	1.442	1.456	1.933
		5	1.356	2.989	1.870
13	2	1	1.998	3.321	0.867
		2	1.496	2.494	1.666
		3	2.707	2.533	3.350
		4	1.471	1.203	2.105
14	2	1	2.087	2.215	1.033
		2	2.942	2.205	3.618
		3	1.542	2.892	2.211
		4	0.653	1.698	1.256
21	2.5	1	2.942	2.205	3.618
		2	2.637	4.624	2.498
		3	2.141	2.423	2.375

Çizelgeye bakıldığında özellikle 13, 14 ve 21 çevrim sürelerinde her üç veri seti için istasyonlarda üst sınırın fazlaca aşıldığı görülebilmektedir. Çizelge 4.8'deki istasyon sayıları incelendiğinde bu çevrim süreleri için ergonomik kısıtlar sonrası elde edilen istasyon sayıları birer artmaktadır. Böylece bu montaj hattına atanan işçiler daha dengeli ve aşırı zorlanmaya maruz kalmadan görevlerini yerine getirebilmektedirler.

İnsan faktörü ve elde edilen dengenin sürdürülebilirliği dikkate alındığında istasyon sayısının bir artması olumsuz karşılanmamaktadır.

Buxey ve Hahn test problemlerinden elde edilen enerji gereksinim düzeyleri de ergonomik kısıtların dikkate alınmadığı durumlarda işçilere dengesiz iş yükü atandığını göstermektedir. Bazı işçiler aşırı iş yüküne maruz kalırken bazıları daha az enerji gereksinimi ile işlerini yaparak daha az yorulmaktadırlar. Bu durumda yalnızca iş elemanı süreleri dikkate alınarak yapılan geleneksel hat dengeleme yöntemleri yetersiz kalmaktadır.

Ergonomik kısıtların dikkate alındığı ve alınmadığı durumu daha net ortaya koyabilmek için, Şekil 4.2’de görülen Buxey test problemi $C=47$ ve birinci veri kümesi için elde edilen enerji gereksinim düzeyleri grafiği karşılaştırma yapmaya ve insan unsuru için ergonomik faktörlerin önemini anlamaya imkan tanımaktadır. Burada birinci seri ergonomik kısıtların modele dahil edilmediği durumda istasyonlara atanan enerji gereksinim düzeylerini, ikinci seri de ergonomik kısıtlar modele ilave edildikten sonra elde edilen düzeyleri göstermektedir. Buxey test probleminin diğer çevrim süreleri ve veri setleri için ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim değerleri Ek-5’de yer almaktadır.



Şekil 4.2 Buxey test problemi $C=47$ ve birinci veri kümesi için istasyonlara atanmış enerji gereksinim düzeyleri grafiği

Grafikten görüldüğü gibi ergonomik kısıtlar modele dahil edilmediğinde insan unsuru için belirlenen sınırlar aşılmaktadır. Burada da sürekli performans sınırına göre belirlenmiş enerji gereksinim düzeyi üstü sınırı $E=10$ kJ/sn'nin 3, 4 ve 8. istasyonlarda aşıldığı görülmektedir (Ergonomik kısıtlar modele eklenmeden önce). Bu istasyonlarda görev alan işçiler sürekli performans sınırını aşan bir enerji gereksinim düzeyinde çalışacakları için, diğer işçilere göre daha çabuk yorulacaklar ve bu yorgunluk sonucu yerine getirdikleri görevlerde gecikmeler, hatalar meydana gelecektir. Bu durum hattın dengesinin bir süre sonra bozulmasına neden olacaktır. $C=47$ ve birinci test verileri için elde edilen atamalarda ergonomik kısıtlar sonrası istasyon sayısında artış olmadığı görülmektedir. Artış olsa da planlanan üretim hızının bozulmaması için kabul edilebilir bir durumdur. İstasyon sayısında bir artış yaratsa da ergonomik kısıtların göz önünde bulundurulması hattın daha kararlı bir dengede olmasını sağlayacaktır.

BÖLÜM 5

FARKLI PERFORMANS DEĞERLERİNE SAHİP İŞÇİLER İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ

Montaj hatlarında çalışan işçilerin iş yapış süreleri sadece vasıflı olup olmadıklarına göre değil taşıdıkları farklı niteliklere (tecrübe, beceri, yaş, cinsiyet vb.) göre de değişebilir. İşçilerin nitelikleri göz önünde bulundurulduğunda, iş elemanlarını standart sürede gerçekleştirebildikleri varsayımı gerçek sistemlerde geçerliliğini yitirmektedir. İşçi bağımlı iş elemanı süreleri hattın dengelenmesinde önem kazanmaktadır.

Bu bölümde işçi niteliklerini göz önünde bulunduran bir model tanıtılmaktadır. Geliştirilen modelde işçilerin performans değerleri modele dahil edilmiştir.

İzleyen alt başlıkta farklı performans değerine sahip işçilerin göz önünde bulundurulduğu model yaklaşımı tanıtılmaktadır. Model Bölüm 3.5’de tanıtılan ergonomik kısıtları da içermektedir.

Model, Bölüm 2.3’de tanıtılan Gökçen ve Ağpak’ın (2003) değişken sayısını azaltmak için formüle ettiği iş elemanlarının atanmasına yönelik alt sınırları yani atanabilecekleri ilk istasyonları da içermektedir.

Geliştirilen model testleri için; performans değeri, enerji düzeyi ve uyumsuz iş elemanları kısıtları tek tek ve birlikte modele dahil edilerek sonuçları karşılaştırılmış ve istasyon süresine etkileri incelenmiştir.

5.1 Model

Daha önce de vurgulandığı gibi, işçilerin farklı nitelikleri U-MHD problemlerinde dikkate alınmazsa elde edilen dengeyi korumak mümkün olmayacaktır. Bu nedenle yeni yaklaşımımızda, U-MHD problemine işçi niteliklerinin etkisi incelenmektedir. Çalışmada, işçilerin farklı özelliklerinden biri olan, işi yerine getirme süreleri dikkate alınmaktadır. Her işçinin farklı performans değerine sahip olacağı

varsayımıyla bir model önerisi yapılmaktadır. Model daha önce de vurgulandığı gibi ergonomik kısıtları da içermektedir.

U-MHD problemi için geliştirilen modelde kullanılan notasyon izleyen şekildedir;

i : iş elemanları indisi,

j : istasyonlar indisi,

k : işçiler indisi,

t_i : i iş elemanının standart süresi ($i = 1, \dots, n$)

n : toplam iş elemanı sayısı,

m_{enb} : enbüyük iş istasyonu sayısı,

m_{enk} : teorik olarak ihtiyaç duyulan enküçük iş istasyonu sayısı,

C : çevrim süresi,

OE_i : orijinal diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

FE_i : gölge diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

β_k : k işçisine ait performans değeri,

$P = \{1, \dots, p, \dots, |P|\}$: öncelik ilişkilerini yansıtan düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi

$(p = (r, s), r$ iş elemanı s iş elemanından hemen önce gelmektedir),

U : uyumsuz işlerden oluşan ikili iş elemanları kümesi,

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{asıl ağdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{hayali ağdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$z_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyondan yararlanılması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$v_{jk} = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyona } k. \text{ işçinin atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

Model varsayımları listelenecek olursa:

1. İşçiler farklı niteliklere sahiptirler ve birbirinden bağımsız farklı performans değerleriyle iş elemanlarını gerçekleştirmektedirler.
2. İş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
3. Paralel iş istasyonlarına izin verilmemektedir.
4. İşçilerin yürüme zamanları göz ardı edilmektedir.

Model:

$$Enk \ Z = \sum_{j=[m_{enk}]+1}^{m_{enb}} z_j \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in OE_i}^{m_{enb}} (x_{ij}) + \sum_{j \in FE_i}^{m_{enb}} (y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C - \frac{\beta_k - 1}{\beta_k} C \cdot v_{jk} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, [m_{enk}], \\ k = 1, \dots, m_{enb} \end{matrix} \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \cdot z_j - \frac{\beta_k - 1}{\beta_k} C \cdot v_{jk} \quad \begin{matrix} j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb}, \\ k = 1, \dots, m_{enb} \end{matrix} \quad (3b)$$

$$\sum_{j \in OE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{rj}) - \sum_{j \in OE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4a)$$

$$\sum_{j \in FE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{sj}) - \sum_{j \in FE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (4b)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E - \frac{\beta_k - 1}{\beta_k} E \cdot v_{jk} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, [m_{enk}], \\ k = 1, \dots, m_{enb} \end{array} \quad (5a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E \cdot z_j - \frac{\beta_k - 1}{\beta_k} E \cdot v_{jk} \quad \begin{array}{l} j = [m_{enk}] + 1, \dots, m_{enb}, \\ k = 1, \dots, m_{enb} \end{array} \quad (5b)$$

$$(x_{kj} + y_{kj}) + (x_{lj} + y_{lj}) \leq 1 \quad \forall (k, l) \in U \quad (6)$$

$$z_j - \sum_{k=1}^{m_{enb}} v_{jk} \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (7a)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{enb}} v_{jk} = 1 \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (7b)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{enb}} v_{jk} = 1 \quad k = 1, \dots, m_{enb} \quad (7c)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j, v_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k$$

Önerilen modelin amacı gerekli iş istasyonu sayısını enküçükmektir. (2) numaralı kısıt her bir iş elemanının tek bir istasyona atanmasını sağlar; (3a) ve (3b) kısıtlarıyla istasyon sürelerinin çevrim süresini aşması engellenirken, ilgili istasyona atanan işçinin performans değerinin göz önünde bulundurulması sağlanır; (4a) ve (4b) iş elemanları arasındaki öncelik koşullarını sağlar; (5a) ve (5b) istasyonlara atanan iş elemanlarının ihtiyaç duyacağı enerji düzeyleri toplamının işçinin sürekli performans sınırında kalmasını garantiler; (6) uyumsuz iş elemanı çiftlerinin aynı istasyonda gruplanmasını önler; (7a), (7b) ve (7c) kısıt kümesi ise bir işçinin yalnızca bir istasyona atanmasını garanti etmektedir.

Performans değeri kısıtları (3a ve 3b) ile enerji düzeyi kısıtları (5a ve 5b) birlikte modellendiğinde enerji gereksinimleri işlem süreleri ile bağlantılı olduğundan performans değeri kısıtlarının yapısına uyarlanmaktadır.

5.2 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Bölüm 4.2’de veri üretme sistematığı tanıtılmış olan parametrelere ek olarak, test problemleri için türetilmiş işçilere ait performans değerleri Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3’de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Jackson test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri

İşçi No	Performans Değeri		
	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
1	1.41	0.60	1.04
2	1.01	1.27	0.81
3	0.78	0.76	0.58
4	1.12	1.13	1.15
5	0.80	0.97	1.41
6	1.47	1.05	1.00
7	0.89	0.87	0.65
8	0.91	0.91	1.09

Çizelge 5.2 Buxey test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri

İşçi No	Performans Değeri		
	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
1	0.93	0.97	0.57
2	1.05	0.84	0.94
3	1.20	0.95	0.64
4	0.99	1.15	1.30
5	1.06	1.24	0.87
6	1.07	1.03	1.03
7	0.80	1.04	0.85
8	0.96	0.88	1.08
9	0.69	0.93	0.90
10	0.98	1.20	0.99
11	0.71	0.98	0.63
12	1.00	1.21	1.05
13	0.83	0.77	1.13
14	0.53	0.46	1.04

Çizelge 5.3 Hahn test problemindeki işçiler için türetilmiş performans değerleri

İşçi No	Performans Değeri		
	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
1	1.26	1.10	1.03
2	0.82	0.94	0.74
3	0.84	1.28	1.22
4	0.78	0.82	1.01
5	0.99	1.15	1.04
6	0.79	1.19	1.05
7	0.98	1.49	0.86
8	1.41	0.81	1.02
	0.89	0.92	1.04

Performans değerleri parametresinin ortalaması 1 standart sapması 0,2 olan normal dağılıma uyduğu varsayılmaktadır.

Test problemlerinde Urban'ın modeline göre atamalar elde edildikten sonra, bu atamalar için performans değerleri, enerji düzeyleri ve uyumsuz iş elemanı çiftleri için inceleme yapılmıştır.

