

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İŞGÖREN PERFORMANSI DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MONTAJ
HATLARININ DENGELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Kürşat ÖKSÜZ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İŞGÖREN PERFORMANSI DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MONTAJ
HATLARININ DENGELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Kürşat ÖKSÜZ

507121128

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule İtir SATOĞLU

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507121128 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Kürşat ÖKSÜZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İŞGÖREN PERFORMANSI DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Şule İtir SATOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Selçuk KILIÇ
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**

Savunma Tarihi : **22 Ocak 2015**

Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Montaj hatlarının endüstriyel sektörde kullanımının yaygınlaşması ve rekabetin giderek artmasıyla birlikte bu hatların etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasının önemi artmıştır. Montaj Hattı Dengeleme Problemi, üretim sektörü için büyük önem arz eden bir üretim planlama faaliyetidir. Üretimin çok miktarda, hızlı ve maliyeti minimize edecek şekilde gerçekleştirilebilmesi için montaj hattının tasarımı ve dengeleme çalışması belirleyici bir faktördür. Bu nedenle, 60 yıla yakın bir süredir Montaj Hattı Dengeleme Problemi araştırmacılar tarafından ele alınmış ve farklı çözüm yöntemleri önerilmiştir.

Montaj hattı dengeleme çalışmalarının büyük bir kısmında, işgörenlerin performansı dikkate alınmamakta, her işgörenin her işi yapabildiği ve iş öğelerinin işlem sürelerinin işgörenlerden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayımlar nedeniyle önerilen yöntemlerin gerçek hayatta uygulanabilmesi mümkün olamamaktadır.

İnsan faktörünün dikkate alınmadığı bir üretim sistemin etkin bir şekilde sürdürülebilmesi mümkün değildir. İşletmelerin elindeki en önemli kaynak olan işgücünü etkin bir şekilde kullanması gerekmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada işgörenlerin performansı dikkate alınarak tek modellen U-tipi montaj hatları için dengeleme çalışması yapılmıştır.

Çalışmalarım esnasında önerileri ile bana yol gösterip yardımlarını esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve güler yüzü ile çalışmama ışık tutan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şule İtir Satoğlu'na, modelin kodlanması sürecinde bana yardımcı olan arkadaşım Arş. Gör. E. Merve Elmas'a, bu süreçte manevi destekleri ile yanımda olan eşime ve aileme teşekkür ederim.

Aralık 2014

Mehmet Kürşat Öksüz
Endüstri Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ	5
2.1 Üretim Sistemleri ve Üretim Hatları	5
2.2 Montaj Hattı ve Hat Dengeleme Kavramı	6
2.3 Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	7
2.4 Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Genel Tanımlar ve Kavramlar.....	8
2.5 Montaj Hatlarının Dengelenmesindeki Amaç ve Kısıtlar	13
2.5.1 Amaç.....	13
2.5.2 Kısıtlar	13
2.5.2.1 Birincil kısıtlar	13
2.5.2.2 İkincil kısıtlar	14
2.6 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması	15
2.6.1 Model sayısına göre montaj hatları	15
2.6.1.1 Tek modelli	15
2.6.1.2 Karışık modelli	15
2.6.1.3 Çok modelli	15
2.6.2 Hattın yerleşim tipine göre montaj hatları	16
2.6.2.1 Düz / I tipi	16
2.6.2.2 U-tipi	16
2.6.2.3 Paralel	17
2.6.2.4 İki yönlü	17
2.6.3 Otomasyon düzeyine göre montaj hatları	17
2.6.3.1 Manuel	17
2.6.3.2 Otomatik.....	18
2.6.4 Kurulum sıklığına göre montaj hatları.....	18
2.6.4.1 İlk kez dengeleme	18
2.6.4.2 Yeniden dengeleme.....	18
2.7 Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması.....	19
2.7.1 Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	19
2.7.2 Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi	20
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	21
3.1 Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	22
3.2 Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi	30
3.2.1 U-tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi	33
3.2.2 İşgören faktörü dikkate alınarak Montaj Hatlarının Dengelenmesi	39
3.3 Literatürün Analizi	42
3.3.1 Yıllara göre MHDP çalışmaları.....	42