İncelemede birinci adımda Urban'ın modeline göre eniyi atamalar elde edilmektedir. Bu atamalarda aslında performans değerleri dikkate alınmıyor gibi görünse de tüm işçiler için bu değer 1'dir. İşçilerin işleri standart sürede yaptığı kabulünden hareketle bu sonuca varılabilir. Fakat çalışmada işçilerin iş elemanlarını aynı hızda yapamayacakları açık bir şekilde ifade edilmektedir. İkinci adımda istasyon numaraları ile o istasyonlara atanmış işçilerin numaralarının aynı olduğu varsayımı yapılmaktadır. Yani birinci istasyona 1 numaralı işçi, ikinci istasyona 2 numaralı işçi atanmaktadır. Sonuçta her istasyonda atanan işçinin performans değeri geçerli olmaktadır. Daha anlaşılır olması için Jackson test probleminin C=13 çevrim süresi için Urban'ın modeline göre elde edilmiş ataması Çizelge 5.4'de verilmektedir. Ardından C=13 ve birinci veri seti için izleyen Çizelge 5.5'deki hesaplama yapılmıştır. Çizelge 5.5'deki istasyon numarasından sonra gelen sütun, Urban'ın modelinden hareketle elde

edilen istasyon süreleridir. İşçi numarasını izleyen sütunda atanan işçilerin performans değerleri (birinci veri setinden alınmış değerler) yer almaktadır. Son sütunda ise aslında sistemde gerçekte oluşan istasyon süreleri ortaya çıkmaktadır. İşçilerin tümünün aynı hızda iş elemanlarını yaptığı varsayımıyla yapılmış atamada aslında gerçek sürelerin göz ardı edildiği açıkça görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı işçilerin farklı özelliklerinin hat dengelemede önemini ortaya koymak ve insan faktörünün göz ardı edilemeyeceğini göstermektir.

Çizelge 5.4 Jackson test problemi C=13 için Urban'ın modeli ile elde edilmiş atama

İş Elemanı	Atandığı İstasyon	İleri/Geri Atama	İstasyon No	Atanan İş Elemanları	İşlem Süresi	Toplam Süre
1	1	İleri	1	1	6	11
2	1	İleri		2	2	
3	3	İleri		5	1	
4	2	İleri		6	2	
5	1	İleri	2	4	7	13
6	1	İleri		8	6	
7	4	İleri	3	3	5	10
8	2	İleri		10	5	
9	4	İleri	4	7	3	12
10	3	İleri		9	5	
11	4	Geri		11	4	

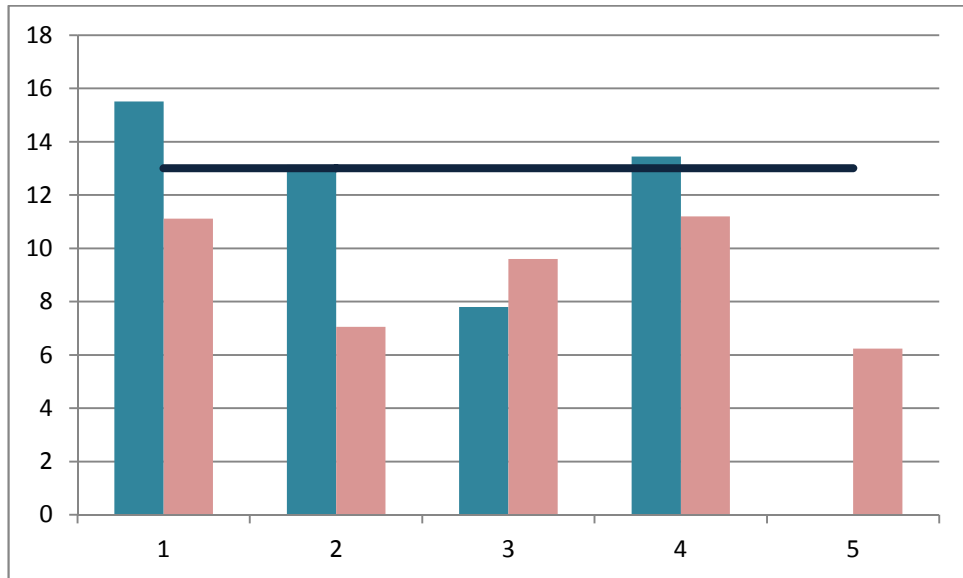
Çizelge 5.5'e bakıldığında yalnızca iş elemanı süreleri ve öncelik ilişkileri dikkate alınarak atama yapıldığında, üç istasyonda çevrim süresinin aşıldığı anlaşılmaktadır. Bu durum zamanla bu işçilerin darboğaz yaratmasına neden olacak, planlanan üretim hızı gerçekleştirilemeyecektir. 1., 2., ve 4. işçiler açısından da kaldırılabileceklerinden daha fazla yük atanmış olması zamanla diğer işçilere göre daha fazla yorulmalarına, aşırı strese maruz kalmalarına neden olacaktır. Yerine getirdikleri görevlerde hata yapma olasılıkları artacak ve iş kazası gibi kötü sonuçlar doğacaktır. Bu

nedenle farklı nitelikte işçi çalışan sistemlerde performans değerleri mutlaka dikkate alınarak atama yapılmalıdır.

Çizelge 5.5 Jackson test problemi $C=13$ için Urban'ın modelinden elde edilen atamada, birinci veri setindeki performans değerleri etkisiyle gerçekleşecek istasyon süreleri

İst.No	İst.Toplam Süresi	İşçi No	Performans Değeri	Performans Değeri*Toplam Süre
1	11	1	1.41	15.510
2	13	2	1.01	13.130
3	10	3	0.78	7.800
4	12	4	1.12	13.440

Performans değeri kısıtının modelde tek başına dikkate alınmasından sonra elde edilen atamaya Urban'ın modeline göre elde edilen eniyi atamadaki istasyon süreleri Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1 Jackson $C=13$ ve birinci veri seti için Urban'ın modeline göre elde edilen atama ve performans değeri kısıtlı atamaya elde edilen istasyon süreleri

Seri 1’de $C=13$ için Urban’ın modeline göre bulunan atamada, gerçekte oluşan istasyon süreleri görülmektedir. 1. ve 4. istasyonların çevrim süresini aştığı net olarak görülebilmektedir. Seri 2 ise performans değerinin modele dahil edilmesiyle elde edilen istasyon sürelerini göstermektedir. Görüldüğü gibi performans değeri kısıtı göz önünde bulundurulduğunda istasyon sayısı 4’ten 5’e çıkmakta fakat istasyon sürelerinin çevrim süresini aşması engellenmektedir. Böylece uzun dönemde daha sürdürülebilir bir denge elde edilmiş olmaktadır.

Jackson test problemi birinci veri seti için, performans değerlerini dikkate alarak elde edilen istasyon sürelerinin, Urban’ın modelinden elde edilen atamalar üzerinden incelenen değerleri Çizelge 5.6’da özetlenmektedir.

Çizelgede işaretli değerler çevrim süresini aşan istasyon sürelerini göstermektedir. Urban’ın modeli işçilerin iş elemanlarını standart sürede yaptığını varsayar. Ancak önerilen modele göre bu mümkün olmamaktadır. İşçilerin niteliklerine bağlı olarak kendilerine özel performans değerleri mevcuttur. Bu performans değerleri Urban’ın modelinden elde edilen atamalara yansıtıldığında (işçiler istasyonlara sırayla atanıyor ve atandığı istasyonda o işçinin performans değeri geçerli oluyor) Çizelge 5.6’da görülen istasyon süreleri elde edilmektedir. Bu çizelgedeki değerler Çizelge 5.8’de çevrim süresini aşan istasyon oranları olarak özetlenmektedir. Buxey ve Hahn test problemleri için de Urban’ın modeline göre atamalar elde edilmiş ve bu atamalara işçi performans değerleri yansıtılarak istasyon süreleri elde edilmiştir. İşçi niteliklerini dikkate alan bu gerçekçi süreler Ek-7 ve Ek-8’de verilmektedir. Buxey ve Hahn test problemlerine göre elde edilen bu istasyon süreleri de, işçilerin iş elemanlarını standart sürede yaptığı kabulünün gerçek hayatta geçerliliğini yitirdiğini göstermektedir. Bazı işçiler gerçek performanslarıyla işi standarda göre daha uzun sürede yaptığından hem diğer işçiler hem kendileri bundan rahatsız olacak, daha hızlı yapmaya çalışıldığında yorgunluğu, hata yapma ve iş kazası olasılığı artacaktır.

Enerji düzeyleri için de yine aynı yöntemle analiz yapılmış ve Urban’ın modeline göre elde edilen atamada aslında işçilerin gereksinim duyacağı enerji miktarlarının ne olacağı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.6 Jackson test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri

C	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
7	1	8.460	3.600	6.240
	2	6.060	7.620	4.860
	3	5.460	5.320	4.060
	4	7.840	7.910	8.050
	5	5.600	6.790	9.870
	6	8.820	6.300	6.000
	7	6.230	6.090	4.550
9	1	12.690	5.400	9.360
	2	7.070	8.890	5.670
	3	5.460	5.320	4.060
	4	10.080	10.170	10.350
	5	6.400	7.760	11.280
	6	8.820	6.300	6.000
10	1	14.100	6.000	10.400
	2	7.070	8.890	5.670
	3	7.020	6.840	5.220
	4	11.200	11.300	11.500
	5	8.000	9.700	14.100
13	1	15.510	6.600	11.440
	2	13.130	16.510	10.530
	3	7.800	7.600	5.800
	4	13.440	13.560	13.800
14	1	15.510	6.600	11.440
	2	10.100	12.700	8.100
	3	8.580	8.360	6.380
	4	15.680	15.820	16.100
21	1	12.690	5.400	9.360
	2	18.180	22.860	14.580
	3	14.820	14.440	11.020

Performans değerinde olduğu gibi enerji düzeyi için de kısıtı modele eklemeyen önce, Urban'ın modeline göre elde edilen atamadaki enerji gereksinimi düzeyleri, ele aldığımız üç test problemi ve üç farklı veri seti için analiz edilmiştir. Çizelge 5.7'de Jackson test problemi için ergonomik kısıtların herhangi birini eklemeyen önce Urban'ın modeline göre elde edilmiş atamalarda işçilerin ihtiyaç duyacağı enerji gereksinim düzeyleri görülmektedir.

Çizelge 5.7 Jackson test probleminde ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim düzeyleri (performans değerli işçi modeline göre)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
7	2	1	1.086	1.536	0.102
		2	0.504	2.011	0.920
		3	1.001	0.679	0.931
		4	1.073	1.317	2.250
		5	0.931	1.323	1.931
		6	0.606	0.300	0.474
		7	1.805	1.278	1.091
9	2	1	1.341	2.410	0.763
		2	0.675	2.073	0.911
		3	1.001	0.679	0.931
		4	1.317	1.185	2.703
		5	2.066	1.797	1.917
		6	0.606	0.300	0.474
10	2	1	1.512	2.472	0.754
		2	0.615	0.496	0.659
		3	1.127	2.355	1.983
		4	2.310	1.665	2.370
		5	1.442	1.456	1.933
13	2	1	1.521	2.668	0.939
		2	1.607	0.979	1.405
		3	1.180	2.460	2.190
		4	2.698	2.337	3.165
14	2	1	1.727	2.272	1.535
		2	1.180	2.460	2.190
		3	1.427	1.615	1.583
		4	2.672	2.097	2.391
21	2.5	1	1.317	1.185	2.703
		2	3.712	3.235	1.948
		3	1.977	4.024	3.048

Görüldüğü gibi üç veri seti için elde edilen enerji gereksinim düzeyleri, özellikle bazı çevrim sürelerinde üst sınırı bir hayli aşmaktadır. Ek-9 ve Ek-10'da verilen Buxey ve Hahn test problemleri için ergonomik kısıtlar öncesi elde edilen enerji gereksinim düzeyleri incelendiğinde de, ergonomik faktörler dikkate alınmadığında bazı işçilere sürekli performans sınırı üzerinde çalışmak zorunda kalacağı atamaların yapıldığı açıktır. Bu istasyonlarda görev alan işçiler diğer işçilere göre daha fazla yorgunluğa ve strese maruz kalacaktır. Bu yorgunluk ve stres işçilerin bir süre sonra planlanan üretim hızını gerçekleştirememesine neden olacaktır. Yani montaj hattının dengesi

sürdürülemezdir. Bu noktada sürdürülebilir denge önem kazanmaktadır. Bu da ergonomik faktörlerin dengeleme sırasında dikkate alınması ile mümkündür.

Çalışmada her bir kısıtın istasyon süresine etkisini araştırmak için ele alınan üç kısıtın (performans değeri, enerji düzeyi, uyumsuz iş elemanları kısıtı) tek tek ve birlikte modele dahil edilmesiyle elde edilen atamalar da analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda ulaşılan istatistiklerden Jackson test problemine ait olanlar Çizelge 5.8’de özet olarak sunulmaktadır. Buxey ve Hahn test problemleri için ulaşılan istatistiklerse Ek-11, 12, 13, 14, 15 ve 16’da verilmektedir.

Çizelge 5.8 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Birinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Jackson (n=11)					
	7	9	10	13	14	21
Çevrim süresi	7	9	10	13	14	21
U-MHD’ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Urban’ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4	3
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4	3
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Urban’ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	3/7	2/6	2/5	3/4	2/4	0/3
Urban’ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	0/7	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3
Urban’ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1

Çizelge 5.9 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (İkinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Jackson (n=11)					
Çevrim süresi	7	9	10	13	14	21
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4	4	3
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4	4	3
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	2/7	1/6	1/5	2/4	1/4	1/3
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	1/7	2/6	2/5	3/4	3/4	2/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/2	0/2	1/2	1/2	1/2	2/2

Bu bölümde geliştirilen model üzerinde yapılan analizler sonucunda U-MHD problemlerinde amaç, istasyon sayısını enküçükleme olduğunda insan faktörünün göz ardı edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Sadece iş elemanı süresi ve öncelik ilişkileri dikkate alınarak hattın dengelenmesi yapıldığında gerçek hayatta o denge sürdürülebilir olmamakta, zaman içinde hattın üretim hızında değişimler, kalite problemleri, iş kazaları görülmektedir. Sayılan tüm bu sebeplerle “insan faktörü hat dengelemede göz ardı edilemeyecek bir unsurdur” sonucuna varılmaktadır.

Jackson test problemi için yapılan testlerin özetini içeren çizelgelere bakıldığında, istasyon sayısının en fazla bir arttığı görülmektedir. Planlanan üretim hızıyla gerçekleşenin aynı olması istendiğinde ve montaj hattında çalışan işçilere

ergonomik olarak daha dengeli bir atama yapılmak istendiğinde istasyon sayısındaki bu bir artış sistemin kararlılığı için kabul edilebilir bir değer olmalıdır. Planlanan üretim hızını karşılayamayarak siparişleri geciktirmek ya da işçiye aşırı iş yükü atayarak iş kazalarına, kalite problemlerine sebep olmak bir istasyon fazla açmanın getireceği zarardan daha büyük olacaktır.

Çizelge 5.10 Jackson test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Üçüncü veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Jackson (n=11)					
	7	9	10	13	14	21
Çevrim süresi	7	9	10	13	14	21
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4	3
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5	4+1	4+1	3+1
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	7	6	5	4	4	3
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4	3
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5	4+1	4+1	3+1
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	7+1	6	5+1	4+1	4+1	3+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	2/7	3/6	3/5	1/4	1/4	0/4
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	1/7	1/6	1/5	2/4	2/4	2/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/4	0/4	0/4	2/4	0/4	3/4

Uyumsuz iş elemanı çiftlerinin de ergonomik kısıtlar dikkate alınmadığında aynı istasyonlarda gruplandığı görülmektedir. Bunu önleyerek işçinin iş yükü daha dengeli hale getirilmelidir.

Buxey ve Hahn test problemleri için istasyon sayılarına yönelik istatistikler de en fazla bir istasyon artışı olduğunu göstermektedir. İstasyon sayısının artması bir olumsuzluk olarak algılanmamalıdır, çünkü amaç elde edilen dengenin sürmesi, planlanan üretim hızı ile gerçekleşenin birbirine uyumlu olması ve en önemlisi işçinin yüklerinin dengelenmesidir.

BÖLÜM 6

U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ İÇİN BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI

U tipi montaj hattı dengeleme problemi gerçek hayat problemlerinde birden fazla amaç içermektedir. Bu amaçların hedef değerlerinin kesin olarak belirlenmesi pek mümkün olmamakta, belirsiz değerlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, ergonomik faktörleri dikkate alarak U hatlarını dengeleyen bir bulanık hedef programlama modeli önerilmektedir.

6.1 Bulanık Küme Teorisi

Bulanık küme ile ilgili kavramlar ilk olarak 1964 yılında L.A. Zadeh tarafından ele alınmıştır. 1965'te Zadeh tarafından yayınlanan makale modern anlamda belirsizlik kavramının değerlendirilmesinde önemli bir nokta olarak kabul edilmektedir. Zadeh bu makalesinde, "bulanık küme teorisini" ortaya koymuştur.

Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisi, esas olarak insanların düşüncelerindeki ve algılarındaki belirsizliği sayısallaştırmaya çalışır. Zadeh'in bulanık kümeler teorisi klasik mantığın tanımlayamadığı belirsiz kavramların matematiksel olarak ifade edilmesini sağlar (Zimmerman, 2001).

Geleneksel küme teorisi ile bulanık küme teorisi arasındaki en temel fark üyelik fonksiyonlarıdır. Bulanık kümeler kuramının amacı; belirsizlik ifade eden, tanımlanması güç veya anlamı zor kavramlara üyelik derecesi atayarak onlara belirlilik getirmektir. Klasik mantıkta bir kümeyi oluşturan elemanlar, bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Bu tür kümelere de klasik kümeler denir. Bulanık kümeler ise günlük hayatta kesin sayılar ve ifadeler kullanamadığımız için ortaya çıkmıştır. Bulanık bir kümenin sahip olacağı üyelik fonksiyonunun değer kümesi $[0,1]$ aralığı olacaktır. Küme elemanlarının üyelik fonksiyonunda yer alacağı değerler üyelik derecesi olarak tanımlanır. Klasik bir kümedeki elemanların alabileceği üyelik dereceleri 0 ve 1 ile sınırlı olmasına rağmen, bulanık bir kümedeki elemanların üyelik dereceleri $[0,1]$ kapalı

aralığındaki herhangi bir değeri alabilir. Üyelik derecesinin 1'e yaklaşması, öğelerin o kümeye daha fazla ait olması anlamına gelmektedir.

Göz önünde tutulan bir bulanık ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi olan kişiler tarafından belirlenir.

Bulanık küme teorisi kesin sınırları olmayan problemleri tanımlamak ve çözmek için geliştirilmiştir.

6.1.1 Bulanıklık kavramı

Bulanıklık kavramı için yapılan tanımlar izleyen şekildedir;

- Bir kelimenin anlamında veya bir kavramın tanımlanmasında bulunan belirsizliktir. Örnek: uzun adam, genç insan, zeki öğrenci
- Bir olayın, ifadenin veya kavramın semantiğinin (linguistik biliminin bir alt dalıdır, anlam bilimi) içerdiği belirsizliktir.

Bulanıklık olasılık ile karşılaştırıldığında;

- Olasılık, deney ve gözlem sayesinde netlikle belirlenebilecek bir belirsizlik çeşididir. Bulanıklık, deney ve gözlem kullanılsa dahi netlikle belirlenebilecek bir belirsizlik çeşidi değildir.
- Olasılık, bir olayın rassallığını modeller. Bulanıklık, bir olayın tanımlanmasındaki belirsizliği modeller.
- Olasılık, bir olayın ortaya çıkması veya çıkmaması olasılığı ile ilgilenir (Objektif değerler söz konusu). Bulanıklık, bir olayın ortaya çıkmasının subjektif derecesi (karar vericiye bağlı bir derece) ile ilgilenir.
- Olasılıkta olasılık dağılımları kullanılır. Bulanıklıkta üyelik fonksiyonları kullanılır.

Sonuç olarak; bulanık kümeler, dildeki belirsiz ve bulanık kavramların matematiksel olarak ifade edilmesine yardımcı olurlar.

6.1.2 Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları

Bulanık kümeler geliştirilmeden önce kümeler tanımlanırken kesin ifadeler kullanılmaktaydı. X evrensel bir küme ve $A \subset X$ olduğunda bir $x \in X$ noktası için “ $x \in A$ veya $x \notin A$ mıdır?” sorusuna kesin yanıtlar verilmekteydi. A kümesinin elemanları, yalnızca 0 ve 1 değeri alan $\mu_A(x)$ ile ifade edilmekte, x 'in A kümesinin elemanı olup olmadığı $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$ fonksiyonu ile tanımlanmaktaydı.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

Klasik bir küme için, bir nesne o kümenin elemanıdır ya da değildir, ortası yoktur. Ait olma ya da olmama durumu nettir.

X evreninin klasik bir alt kümesi olan \tilde{A} için üyelik, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ karakteristik fonksiyonu ile gösterilir ve $[0,1]$ arasında aşağıdaki gibi değişmektedir.

Eğer küme değerinin gerçekten $[0,1]$ aralığında olmasına izin verilirse, \tilde{A} kümesi “Bulanık Küme” olarak isimlendirilir. $\mu_{\tilde{A}}(x)$, X 'in \tilde{A} kümesi içindeki “üyelik derecesi”dir ve $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 'in bire yakın değerleri için x 'in \tilde{A} kümesine üyeliği artar. \tilde{A} bulanık kümesi, sıralı çiftler kümesi ile karakterize edilmiştir.

\tilde{A} , x ile gösterilen elemanların oluşturduğu X 'in bir alt kümesi, ilki bu alt kümenin bir elemanı, ikincisi ise bu elemanın kümeye üyelik (aidiyet) derecesini belirten sayısal değer olmak üzere elemanları sıralı ikililer olan küme olarak tanımlanır.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$$

$$\mu: X \rightarrow [0,1]$$

Örneğin bir emlakçı müşterilerine tanıtacağı evleri sınıflandırmak amacıyla yatak odası sayısını konfor göstergesi olarak almaktadır. Kiralık evlerin kümesi $X = \{1,2,3,4, \dots, 10\}$, x 'de evdeki yatak odası sayısını göstermek üzere, “dört kişilik bir aile için konfor tipi”ni gösteren bulanık küme izleyen şekilde tanımlanır (Zimmerman, 2001);

$$\tilde{A} = \{(1, .2), (2, .5), (3, .8), (4, 1), (5, .7), (6, .3)\}$$

Genel olarak küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren eğriye üyelik fonksiyonu adı verilir. Üyelik fonksiyonu ile bir x elemanın \tilde{A} kümesinin elemanı olup olmadığı ifade edilir.

Üyelik fonksiyonu, doğrusal (üçgensel, üçgensel simetrik...) olabildiği gibi, doğrusal olmayan (S, çan) yapıda da olabilir. Üyelik fonksiyonu yapısı, söz konusu problemin içinde yer alan belirsizliğe göre belirlenir.

Bulanık bir değişkene üyelik fonksiyonu atama süreci, kavramların uygulamadaki anlamına dayanarak sezgisel olarak yapılabilir. Kullanıcı tarafından belirlenen üyelik fonksiyonları kullanıcının tecrübesine, kültürüne, bakış açısına bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Bulanık küme teorisinde üyelik fonksiyonlarını belirleme süreci için özel algoritmalar geliştirilmiş olmasına rağmen, birçok uygulama işlemsel kolaylık bakımından parametrik olarak ifade edilebilen üyelik fonksiyonları ile gerçekleştirilmektedir.

Üyelik fonksiyonları birçok farklı şekillerde olabilir. Hesaplama açısından getirdiği kolaylıklar göz önüne alınarak istenilen şekilde üyelik fonksiyonun seçilmesi, bulanık küme teorisinin esnekliğinden kaynaklanan bir durumdur. Çoğu durumda, işlem kolaylığı bakımından parametrik üyelik fonksiyonlarından olan üçgensel ve yamuk üyelik fonksiyonları tercih edilir.

Üyelik fonksiyonlarının bulanık kümeler teorisinin esasını teşkil etmesi sebebiyle, uygulamayla örtüşen üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi çok önemlidir.

6.2 Bulanık Ortamda Karar Verme

1970’de Bellman ve Zadeh, klasik karar modelini incelemiş ve bulanık karar modelini geliştirmişlerdir (Zimmerman, 2001).