3.3.2. Hattın yerleşim tipine göre MHDP çalışmaları	42
3.3.3 Çözüm yöntemine göre MHDP çalışmaları	43
3.3.4 Önerilen yöntemin türüne göre MHDP çalışmaları	45
4. İNSAN FAKTÖRÜ DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MHD.....	47
4.1 İşgören Performansı Dikkate Alınarak Montaj Hattı Dengeleme	48
4.2 Matematiksel Model.....	49
4.2.1 Amaç fonksiyonu	51
4.2.2 Kısıtlar	51
5. UYGULAMA ÇALIŞMASI.....	55
5.1 Test Problemi-1	55
5.1.1 Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli	56
5.1.2 Sonuçlar	58
5.1.3 İşgören performansı dikkate alınmadan MHD	60
5.1.4 Sonuçlar ve Karşılaştırma.....	62
5.2 Test Problemi-2.....	63
5.2.1 Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli	64
5.2.2 Sonuçlar	66
5.2.3 İşgören performansı dikkate alınmadan MHD	69
5.2.4 Sonuçlar ve Karşılaştırma.....	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
6.1 Sonuçlar	73
6.2 Öneriler.....	74
6.3 Gelecekteki Çalışmalar	75
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BARON	: Branch-And-Reduce Optimization Navigator
BMHDP	: Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
GAMS	: General Algebraic Modeling System
GMHDP	: Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi
KKO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
MHD	: Montaj Hattı Dengeleme
MHDP	: Montaj Hattı Dengeleme Problemi
SALBP	: Simple Assembly Line Balancing Problem
TZÜ	: Tam Zamanında Üretim
UALBP	: U-shaped Assembly Line Balancing Problem

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Öncelik matrisi	10
Çizelge 3.1 : U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi-Literatür	33
Çizelge 5.1 : Test1-İşgörenlerin performans katsayıları	55
Çizelge 5.2 : Test1-İş ögesi-işgören-istasyon atama sonuçları.....	59
Çizelge 5.3 : Test1-İş ögesi-istasyon atama sonuçları.....	62
Çizelge 5.4 : Test1-Durum1 ve Durum2 performans göstergeleri.....	62
Çizelge 5.5 : Test2-İşgörenlerin performans katsayıları	63
Çizelge 5.6 : Test2-İş ögesi-işgören-istasyon atama sonuçları.....	67
Çizelge 5.7 : Test2-İş ögesi-istasyon atama sonuçları.....	70
Çizelge 5.8 : Test2-Durum1 ve Durum2 performans göstergeleri.....	71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Seri üretim sistemleri.....	6
Şekil 2.2 : Öncelik diyagramı.....	10
Şekil 3.1 : Yıllara göre MHDP çalışmaları.....	42
Şekil 3.2 : Hattın yerleşim tipine göre MHDP çalışmaları.....	43
Şekil 3.3 : Çözüm yöntemine göre MHDP çalışmaları.....	44
Şekil 3.4 : Önerilen yöntemin türüne göre MHDP çalışmaları.....	45
Şekil 5.1 : 5 iş ögesi için öncelik diyagramı.....	55
Şekil 5.2 : Birleştirilmiş (orijinal ve hayali) öncelik diyagramı.....	57
Şekil 5.3 : Test1-Montaj hattının yerleşimi.....	59
Şekil 5.4 : 9 iş ögesi için öncelik diyagramı.....	63
Şekil 5.5 : Birleştirilmiş (orijinal ve hayali) öncelik diyagramı.....	65
Şekil 5.6 : Test2-Montaj hattının yerleşimi.....	67

İŞGÖREN PERFORMANSI DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ

ÖZET

Montaj hatları seri üretim sistemlerinde çok miktarda, hızlı ve yüksek kalitede üretim gerçekleştirmek için kullanılan en önemli üretim araçlarından biridir. Günümüz rekabet koşullarında, montaj hatlarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasının önemi giderek artmıştır. Bu nedenle, işgücü, malzeme, donanım ve diğer girdilerin işletmenin amaçları doğrultusunda ne kadar etkili ve yeterli kullanıldığı belirleyici bir unsurdur.

İşletmeler için en önemli üretim planlama faaliyetlerinden biri Montaj Hattı Dengeleme çalışmasıdır. Bu konu hakkında, araştırmacılar tarafından çok sayıda çalışma yapılmış ve farklı çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bir montaj hattının ilk kurulumu ya da yeniden tasarlanması yüksek miktarda yatırım gerektirdiğinden, hattın yerleşim planı karar vericiler için büyük öneme sahiptir. Endüstrileşme sürecinde, Tam Zamanında Üretim (Just in Time) ilkesinin uygulanmasıyla birlikte U-tipi hat yerleşimi yaygınlaşmış ve birçok avantajından dolayı bu hatların kullanımı giderek artmıştır.