İşletme yönetiminin giderek yeni boyutlar kazanması, yaşanan işletme sorunlarının çözümünde yeni yaklaşımları gündeme getirmiştir. Amaçların gerçekleştirilmesi ve istenilen hedeflere ulaşılabilmesi için giderek tek amacın eniyelenmesi yerine, birden fazla amacın gerçekleştirilmesi istenmektedir. Günlük yaşamda karşılaşılan sorunların tek bir amaçla ifade edilmesi mümkün

olamayacağından çok amaçlı karar verme modelleri geliştirilmiştir. Karmaşık hedefler söz konusu olduğunda, karar verme problemlerinin çözümünde “Hedef Programlama Yöntemi”ne gereksinim duyulur. Çok amaçlı bir karar verme tekniği olan hedef programlama, belli kararlar çerçevesinde farklı ve çelişen amaçların eniyilenmesini araştıran matematiksel bir modeldir.

Her türlü işletme yönetiminde amaçların sağlanması ve hedeflere ulaşılmasında bulanık hedef programlama çalışmalarının çok önemli olduğu bir gerçektir.

6.3 U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Geliştirilmiş Bulanık Hedef Programlama Modelleri

Literatürde U tipi montaj hatları üzerine geliştirilen bulanık hedef programlama çalışmaları araştırıldığında iki modelle karşılaşılmaktadır. Birincisi Toklu ve Özcan’ın (2008) basit U tipi montaj hatları için önerdikleri bulanık hedef programlama modeli, diğeri ise Kara vd.’nin (2009), tek modelli düz ve U-şekilli hatlar için önerdikleri 0-1 tam sayılı bulanık hedef programlama modelidir.

Toklu ve Özcan’ın (2008) basit U tipi montaj hatları için geliştirdiği bulanık hedef programlama modeli, Gökçen ve Ağpak’ın (2006) U hatları için önerdiği hedef programlama modeli temelindedir.

Önerdikleri modelde bulanık hedefler 1, 2 ve 3 eşitliklerinde gösterildiği şekilde; istasyon sayısı, herhangi bir iş istasyonuna atanan iş elemanlarının işlem süreleri toplamı ve her bir istasyona atanan iş elemanlarının toplam sayısı şeklindedir.

$$Z_1 = \sum_{j=1}^{m_{enb}} z_j < IST \quad (1)$$

$$Z_3 = \sum_{i=1}^n (x_{ij} + y_{ij}) < TSK, \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (2)$$

$$Z_2 = \sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) < C, \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (3)$$

Araştırmacıların bu hedeflere dayanarak geliştirdikleri model, bu çalışmada ergonomik faktörleri göz önünde bulundurarak oluşturulacak yeni model için temel oluşturmuştur.

6.4 U Tipi Montaj Hattı Dengelemesi için Ergonomik Faktörleri Dikkate Alan Bulanık Hedef Programlama Modeli

U-MHD problemi gerçek hayat problemlerinde birden fazla amaç içermektedir. Bu amaçların hedef değerlerinin kesin olarak belirlenmesi pek mümkün olmamakta, belirsiz değerlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, ergonomik faktörleri dikkate alarak U hatlarını dengeleyen bir bulanık hedef programlama modeli önerilmektedir.

U hatları konumları gereği atamalarda daha çok iş elemanı gruplanabilmesine imkan tanıdığından, işçilerin yükleri doğal olarak artmaktadır. İnsan faktörünü göz ardı etmemek için bu durumda ergonomik faktörleri dikkate alarak atama yapmak gerekmektedir. Ergonomik faktörler dikkate alındığında işçilerin yükleri daha dengeli dağıtılmış olacak, bu da yapılan dengelemenin sürekliliğini sağlayacaktır.

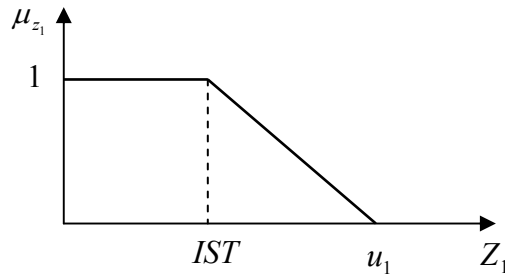
Ergonomik açıdan yükler istasyonlara dengeli dağıtılmadığında, istasyon sayısını azaltma amacıyla yapılan dengelemenin sürdürülebilir olması pek mümkün olmayacaktır. Çünkü istasyon sayısı ne kadar azaltılsa işçilerin iş yükü o kadar artacaktır ve işçilerin ergonomik çalışma koşulları kapasitelerinin üzerinde olacaktır. Bu nedenle U-tipi hat dengeleme problemi, insan faktörü dikkate alındığında çok amaçlılığının dikkate alınması gereken bir problemdir. Ele alınan amaçların hedef değerlerinin kesin olarak belirlenememesi bizi belirsizlikle karşı karşıya bırakmaktadır. Bu nedenle problem bulanık ortamda ele alınmış ve Toklu ve Özcan'ın (2008) U hatları için geliştirdiği bulanık hedef programlama modelini temel alan, yeni bir model geliştirilmiştir.

Ergonomik faktörler için pek çok kısıt bir arada düşünüldüğünde birbiriyle çelişen ve hedef değerleri kesin olarak belirlenemeyen amaçları göz önünde bulundurma zorunluluğu doğmaktadır.

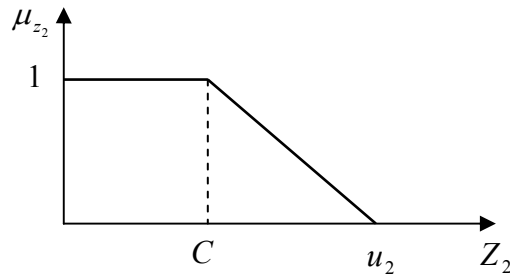
Önerilen modelle gerçek üretim sistemlerinde daha sürdürülebilir bir denge elde edileceği ve iş kazası, kalite problemleri gibi sorunların enazlanacağı öngörülmektedir.

Toklu ve Özcan'ın (2008) modeline enerji düzeyi ve uyumsuz iş elemanları kısıtı ilave edilmiş, yeni kısıtların probleme katkısı sayısal örneklerle test edilmiştir.

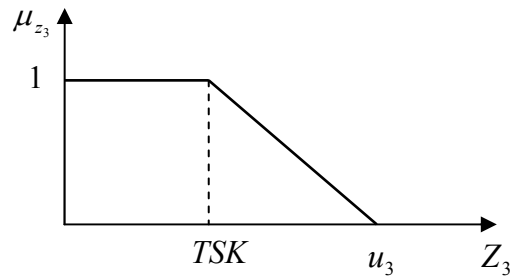
Ele alınan bulanık hedefler için Toklu ve Özcan'ın (2008) tanımladığı üyelik fonksiyonları Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'de görülmektedir.



Şekil 6.1 İş istasyonu sayısını temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu



Şekil 6.2 Çevrim süresini temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu



Şekil 6.3 Her bir istasyona atanan iş elemanı sayısını temsil eden bulanık hedef için üyelik fonksiyonu

Z_1, Z_2 ve Z_3 bulanık hedeflerinin üst sınır değerleri sırasıyla u_1, u_2 ve u_3 , alt sınır değerleri IST, C ve TSK olmak üzere bulanık hedefler için tanımlanmış doğrusal üyelik fonksiyonları izleyen şekildedir,

$$\mu_{Z_1} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } Z_1 \leq IST \\ (u_1 - Z_1) / (u_1 - IST) & \text{eğer } IST \leq Z_1 \leq u_1 \\ 0 & \text{eğer } Z_1 \geq u_1 \end{cases}$$

$$\mu_{Z_2} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } Z_2 \leq C \\ (u_2 - Z_2) / (u_2 - C) & \text{eğer } C \leq Z_2 \leq u_2 \\ 0 & \text{eğer } Z_2 \geq u_2 \end{cases}$$

$$\mu_{Z_3} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } Z_3 \leq TSK \\ (u_3 - Z_3) / (u_3 - TSK) & \text{eğer } TSK \leq Z_3 \leq u_3 \\ 0 & \text{eğer } Z_3 \geq u_3 \end{cases}$$

U-MHD problemi için geliştirilmiş bulanık hedef programlama modelinde kullanılan notasyon izleyen şekildedir;

i : iş elemanları indisi,

j : istasyonlar indisi,

t_i : i iş elemanının işlem süresi ($i = 1, \dots, n$)

n : toplam iş elemanı sayısı,

m_{enb} : enbüyük iş istasyonu sayısı,

m_{enk} : teorik olarak ihtiyaç duyulan enküçük iş istasyonu sayısı,

C : çevrim süresi,

$P = \{1, \dots, p, \dots, |P|\}$: Öncelik ilişkilerini yansıtan düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi

($p = (r, s)$, r işlemi s işleminden hemen önce gelmektedir).

W_j : orijinal diyagramdan j istasyonuna atanabilen iş elemanları alt kümesi

FW_j : gölge diyagramdan j istasyonuna atanabilen iş elemanları alt kümesi

$\|W_j\|$: W_j ve FW_j kümelerindeki iş elemanı sayısı, $j = 1, \dots, m_{enb}$

OE_i : orijinal diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

FE_i : gölge diyagrama göre i iş elemanının ilk yapılabileceği istasyon,

U : uyumsuz işlerden oluşan ikili iş elemanları kümesi,

e_i : i iş elemanı için birim zamanda ihtiyaç duyulan enerji miktarı,

E : her bir istasyona atanabilecek toplam enerji düzeyi için bir sınır değeri,

w_i : bulanık hedeflere ait ağırlıklar

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{asıl ağdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{hayali ağdaki } i. \text{ iş elemanının } j. \text{ istasyona atanması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

$z_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ istasyondan yararlanılması durumunda.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

Model varsayımları listelenecek olursa:

1. İş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.

2. Paralel iş istasyonlarına izin verilmemektedir.
3. İşçilerin yürüme zamanları göz ardı edilmektedir.

Toklu ve Özcan'ın (2008) geliştirdiği bulanık hedef programlama modelini temel alarak geliştirilmiş model izleyen şekildedir:

Model:

$$Enb f(\mu) = w_1 \cdot \mu_{Z_1} + w_2 \cdot \mu_{Z_2} + w_3 \cdot \mu_{Z_3} \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$(u_1 - IST) \cdot \mu_{Z_1} + \sum_{j=1}^{m_{enb}} z_j - u_1 \leq 0 \quad (2)$$

$$(u_2 - C) \cdot \mu_{Z_2} + \sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) - u_2 \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (3)$$

$$(u_3 - TSK) \cdot \mu_{Z_3} + \sum_{i=1}^n (x_{ij} + y_{ij}) - u_3 \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in OE_i}^{m_{enb}} (x_{ij}) + \sum_{j \in FE_i}^{m_{enb}} (y_{ij}) = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{j \in OE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{rj}) - \sum_{j \in OE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (6a)$$

$$\sum_{j \in FE_s}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{sj}) - \sum_{j \in FE_r}^{m_{enb}} (m_{enb} - j + 1) (y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (6b)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| z_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m_{enb} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E \quad j = 1, \dots, [m_{enk}] \quad (8a)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i e_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq E z_j \quad j = [m_{enk}] + 1, \dots, [m_{enb}] \quad (8b)$$

$$(x_{kj} + y_{kj}) + (x_{lj} + y_{lj}) \leq 1 \quad \forall (k, l) \in U \quad (9)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j = \{0,1\}, \mu_{Z_1}, \mu_{Z_2}, \mu_{Z_3} = [0,1] \quad \forall i, j \quad (10)$$

önerilen modelin amacı bulanık hedeflerin ağırlıklandırılmış tatmin seviyeleri toplamını enbüyüklemektir. (2), (3) ve (4). kısıtlar sırasıyla Z_1, Z_2 ve Z_3 bulanık hedeflerinin bulanık hedef kısıtlarıdır; (5) numaralı kısıt her bir iş elemanının tek bir istasyona atanmasını sağlar; (6a) ve (6b) kısıtları iş elemanları arasındaki öncelik koşullarını sağlar; (7) numaralı kısıt bir istasyona atanan iş elemanlarının o istasyona atanabilen iş elemanı sayısını geçmesini engeller; (8a) ve (8b) istasyonlara atanan iş elemanlarının ihtiyaç duyacağı enerji düzeyleri toplamının operatörün sürekli performans sınırında kalmasını garantiler; (9) uyumsuz iş elemanı çiftlerinin aynı istasyonda gruplanmasını önler.

6.5 Sayısal Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Modelin sayısal testlerinde, Jackson, Buxey ve Hahn test problemleri için hedef değerler model yapısına uygun bulanık aralıklarla tanımlanmıştır.

Bu bölümde önceki iki modelde vurgulanmaya çalışılan “ergonomik kısıtlar dikkate alınmazsa insan performansını aşan atamalar yapılacaktır” sonucuna götüren istatistiklere yeniden yer verilmeyecektir. Ergonomik faktörler dikkate alınmadığında karşılaşılabilecek olumsuzluklar yeterince açıklanmıştır. Bu bölümde ergonomik faktörler dikkate alındıktan sonra karar vericiye sunulan tatmin seviyesinde meydana gelecek değişiklikler incelenmiş ve sunulmuştur. Jackson test probleminin ergonomik kısıtlar eklenmeden orijinal modelin çözdürülmesi ile elde edilen dengede tatmin

seviyeleri, ergonomik kısıtlar eklendikten sonraki tatmin seviyeleri ile karşılaştırılmaktadır. Çizelge 6.1'den de görüleceği üzere ek kısıtların eklenmesi tatmin seviyelerinde çoğunlukla bir değişiklik yapmamıştır. Yani bir kötüleşmeye sebep olmamıştır. Bu durumda daha insancılaştırılmış bir denge elde etmek amacıyla ergonomik açıdan iyileşme sağlayacak kısıtların modele eklenmesi işçi yükünü de daha dengeli atayacaktır.

Çizelge 6.1 Jackson test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi

C	Ergonomik kısıt öncesi			Ergonomik kısıt sonrası								
	μ_{Z_1}	μ_{Z_2}	μ_{Z_3}	μ_{Z_1}			μ_{Z_2}			μ_{Z_3}		
				Veri Seti			Veri Seti			Veri Seti		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5
10	0	1.0	1.0	0	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
13	0.5	1.0	0.5	0	0	0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
14	0.5	1.0	1.0	0.5	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Çizelgeden, ergonomik kısıtlar eklendikten sonra istasyon sayısına yönelik tatmin seviyesi için (μ_{Z_1}) C=9, C=13 ve C=14 çevrim sürelerinin bazı veri setlerinde kötüleşme görülmektedir. Çevrim süresine yönelik tatmin seviyesinde de (μ_{Z_2}) C=7 için üçüncü veri seti ile yapılan testte bir kötüleşme görülmektedir. Ancak daha önce tanımlanan vasıflı-vasıfsız işçi modelinde ve performans değeri modelinde gösterildiği şekilde ergonomik kısıtlar modele dahil edilmediğinde işçiye taşıyabileceğinden daha fazla yük atanabilmektedir. C=9 çevrim süresi ve üçüncü veri setinde, çevrim süresine yönelik tatmin seviyesinde (μ_{Z_2}) ise ergonomik kısıtlar eklendikten sonra iyileşme olduğu görülmektedir. Diğer tatmin seviyeleri ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden önce ve sonrasında aynı düzeyde kalmıştır.

Tatmin seviyelerinin ağırlıklı toplamından oluşan amaç fonksiyonu değeri için de Çizelge 6.2’de yer alan değerlere ulaşılmıştır.

Çizelge 6.2 Jackson test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri

C	Ergonomik kısıt öncesi $f(\mu)$	Ergonomik kısıt sonrası		
		$f(\mu)$		
		Veri Seti		
		1	2	3
7	0.495	0.495	0.495	0.330
9	0.495	0.495	0.495	0.495
10	0.660	0.660	0.660	0.660
13	0.660	0.495	0.495	0.495
14	0.825	0.825	0.660	0.660
21	0.825	0.825	0.825	0.825

Burada da bazı tatmin seviyelerinde Kabul edilebilir bir azalma görülmektedir fakat ergonomik faktörleri dikkate alarak işçilere daha dengeli atama yapılmaktadır.

Çizelge 6.3 Buxey test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi

C	Ergonomik kısıt öncesi			Ergonomik kısıt sonrası								
	μ_{Z_1}	μ_{Z_2}	μ_{Z_3}	μ_{Z_1}			μ_{Z_2}			μ_{Z_3}		
				Veri Seti			Veri Seti			Veri Seti		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
27	1.0	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.8	0.6	1.0	1.0	1.0
30	0	1.0	1.0	0	0	0.5	0.8	1.0	0.4	1.0	0.667	1.0
33	0	0.8	1.0	0	0.5	0	0.8	0.2	0.8	1.0	1.0	1.0
36	0	0.8	1.0	0	0	0	0.6	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0
41	0.5	0.6	0.667	0	0.5	0	1.0	0.6	1.0	0.667	0.667	0.667
47	0	1.0	0.667	0	0	0	1.0	1.0	1.0	0.667	0.667	0.667
54	0.5	0.6	0.333	0	0	0	1.0	1.0	1.0	0.333	0.333	0.333

Çizelge 6.4 Buxey test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri

C	Ergonomik kısıt öncesi $f(\mu)$	Ergonomik kısıt sonrası		
		$f(\mu)$		
		Veri Seti		
		1	2	3
27	0.792	0.858	0.924	0.858
30	0.660	0.594	0.627	0.627
33	0.594	0.594	0.561	0.594
36	0.594	0.528	0.594	0.594
41	0.583	0.550	0.583	0.550
47	0.550	0.550	0.550	0.550
54	0.473	0.440	0.440	0.440

Buxey test probleminden elde edilen tatmin seviyeleri incelendiğinde de azalmaların makul seviyede kaldığı hatta ergonomik kısıtların eklenmesi sonrasında bazı tatmin seviyelerinde artış olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.5 Hahn test probleminde ergonomik kısıt öncesi ve ergonomik kısıt sonrası tatmin seviyelerinin değişimi

C	Ergonomik kısıt öncesi			Ergonomik kısıt sonrası								
	μ_{z_1}	μ_{z_2}	μ_{z_3}	μ_{z_1}			μ_{z_2}			μ_{z_3}		
				Veri Seti			Veri Seti			Veri Seti		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
2004	0.5	1.0	0.733	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.667	0.733	0.533
2338	0.5	1.0	0.8	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.733
2806	0	1.0	0.733	0	0	0	1.0	1.0	1.0	0.733	0.733	0.733
3507	0.5	1.0	0.6	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6
4676	0	1.0	0.4	0	0	0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.4	0.4

Çizelge 6.6 Hahn test problemi için bulanık hedef programlama modelinin ergonomik kısıtlar öncesi ve sonrası amaç fonksiyonu değeri

<i>C</i>	<i>f</i> (μ)	Ergonomik kısıt sonrası		
		<i>f</i> (μ)		
		Veri Seti		
		1	2	3
2004	0.737	0.715	0.737	0.671
2338	0.759	0.759	0.759	0.737
2806	0.572	0.572	0.572	0.572
3507	0.693	0.693	0.693	0.693
4676	0.462	0.462	0.462	0.462

Hahn test probleminden elde edilen seviyelere bakıldığında da tatmin seviyeleri çoğunlukla aynı kalmaktadır. Aynı tatmin seviyesinde işçiler için daha ergonomik bir atama gerçekleştirilerek uzun dönemde daha sürdürülebilir bir denge elde edilmiş olmaktadır.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çağımızda iş dünyası, sürekli kazanç artırma hedefine yönelik çabalar içindedir. Şüphesiz bu çabalar, verimli ve ekonomik üretim metotlarını geliştirmekte ve modern teknolojiler ile çalışmalar da ülkenin zenginleşmesi çabalarına katkıda bulunmaktadır. Ancak, bu yaklaşımlar beraberinde yabancılaşma, doyumsuzluk, işçi sağlığı ve iş güvenliği sorunları yanında; hem tüm iş görenleri ve hem de toplumu etkileyen stres ve strese bağlı pek çok sorunun ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

U tipi montaj hatlarının pek çok faydası olmasına karşın genellikle istasyon sayısını azaltmaya yönelik faydasından yararlanma çabası ağır basmaktadır. U-tipi montaj hatlarını dengelerken istasyon sayısı azaltma yanında, iş istasyonlarında artan iş yükünün getirdiği sorunlar ve diğer ergonomik faktörlerde dikkate alınmalıdır. U-tipi montaj hatlarını dengelerken ergonomik faktörlerin göz önünde bulundurulması durumunda, yapılan dengeden sapma olması ihtimali ve işçilere fazla yük atanmasından dolayı oluşabilecek yorgunluk, dikkat dağılması ve dolayısıyla iş kazaları ve kalite problemleri enazlanmış olacaktır.

Bu çalışmada, montaj hattı dengeleme problemlerinin bir alt sınıfı olan basit tek modelli U-tipi montaj hattı dengelemesi için insan faktörünü dikkate alan yeni yaklaşımlar önerilmektedir. Bu yaklaşımlar firmanın ihtiyaçlarına göre farklı ergonomik faktörleri de içerecek şekilde geliştirmeye açıktır.

Çalışmada U-tipi montaj hatları, tam sayılı programlama modeliyle yalnızca iş elemanı sürelerini ve öncelik ilişkilerini dikkate alıp, belirli bir çevrim süresine göre iş istasyonu sayısı azaltmaya çalışarak dengelendiğinde insan unsurunun göz ardı edildiği vurgulanmaktadır. İnsan unsuru göz ardı edildiğinde bundan yalnızca işgören değil sistem de zarar görmektedir.

Ergonomik faktörlerin hat dengelemede göz önünde bulundurulmasının sisteme ve işçiye yansımalarını araştırmak için üç farklı yaklaşım üzerinde durulmaktadır. Yeni

yaklaşımların gerçek sistemlerde daha insancıl ve sürdürülebilir atamalar gerçekleştirdiği sayısal testlerle gösterilmeye çalışılmaktadır.

Geliştirilen yaklaşımlar küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde sınanmış, testlerde kullanılacak literatürde bulunmayan parametrelerin elde edilmesi için bir veri türetme sistematığı geliştirilmiştir.

İzleyen değerler Jackson test problemi için işçilerin performans değerlerini dikkate alarak montaj hattının dengelenmesini sağlayan modelin incelendiği Bölüm 5'deki Çizelge 5.10'un bir bölümüdür. Bu değerler diğer test problemlerinde olduğu gibi bize ergonomik faktörler dikkate alınmadığında insanın kapasitesini aşan atamaların nelere sebep olabileceği konusunda fikir vermektedir. Örneğin ele alınan altı çevrim süresinden beşinde mutlaka çevrim süresini aşan istasyon süreleri meydana gelmiştir. İlk üç çevrim süresindeki oranlar çok göze batan değerlerdir. $C=7$ de yedi istasyondan ikisinde, $C=9$ 'da altı istasyondan üçünde ve $C=10$ 'da beş istasyondan üçünde işçiler çevrim süresinden daha uzun sürede işlerini tamamlayabilmektedirler. Bu durum onlar üzerinde oluşacak stresi artıracak, daha hızlı yapmaya çalışırken yorulacak, bir süre sonra dikkatleri dağılacak, kalite problemlerine yol açacaklar ya da iş kazasına sebep olacaklardır. Montaj hattının dengesi kararlı olmaktan uzaklaşacak elde edilen denge sürdürülemezdir.

Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	2/7	3/6	3/5	1/4	1/4	0/4
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	1/7	1/6	1/5	2/4	2/4	2/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/4	0/4	0/4	2/4	0/4	3/4

Basit U-MHD için geliştirilen bu yeni yaklaşımların amacı, henüz yeterince incelenmemiş olan bu probleme dikkatleri çekmek, yapılmış olan çalışmalara yenilerini ekleyip literatüre katkı sağlayabilmek ve bu konuda çalışacak araştırmacılara yeni bir bakış açısı kazandırabilmektir.

Bu alanda gelecekte Şu alıŐmalar da yapılabilir.

- Geliştirilen modellerin, gerçek montaj hattı sistemlerinde uygulanması,
- Basit tek modelli U-tipi montaj hatları için geliştirilmiş yaklaşımların çok ve karışık modelli hatlar için uygulanabilirliğinin araŐtırılması,
- Paralel iş istasyonları kullanımı yoluyla işçilerin ergonomik açıdan iş yüklerinin dengelenmesi,
- İŞçilerin yürüme mesafelerini de göz önünde bulundurarak modellerin sınanması,
- Daha fazla ergonomik faktörleri içeren kısıtın modellerde dikkate alınması istendiğinde eniyi çözüme ulaŐma süresi artacağından daha kısa sürede çözüm bulan sezgisel yaklaşımların geliŐtirilmesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aase, G.R., Schniederjans, M.J. and Olson, J.R., (2003), U-OPT: an analysis of exact U-shaped line balancing procedures, *International Journal of Production Research*, 41, 17, 4185-4210.
- Aase, G.R., Olson, J.R. and Schniederjans, M.J., (2004), U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study, *European Journal Of Operational Research*, 156, 3, 698-711.
- Acar, N. ve Eştaş, S., (1986), *Kesikli Seri Üretim Sistemlerinde Planlama ve Kontrol Çalışmaları*, Milli Produktivite Merkezi Yayınları, 156 s.
- Ağpak, K. ve Gökçen, H., (2001), U Tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi İçin Bir Sezgisel Metot: Düzenlenmiş Comsoal (U-Comsoal), *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 12, 2, 23-32.
- Ağpak, K. ve Gökçen, H., (2002a), Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4, 2, 29-40.
- Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N.N. ve Özel, S., (2002b), Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17, 4, 115-124.
- Ağpak, K. and Gökçen, H., (2007), A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 180, 1098-1115.
- Ajenblit, D.A. and Wainwright, R.L., (1998), Applying Genetic Algorithms To The U-Shaped Assembly Line Balancing Problem, *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, 96-101.
- Amen, M., (2000), An exact method for cost-oriented assembly line balancing, *International Journal of Production Economics*, 64, 187-195.
- Arai, T., Kato, R. and Fujita, M., (2010), Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 5-8
- Aydoğan, E.K., Gencer, C., Gökçen, H. ve Ağpak, K., (2004), Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Yeni Bir Optimal Çözüm Yöntemi: En Kısa Yol Modeli, *Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği-XXIV Ulusal Kongresi*, 15-18 Haziran 2004, Gaziantep-Adana.
- Babalık, F. C. (2007). *Mühendisler İçin ERGONOMİ İşbilim*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Balasubramanian, V., Adalarasu, K. ve Regulapati, R., (2009), Comparing dynamic and stationary standing postures in an assembly task, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 649-654
- Bao, S., Winkel, J., Mathiassen, S.E. and Shahnava, H., (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 Industrial Ergonomics*, 20, 75-85.
- Boudreau, J., Hopp, W., McClain, J.O. and Thomas, L.J., (2003), On the Interface Between Operations and Human Resource Management, *Manufacturing&Service Operations Management*, 5, 3, 179-202
- Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A., (2006), Characteristics of the assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 183, 674-693.
- Bullinger, H., Rally, P., and Schipfer, J. (1997). Some Aspects of Ergonomics in Assembly Planning. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 20, 5, 389-397.
- Buxey, G.M., (1974), Assembly Line Balancing with Multiple Stations, *Management Science*, 20, 6, 1010-1021.
- Chand, S. and Zeng, T., (2001), A Comparison of U-Line and Straight-Line Performances Under Stochastic Task Times, *Manufacturing & Service Operations Management*, 3, 2, 138-150.
- Cheng, C.H., Miltenburg, J. and Motwani, J., (2000), The Effect of Straight- and U-Shaped Lines on Quality, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 47, 3, 321-333.
- Chiang, W.C. and Urban, T.L., (2006), The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure, *European Journal of Operational Research*, 175, 1767-1781.
- Choi, G., (2009), A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload, *Computers&Industrial Engineering*, 57, 395-400.
- Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Fragos, D. and Karabatsou, V., (2000), A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, 267-276.
- Corominas, A., Pastor, R. and Plans, J., (2008), Balancing Assembly Line with Skilled and Unskilled Workers, *Omega*, 36, 6, 1126-1132.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Costa, A.M. and Miralles, C., (2009), Job rotation in assembly lines employing disabled workers, *International Journal of Production Economics*, 120, 2, 625-632.
- Duquette, J., Lortie, M. and Rossignol, M., (1997), Perception of difficulties for the back related to assembly work: general findings and impact of back health, *Applied Ergonomics*, 28, 5/6, 389-396.
- Erel, E., Sabuncuoglu, I. and Aksu, B.A., (2001), Balancing of U- type assembly systems using simulated annealing, *International Journal of Production Research*, 39, 13, 3003-3015.
- Erkan, N., (1997), ERGONOMİ Verimlilik, Sağlık ve Güvenlik İçin İnsan Faktörü Mühendisliği, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları No:373, Ankara, Genişletilmiş Dördüncü Basım, 295 s.
- Erkut, H. ve Baskak M., (1997), Stratejiden Uygulamaya Tesis Tasarımı, İrfan Yayıncılık, 428 s.
- Freiboth, M., Frieling, E., Henniges, D. and Saager, C., (1997), Comparison of different organisations of assembly work in the European automotive industry, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20, 357-370.
- Gamberini, R., Grassi, A., Gamberi, M., Manzini, R. and Regattieri, A., (2004), U-shaped assembly lines with stochastic tasks execution times: Heuristic procedures for balancing and re-balancing problems, *Proceedings of the Business and Industry Symposium, 2004, Virginia*.
- Ghosh, S. and Gagnon, R.J., (1989), A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems, *International Journal of Production Research*, 27, 4, 637-670.
- Gökçen, H. ve Ağpak, K., (2003), U tipi montaj hattı dengeleme problemi için 0-1 tam sayılı programlama modeli, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 2, 1, 72-81.
- Gökçen H., Ağpak K., Gencer C. and Kızılkaya E., (2005), A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem, *Applied Mathematical Modelling*, 29, 373-380.
- Gökçen, H. and Ağpak, K., (2006), A Goal programming Approach to Simple U-Line Balancing Problem, *European Journal of Operational Research*, 171, 577-585.
- Guerriero, F. and Miltenburg, J., (2003), The stochastic U-line balancing problem, *Naval Research Logistics*, 50, 1, 31-57.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Gunther, R.E., Johnson, G.D. and Peterson, R.S., (1983), Currently Practiced Formulations For the Assembly Line Balance Problem, *Journal of Operations Management*, 3, 4, 209–221.
- Güner, B. ve Hasgül, S., (2009), İnsan Faktörünü Dikkate Alan U Tipi Montaj Hattı Dengelemesi İçin Bulanık Hedef Programlama Yaklaşımı, 9. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 111-117, ESOGÜ, Eskişehir, 15/10/2009.
- Hägg, G. M., Öster, J. and Byström, S., (1997), Forearm muscular load and wrist angle among automobile assembly line workers in relation to symptoms, *Applied Ergonomics*, 28, 1, 41-47.
- Häkkinen, M., Viikari-Juntura, E. and Takala, E.P., (1997), Effects of changes in work methods on musculoskeletal load. An intervention study in the trailer assembly, *Applied Ergonomics*, 28, 2, 99-108.
- Hasgul, S. and Guner, B., (2009), " Balancing U type assembly lines with heterogeneous workers", *23rd European Conference on Operational Research EURO XXIII*, Bonn, 07/07/2009.
- Huey, B.M. and Wickens, C., (1993), *Workload Transition: Implications for Individual and Team Performance*, National Academic Press, Washington, DC, 1993.
- İşleyen, S.K. ve Baykoç, Ö.F., (2004), Tek Modelli Stokastik U Tipi Montaj Hattının Deterministik Dengeleme Teknikleri Kullanılarak Dengelenmesi Ve Benzetimi: Arçelik A.Ş.'de Bir Uygulama, Yöneylem Araştırması/Endüstri mühendisliği-XXIV Ulusal Kongresi, 15-18 Haziran 2004, Gaziantep-Adana.
- Jackson, J.R., (1956), A computing procedure for a line balancing problem, *Management Science*, 2, 261-272.
- Kara, Y., (2003), U-Tipi Montaj Hatlarının Tasarımı ve Dengelenmesi, IV. Endüstri İşletme Mühendisliği Kurultayı, 12-13 Aralık 2003, Denizli.
- Kara, Y., Özcan, U. ve Peker, A., (2004a), A Simulated Annealing Approach For Balancing And Sequencing of Mixed-Model U-Lines, Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği-XXIV Ulusal Kongresi, 15-18 Haziran 2004, Gaziantep-Adana
- Kara, Y., Özcan, U. ve Peker, A., (2004b), Balancing And Sequencing of Mixed-Model U-Lines With Multiple Objectives, Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği-XXIV Ulusal Kongresi, 15-18 Haziran 2004, Gaziantep-Adana.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Kara, Y. ve Özcan, U., (2004), Karışık Modelli U-Tipi Montaj Hatlarının Paralel İş İstasyonları İle Dengelenmesi İçin Bir Sezgisel Metot , IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 8-10 Ekim 2004, Konya.
- Kara, Y., Özcan, U. and Peker, A., (2007), Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives, *Applied Mathematics and Computation*, 184, 566-588.
- Kara, Y., Paksoy, T. and Chang, C., (2009), Binary Fuzzy Goal Programming Approach to Single Model Straight and U-Shaped Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research*, 195, 335–347.
- Kazmierczak, K., Mathiassen, S.E., Forsman, M., and Winkel, J., (2005), An integrated analysis of ergonomics and time consumption in Swedish 'craft-type' car disassembly, *Applied Ergonomics*, 36, 263-273.
- 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 & Control*, 11, 8, 754-764.
- Kim, Y.K., Kim, J.Y. and Kim, Y., (2006), An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines, *European Journal of Operational Research*, 168, 838-852.
- Landau, K., Rademacher, H., Meschke, H., Winter, G., Schaub, K., Grasmueck, M., Moelbert, I., Sommer, M. ve Schulze, J., (2008), Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38, 561–576
- 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.
- Lin, R. ve Chan, C., (2007), Effectiveness of workstation design on reducing musculoskeletal risk factors and symptoms among semiconductor fabrication room workers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37, 35–42
- Lodree, E.J., Geiger, C.D. and Jiang, X., (2009), Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 1, 39-51.
- Medbo, L., (2003), Assembly work execution and materials kit functionality in parallel flow assembly systems, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31, 4, 263-281.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Miltenburg, G.J. and Wijngaard, J., (1994), The U-line Line Balancing Problem, *Management Science*, 40, 10, 1378–1388.
- Miltenburg, J., (1998), Balancing U-lines in a multiple U-line facility, *European Journal Of Operational Research*, 109, 1-23
- Miltenburg, J., (2000), The effect of breakdowns on U-shaped production lines, *International Journal of Production Research*, 38, 2, 353-364.
- Miltenburg, J., (2001a), U-shaped production lines: A review of theory and practice, *International Journal of Production Economics*, 70, 201-214.
- Miltenburg, J., (2001b), One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: a tutorial, *IIE Transactions*, 33, 4, 303-321.
- Nakade, K. and Ohno, K., (1996), Bounds of Cycle Times of a U-Shaped Production Line, *The Operations Research Society of Japan*, 1996(19961107), 212-213.
- Nakade, K. and Ohno, K., (1997), Stochastic Analysis of a U-shaped Production Line with Multiple Workers, *Computers&Industrial Engineering*, 33, 3-4, 809-812.
- Nakade, K., Ohno, K. and Shanthikumar, J.G., (1997), Bounds and approximations for cycle times of a U-shaped production line, *Operations Research Letters*, 21, 191-200.
- Nakade, K. and Ohno, K., (1999), An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line, *International Journal Of Production Economics*, 60-61, 353-358.
- Nakade, K. and Ohno, K., (2003), Separate and carousel type allocations of workers in a U-shaped production line, *European Journal Of Operational Research*, 145, 2, 403-424.
- Norman, R., Wells, R., Neumann, P., Frank, J., Shannon, H., Kerr, M. and the :Ontario Universities back Pain Study (OUBPS) Group, (1998), A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry, *Clinical Biomechanics*, 13, 561-573
- Ohno, K. and Nakade, K., (1997), Analysis and Optimization of a U-Shaped Production Line, *Journal Of The Operations Research Society of Japan*, 40, 1, 90-104.
- Okur, A.S., (1997), *Yalın Üretim 2000’li Yıllara Doğru Türkiye Sanayii İçin Yapılanma Modeli*, 2. Baskı, Tofaş Söz Yayın.
- Özcan, U. ve Peker, A. , (2007), Karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemleri için yeni bir sezgisel yaklaşım, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 2, 277-286.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- Özgörmüş, E., (2007), Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 87 s.
- Potvin, J.R., Chiang, J., Mckean, C. and Stephens, A., (2000), Apsychophysical study to determine acceptable limits for repetitive hand impact severity during automotive trim installation, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26, 625-637.
- Scholl, A. and Klein, R. , (1999), ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines, *International Journal of Production Research*, 37, 4, 721-736.
- Shewchuk, J.P., (2008), Worker allocation in lean U-shaped production lines, *International Journal of Production Research*, 46, 3485-3502.
- Sparling, D. and Miltenburg, J., (1998), The mixed-model U-line balancing problem, *International Journal of Production Research*, 36, 2, 485-501.
- Tekin, M., Kara, Y. ve Özcan, U., (2004), Stokastik Görev Zamanlı Karışık Modelli U-Tipi Montaj Hatlarında Hat Dengelemesi Ve Model Sıralaması, IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 8-10 Ekim 2004, Konya.
- Toklu, B. and Özcan, U., (2008), A fuzzy goal programming model for the simple U-line balancing problem with multiple objectives, *Engineering Optimization*, 40, 3, 191–204
- Urban, T. L. (1998). Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science* , 44, 5, 738-741.
- Urban, T.L. and Chiang, W.C., (2006), An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times, *European Journal of Operational Research*, 168, 771-782.
- Wartenberg, C., Dukic, T., Falck, A.C. and Hallbeck, S., (2004), The effect of assembly tolerance on performance of a tape application task: A pilot study, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33, 369-379.
- Zetterberg, C., Forsberg, A., Hansson, E., Johansson, H., Nielsen, P., Danielsson, B., Inge, G. and Olsson, B.M., (1997), Neck and upper extremity problems in car assembly workers. A comparison of subjective complaints, work satisfaction, physical examination and gender, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 277-289.
- Zimmermann, H.-J., (2001), *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, London, 514 p.

U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin
Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi

Banu GÜNER

EKLER

- Ek-1** Buxey Test Problemine Ait Veri Seti
- Ek-2** Hahn Test Problemine Ait Veri Seti
- Ek-3** Buxey test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kj/sn) değerleri
- Ek-4** Hahn test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kj/sn) değerleri
- Ek-5** Buxey test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)
- Ek-6** Hahn test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Servet HASGÜL

Mayıs 2011

U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin
Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi

Banu GÜNER

EKLER (devam)

- Ek-7** Buxey test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri
- Ek-8** Hahn test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri
- Ek-9** Buxey test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Performans değerli işçi modeline göre)
- Ek-10** Hahn test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Performans değerli işçi modeline göre)
- Ek-11** Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Birinci veri seti)

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Servet HASGÜL

Mayıs 2011

U-Tipi Montaj Hatlarının Sürdürülebilir Üretim Akışı İçin

Ergonomik Kısıtlar Altında Dengelenmesi

Banu GÜNER

EKLER (devam)

- Ek-12** Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (İkinci veri seti)
- Ek-13** Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Üçüncü veri seti)
- Ek-14** Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Birinci veri seti)
- Ek-15** Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (İkinci veri seti)
- Ek-16** Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi (Üçüncü veri seti)

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Servet HASGÜL

Mayıs 2011

Ek-1 Buxey Test Problemine Ait Veri Seti

İş Elemanı j	Ardıl (j)	İş Elemanı Süresi t(i)	İş Elemanı j	Ardıl (j)	İş Elemanı Süresi t(i)
1	{3,25}	7	16	{18}	7
2	{6,26}	19	17	{20}	14
3	{4}	15	18	{22}	17
4	{5}	5	19	{21}	10
5	{8,13}	12	20	{23}	16
6	{8}	10	21	{22}	1
7	{9,12,25}	8	22	{23}	9
8	{11,16}	16	23	{24,28}	25
9	{10}	2	24	{29}	14
10	{14,15}	6	25	{29}	14
11	{17}	21	26	{27}	2
12	{15}	10	27	{29}	10
13	{17}	9	28	{29}	7
14	{16}	4	29	{}	20
15	{19}	14			

Ek-2 Hahn Test Problemine Ait Veri Seti

İş Elemanı j	Ardıl (j)	İş Elemanı Süresi t(i)	İş Elemanı j	Ardıl (j)	İş Elemanı Süresi t(i)
1	{2,3,4,5,6,7}	971	28	{29,30,31,32,33,34}	69
2	{36}	142	29	{35}	99
3	{36}	142	30	{35}	70
4	{9}	142	31	{35}	70
5	{9}	103	32	{35}	158
6	{9}	96	33	{35}	191
7	{9}	99	34	{35}	70
8	{9}	1207	35	{36}	53
9	{10}	160	36	{37}	50
10	{11}	180	37	{38,39,40}	125
11	{12}	82	38	{41}	353
12	{13,14,15}	60	39	{41}	70
13	{16,17,18}	112	40	{41}	128
14	{22}	420	41	{42}	65
15	{16,17}	1556	42	{43,44,45,46,47}	1775
16	{29,30,31}	236	43	{48}	91
17	{19}	259	44	{49}	91
18	{42}	125	45	{51,52}	113
19	{20,21,22}	601	46	{50}	487
20	{23}	80	47	{51,52}	138
21	{24}	80	48	{51,52}	80
22	{25}	70	49	{51,52}	80
23	{36}	89	50	{51,52}	65
24	{36}	89	51	{53}	40
25	{26}	105	52	{53}	742
26	{27}	330	53	{}	1085
27	{28}	132			

Ek-3 Buxey test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kj/sn) değerleri

İş Elemanı No	Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
1	0.332	0.348	0.202
2	0.19	0.135	0.062
3	0.045	0.03	0.249
4	0.135	0.1	0.173
5	0.222	0.241	0.095
6	0.228	0.014	0.305
7	0.087	0.068	0.286
8	0.278	0.133	0.279
9	0.205	0.036	0.182
10	0.168	0.115	0.187
11	0.309	0.083	0.228
12	0.093	0.306	0.306
13	0.327	0.294	0.294
14	0.228	0.237	0.164
15	0.182	0.149	0.076
16	0.233	0.324	0.032
17	0.352	0.1	0.246
18	0.013	0.082	0.154
19	0.168	0.195	0.195
20	0.126	0.197	0.124
21	0.343	0.312	0.166
22	0.205	0.141	0.36
23	0.056	0.127	0.054
24	0.241	0.152	0.298
25	0.14	0.159	0.305
26	0.123	0.347	0.201
27	0.322	0.121	0.267
28	0.254	0.157	0.012
29	0.259	0.086	0.232

Ek-4 Hahn test problemindeki iş elemanları için türetilmiş enerji gereksinim (kj/sn) değerleri

İş Elemanı No	Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
1	0.314	0.298	0.018
2	0.174	0.16	0.085
3	0.351	0.307	0.001
4	0.014	0.176	0.133
5	0.082	0.348	0.321
6	0.226	0.056	0.07
7	0.23	0.166	0.358
8	0.086	0.102	0.173
9	0.086	0.161	0.254
10	0.352	0.338	0.075
11	0.02	0.358	0.121
12	0.209	0.072	0.178
13	0.349	0.103	0.055
14	0	0.212	0.291
15	0.051	0.283	0.154
16	0.292	0.091	0.11
17	0.29	0.018	0.158
18	0.147	0.081	0.007
19	0.024	0.107	0.324
20	0.246	0.322	0.247
21	0.029	0.109	0.35
22	0.183	0.006	0.189
23	0.083	0.291	0.252
24	0.283	0.263	0.245
25	0.319	0.017	0.093
26	0.355	0.275	0.125
27	0.202	0.12	0.157
28	0.125	0.101	0.244
29	0.097	0.095	0.145
30	0.245	0.318	0.126
31	0.347	0.238	0.119
32	0.36	0.165	0.067
33	0.095	0.273	0.254
34	0.338	0.3	0.301
35	0.3	0.013	0.258
36	0.017	0.256	0.305
37	0.25	0.364	0.172
38	0.317	0.257	0.14

Ek-4 (devam)

İş Elemanı No	Birinci Veri Seti	İkinci Veri Seti	Üçüncü Veri Seti
39	0.163	0.162	0.293
40	0.322	0.047	0.307
41	0.25	0.233	0.305
42	0.252	0.232	0.02
43	0.155	0.291	0.186
44	0.358	0.132	0.239
45	0.003	0.158	0.053
46	0.273	0.08	0.302
47	0.14	0.023	0.203
48	0.313	0.351	0.176
49	0.202	0.038	0.336
50	0.205	0.255	0.146
51	0.088	0.035	0.211
52	0.256	0.123	0.301
53	0.063	0.164	0.333

Ek-5 Buxey test problemi için ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden önce gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
27	6.5	1	3.674	3.386	6.014
		2	4.306	3.109	3.466
		3	6.958	2.819	4.724
		4	6.038	5.02	5.312
		5	5.291	6.468	7.192
		6	1.646	3.869	1.752
		7	6.728	2.268	7.514
		8	3.024	4.728	2.976
		9	7.401	2.691	5.444
		10	4.179	4.354	1.288
		11	3.983	4.488	6.386
		12	3.441	2.604	5.288
		13	6.773	2.669	6.684
30	7	1	5.876	2.264	6.928
		2	5.028	3.327	2.664
		3	7.476	5.663	5.670
		4	1.646	3.869	1.752
		5	6.944	4.552	5.428
		6	2.066	2.663	5.858
		7	5.483	5.296	3.836
		8	2.025	1.425	6.900
		9	6.575	5.300	4.414
		10	6.225	6.405	8.595
		11	9.432	4.389	7.434
		12	6.408	4.354	8.734
33	8	1	8.646	3.624	7.712
		2	6.984	4.693	5.350
		3	3.178	4.274	1.434
		4	2.409	2.975	6.024
		5	6.944	4.552	5.428
		6	9.734	2.615	7.182
		7	7.759	6.346	6.638
		8	3.807	6.828	9.006
		9	7.771	4.872	6.760
		10	6.671	6.518	4.541
		11	3.045	2.748	8.369

Ek-5 (devam)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
36	8.5	1	8.554	3.848	8.812
		2	7.040	5.617	5.244
		3	4.815	4.800	9.165
		4	4.413	3.775	8.089
		5	6.521	6.123	4.691
		6	3.491	5.138	4.992
		7	7.856	5.500	6.084
		8	9.380	4.141	6.018
		9	4.669	3.522	7.082
		10	9.474	8.074	7.490
41	9	1	7.654	3.363	7.012
		2	5.184	5.375	5.886
		3	5.398	5.789	8.394
		4	8.967	6.814	7.544
		5	7.862	7.250	2.103
		6	9.605	8.520	6.549
		7	6.421	2.494	9.857
		8	10.937	3.871	9.252
		9	6.229	8.678	9.335
47	10	1	7.284	5.951	7.192
		2	10.088	5.704	10.942
		3	12.185	6.549	10.929
		4	12.051	5.042	9.408
		5	3.360	5.401	5.620
		6	6.917	6.141	8.752
		7	7.667	9.740	8.420
		8	10.416	6.828	8.142
54	11.4	1	11.028	5.491	11.184
		2	5.261	7.596	6.574
		3	17.126	4.715	12.348
		4	7.154	7.473	6.142
		5	11.209	9.234	12.576
		6	7.933	7.772	13.466
		7	12.648	9.282	7.311

Ek-6 Hahn test problemi için ergonomik kısıtlar modele dahil edilmeden önce gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Vasıflı-vasıfsız işçi modeline göre)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
2004	450	1	275.152	287.181	602.577
		2	516.259	420.207	263.869
		3	499.198	426.986	85.263
		4	488.616	407.500	378.179
		5	350.170	263.589	409.033
		6	118.444	451.884	245.784
		7	130.498	170.826	239.767
		8	211.713	379.365	295.656
2338	550	1	300.192	315.261	616.657
		2	514.465	426.579	273.317
		3	579.970	508.591	205.385
		4	337.833	387.057	434.334
		5	447.708	349.774	447.838
		6	172.841	455.135	281.421
		7	249.705	358.029	243.936
2806	650	1	482.220	387.127	818.349
		2	693.602	622.977	246.241
		3	677.489	443.388	380.984
		4	560.702	513.677	386.861
		5	139.940	591.160	401.236
		6	287.034	405.825	472.350
3507	850	1	468.962	378.289	824.614
		2	842.715	702.305	311.115
		3	662.201	680.649	402.319
		4	202.671	329.844	368.804
		5	410.487	699.944	637.659
4676	1000	1	751.197	713.867	778.054
		2	1200.260	942.815	513.947
		3	476.710	920.835	724.956
		4	737.099	626.757	863.903

Ek-7 Buxey test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri

C	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
27	1	24.180	25.220	14.820
	2	21.000	16.800	18.800
	3	31.200	24.700	16.640
	4	20.790	24.150	27.300
	5	26.500	31.000	21.750
	6	28.890	27.810	27.810
	7	20.800	27.040	22.100
	8	24.960	22.880	28.080
	9	16.560	22.320	21.600
	10	23.520	28.800	23.760
	11	18.460	25.480	16.380
	12	26.000	31.460	27.300
	13	22.410	20.790	30.510
30	1	27.900	29.100	17.100
	2	30.450	24.360	27.260
	3	32.400	25.650	17.280
	4	28.710	33.350	37.700
	5	30.740	35.960	25.230
	6	32.100	30.900	30.900
	7	24.000	31.200	25.500
	8	28.800	26.400	32.400
	9	20.700	27.900	27.000
	10	29.400	36.000	29.700
	11	21.300	29.400	18.900
33	1	29.760	31.040	18.240
	2	31.500	25.200	28.200
	3	39.600	31.350	21.120
	4	30.690	35.650	40.300
	5	34.980	40.920	28.710
	6	35.310	33.990	33.990
	7	26.400	34.320	28.050
	8	31.680	29.040	35.640
	9	22.770	30.690	29.700
	10	32.340	39.600	32.670

Ek-7 (devam)

C	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
36	1	31.620	32.980	19.380
	2	33.600	26.880	30.080
	3	36.000	28.500	19.200
	4	30.690	35.650	40.300
	5	36.040	42.160	29.580
	6	36.380	35.020	35.020
	7	27.200	35.360	28.900
	8	32.640	29.920	36.720
	9	21.390	28.830	27.900
	10	29.400	36.000	29.700
41	1	38.130	39.770	23.370
	2	43.050	34.440	38.540
	3	49.200	38.950	26.240
	4	40.590	47.150	53.300
	5	40.280	47.120	33.060
	6	42.800	41.200	41.200
	7	32.800	42.640	34.850
	8	39.360	36.080	44.280
47	1	41.850	43.650	25.650
	2	49.350	39.480	44.180
	3	55.200	43.700	29.440
	4	46.530	54.050	61.100
	5	49.820	58.280	40.890
	6	50.290	48.410	48.410
	7	36.000	46.800	38.250
54	1	50.220	52.380	50.220
	2	56.700	45.360	56.700
	3	64.800	51.300	64.800
	4	53.460	62.100	53.460
	5	57.240	66.960	57.240
	6	57.780	55.620	57.780

Ek-8 Hahn test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalara performans değerlerinin yansıtılmasıyla elde edilen istasyon süreleri

C	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin	İkinci Veri Seti İçin	Üçüncü Veri Seti İçin
2004	1	2453.220	2141.700	2005.410
	2	1608.020	1843.340	1451.140
	3	1634.640	2490.880	2374.120
	4	1541.280	1620.320	1995.760
	5	1913.670	2222.950	2010.320
	6	1229.240	1851.640	1633.800
	7	1229.900	1869.950	1079.300
	8	2047.320	1176.120	1481.040
2338	1	2302.020	2009.700	1881.810
	2	971.700	1113.900	876.900
	3	1949.640	2970.880	2831.620
	4	1808.040	1900.760	2341.180
	5	2271.060	2638.100	2385.760
	6	1698.500	2558.500	2257.500
	7	1892.380	2877.190	1660.660
2806	1	3506.580	3061.300	2866.490
	2	2291.900	2627.300	2068.300
	3	2331.840	3553.280	3386.720
	4	2160.600	2271.400	2797.700
	5	2732.400	3174.000	2870.400
	6	112.180	168.980	149.100
3507	1	4226.040	3689.400	3454.620
	2	2853.600	3271.200	2575.200
	3	2934.960	4472.320	4262.680
	4	2726.100	2865.900	3529.950
	5	200.970	233.450	211.120
4676	1	5889.240	5141.400	4814.220
	2	3834.320	4395.440	3460.240
	3	3927.840	5985.280	5704.720

Ek-9 Buxey test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Performans değerli işçi modeline göre)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
27	6.5	1	3.044	4.366	6.834
		2	5.180	1.720	4.640
		3	5.934	5.001	2.592
		4	5.152	3.227	4.256
		5	1.400	3.175	1.350
		6	5.305	4.303	4.960
		7	4.296	3.292	5.034
		8	2.698	2.712	5.851
		9	1.852	3.662	2.842
		10	8.148	2.610	6.114
		11	7.164	2.243	5.653
		12	4.624	5.118	5.410
		13	7.637	5.468	7.512
30	7	1	8.400	2.930	7.310
		2	5.848	3.771	6.544
		3	1.810	3.247	1.714
		4	2.655	3.669	6.426
		5	5.290	4.515	3.128
		6	6.944	4.552	5.428
		7	7.243	5.534	5.810
		8	9.432	4.389	7.434
		9	6.996	4.214	5.528
		10	2.280	4.010	7.660
		11	5.536	6.066	6.066
33	8	1	4.105	3.502	7.801
		2	6.110	4.780	7.700
		3	5.570	4.791	5.448
		4	7.432	3.367	7.306
		5	2.654	4.559	2.874
		6	6.073	5.305	6.254
		7	7.787	5.520	6.469
		8	9.375	5.271	5.834
		9	2.237	4.546	4.602
		10	11.091	5.256	8.760

Ek-9 (devam)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
36	8.5	1	8.554	3.848	8.812
		2	3.178	4.274	1.434
		3	6.944	4.552	5.428
		4	8.677	3.324	8.194
		5	6.630	5.545	4.880
		6	3.532	5.612	4.792
		7	3.898	3.036	5.664
		8	7.064	5.120	9.500
		9	7.887	5.678	6.836
		10	6.070	5.908	7.508
41	9	1	6.609	5.451	6.327
		2	9.475	5.042	10.079
		3	5.023	5.543	4.674
		4	5.999	7.640	8.370
		5	8.582	4.102	7.160
		6	5.428	7.502	4.638
		7	10.639	6.013	10.518
		8	10.679	5.604	11.282
47	10	1	10.874	4.573	9.682
		2	6.192	6.065	7.008
		3	7.284	5.951	7.192
		4	11.237	6.429	11.894
		5	7.157	9.282	9.428
		6	9.723	7.708	8.932
		7	9.967	6.889	8.912
54	11.4	1	12.880	5.674	14.134
		2	8.355	8.669	7.210
		3	8.796	8.214	8.270
		4	12.910	9.535	11.558
		5	11.273	8.179	10.734
		6	8.220	6.626	11.142

Ek-10 Hahn test problemi için Urban'ın modeliyle elde edilmiş atamalarda gerçekleşen enerji gereksinim düzeyleri (Performans değerli işçi modeline göre)

C	Enerji Düzeyi Üst Sınırı (kj)	İstasyon No	Birinci Veri Seti İçin (kj/sn)	İkinci Veri Seti İçin (kj/sn)	Üçüncü Veri Seti İçin (kj/sn)
2004	450	1	286.867	298.686	607.167
		2	506.630	397.778	231.691
		3	496.038	426.852	84.129
		4	483.549	390.321	383.751
		5	374.937	283.142	363.820
		6	79.356	440.348	239.624
		7	155.146	262.278	257.450
		8	136.956	181.678	253.944
2338	550	1	258.307	269.206	584.647
		2	257.338	147.576	278.642
		3	616.667	523.682	144.041
		4	476.794	444.147	432.594
		5	467.377	452.238	345.992
		6	209.744	572.160	320.526
		7	233.252	272.074	315.134
2806	650	1	482.220	387.127	818.349
		2	693.602	622.977	246.241
		3	433.370	501.124	636.091
		4	372.141	608.423	388.283
		5	536.158	536.440	313.726
		6	1.988	24.992	18.886
3507	850	1	618.692	649.650	413.372
		2	305.186	704.039	728.673
		3	623.660	593.332	817.753
		4	939.296	714.313	424.274
		5	32.645	19.749	37.504
4676	1000	1	768.134	789.840	942.684
		2	581.322	983.237	857.229
		3	1170.023	908.006	621.663

Ek-11 Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(Birinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Buxey (n=29)						
	27	30	33	36	41	47	54
Çevrim süresi	27	30	33	36	41	47	54
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	13	11	10	9	8	7	6
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10	9+1*	8	7	6
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11	10	9+1	8	7	6
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1	10+1*	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1*	9+1	8	7	6
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	2/13	4/11	3/10	2/10*	3/8	4/7	4/6
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	3/13	3/11	2/10	0/10*	3/8	2/7	2/6
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	1/4	1/4	0/4	0/4*	0/4	1/4	1/4

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılamamışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Ek-12 Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(İkinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Buxey (n=29)						
	27	30	33	36	41	47	54
Çevrim süresi	27	30	33	36	41	47	54
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	13	11	10	9	8	7	6
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	5/13	5/11	5/10	1/10	4/8	3/7	3/6
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	0/13	0/11	0/10	0/10	0/8	0/7	0/6
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/5	1/5	0/5	0/5	1/5	1/5	1/5

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılammışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Ek-13 Buxey test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(Üçüncü veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Buxey (n=29)						
	27	30	33	36	41	47	54
Çevrim süresi	27	30	33	36	41	47	54
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	13	11	10	9	8	7	6
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1*	9+1*	8	7	6
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	13	11	10	9+1*	8	7	6
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1*	10+1*	9+1*	8	7	6+1*
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	13	11+1	10+1	9+1	8+1	7+1	6+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	5/13	3/11	3/10	2/10	3/8	2/7	4/6
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	2/13	3/11	1/10	2/10	3/8	1/7	2/6
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	2/3

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılammışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Ek-14 Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(Birinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Hahn (n=53)				
	2004	2338	2806	3507	4676
Çevrim süresi	2004	2338	2806	3507	4676
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	8	7	5	5	3
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3+1
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3+1
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	2/8	0/7	1/6	1/5	1/3
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	3/8	1/7	1/6	1/5	1/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	2/7	2/7	1/7	0/7	1/7

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılammışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Ek-15 Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(İkinci veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Hahn (n=53)				
	2004	2338	2806	3507	4676
Çevrim süresi	2004	2338	2806	3507	4676
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	8	7	5	5	3
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8+1*	7	5+1	5	3+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8+1*	7	5+1	5	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8+1*	7	5+1	5	3+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8+1*	7+1*	5+1	5	3+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	3/8	4/7	3/6	2/5	2/3
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	0/8	1/7	0/6	0/5	0/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	1/8	1/8	1/8	2/8	5/8

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılammışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

Ek-16 Hahn test problemi için ergonomik kısıtların istasyon sayısına etkisi
(Üçüncü veri seti)

Problem adı ve iş elemanı sayısı (n)	Hahn (n=53)				
	2004	2338	2806	3507	4676
Çevrim süresi					
U-MHD'ye göre literatürdeki eniyi istasyon sayısı	8	7	5	5	3
Urban'ın modeline göre elde edilen istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Performans kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Enerji kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3
Uyumsuz iş elemanları kısıtı eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3+1
Performans ve enerji kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Performans ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1*	5	3+1
Performans, enerji ve uyumsuz iş elemanı kısıtları eklendiğinde istasyon sayısı	8	7	5+1	5	3+1
Urban'ın modeline göre, çevrim süresini aşan istasyon oranı	3/8	3/7	3/6	2/5	2/3
Urban'ın modeline göre, enerji düzeyini aşan istasyon oranı	1/8	1/7	1/6	0/5	0/3
Urban'ın modeline göre, Uyumsuz iş elemanı ihlali sayısı/Uyumsuz iş elemanı çifti sayısı	2/11	0/11	0/11	2/11	5/11

* Çözücü için zaman sınırı 1000 sn. olarak tanımlanmış ve bu süre içinde eniyi sonuca ulaşılammışsa süre sonunda elde edilen uygun çözüm kullanılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Banu GÜNER, 1977 yılında Polatlı'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Polatlı'da tamamladıktan sonra, Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2000 yılında Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. "U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar" başlıklı tez çalışması ile yüksek lisansını tamamladı. 2000 yılından beri Anadolu Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.