Montaj Hattı Dengeleme (MHD) çalışmalarının çoğunda problemin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla birçok varsayım yapılmaktadır. Bu varsayımlardan en önemlisi ve dikkate alınması gereken faktör işgörenlerdir. Klasik MHD çalışmalarında, her işgörenin her işi gerçekleştirebildiği ve iş öğelerinin işlem sürelerinin işgörenlerden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, literatürdeki birçok çalışmanın gerçek hayata uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla iş öğelerinin işlem sürelerinin işgörenlerin performansından bağımsız olmadığı bir matematiksel model önerilmiştir. Bu modelde deneyimsiz ve dezavantajlı işgörenler de dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın özgün yönü, literatürde işgören performansı dikkate alınarak istasyon sayısının ve işgören atamasının eş zamanlı olarak optimize edildiği ilk çalışma olmasıdır.

Bu çalışmada, işgören performansı dikkate alınarak tek modellenmiş U-tipi Montaj Hattı Dengeleme çalışması yapılmıştır. Amaç, belirli bir çevrim süresi için, eş zamanlı olarak istasyon sayısının minimize edilmesi ve işgörenlerin optimum şekilde istasyonlara atanmasını sağlamaktır. Böylelikle, işgörenlerden ve istasyonlardan optimum faydayı elde etmek, dolayısıyla maliyetleri azaltmak hedeflenmiştir. Bu amaçla, Urban'ın (1998) U-tipi montaj hatları için önerdiği Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli temel alınarak yeni bir Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli geliştirilmiştir. Bu modelde, literatürde olmayan bazı kısıtlar modele dâhil edilmiş ve bazı kısıtlarda işgören performansı dikkate alınarak değişiklikler yapılmıştır.

Önerilen model, GAMS (General Algebraic Modeling System) modelleme sisteminin BARON (Branch-And-Reduce Optimization Navigator) çözücüsü kullanılarak iki örnek problem için test edilmiş ve sonuçlar işgören performansının dikkate alınmadığı durum ile karşılaştırılmıştır. Uygulama çalışmasından elde edilen sonuçlar, işgören faktörünün dikkate alındığı durumda daha iyi bir hat dengesinin elde edilebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, önerilen model işgören performansının dikkate alınmadığı duruma göre daima daha az sayıda istasyon kurmayı garanti etmemektedir. Bu model ile optimum ve sürdürülebilir bir hat dengesinin elde edilebileceği ifade edilmektedir.

Anahtar kelimeler: U-tipi Montaj Hattı Dengeleme, işgören performansı, Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli

BALANCING U-SHAPED ASSEMBLY LINES BY CONSIDERING WORKER PERFORMANCE

SUMMARY

Assembly lines are flow-oriented mass production systems where the productive units or stations perform the operations. An assembly line consists of a sequence of m stations through which the product units proceed. Each station performs a subset of the n operations necessary for manufacturing the products. Assembly lines have been used for faster, cheaper, more quality and more production in industrial systems. Therefore, assembly line balancing is a very important production planning activity for the production systems.

The design of an assembly line requires tasks to be grouped into stations such that the precedence relations among the tasks are satisfied and some performance measures are optimized. This problem is known as Assembly Line Balancing Problem (ALBP). Generally, in ALBP studies, there are a lot of assumptions for simplifying the solution of the problem. As a result of several simplifying assumptions, this problem was called Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) (Baybars, 1986).

Traditionally assembly lines are arranged in a straight line. However, the implementation of Lean Manufacturing and Just in Time Production (JIT) systems entail U-shaped assembly line (Chiang, 2006). The associated line balancing problem is called UALBP, which was introduced by Miltenburg and Wijngaard (1994). Compared to traditional straight lines and parallel lines, U-shaped assembly lines have lots of advantages in terms of performance of workers and production system. Especially, by means of U-shaped layout, improved balancing of assembly lines can be achieved (Scholl and Klein, 1999). This is due to the fact that precedence constraints of the U-shaped lines are more relaxed than those of the straight lines, such that, a task can share a station with any of its predecessors and/or any of its successors (Scholl and Klein, 1999). This provides solution of the problem with a better line efficiency and lower line imbalance.

The implementation of Lean Manufacturing systems entail U-shaped assembly lines, since one-piece flow can be implemented by this type of facility layout (Satoğlu et al., 2010). Due to high capital requirements when installing or redesigning a line, its configuration planning is of great relevance for practitioners. Cheng et al., (2000) proposed the following factors that enhanced the wider acceptance of U-shaped lines:

- U-shaped line is preferred to a straight line because of its volume flexibility. By increasing or decreasing the number of operators on the line, a company can adjust the production rate as required. This level of volume flexibility is harder to obtain with a straight line. Besides, since walking distance is shorter in a U-shaped than on a straight line, it is easier for an operator to oversee several workstations.

- Another advantage of U-shaped line is that the number of workstations required is never more than that required by a straight line (Scholl and Klein, 1999). There are more possibilities for grouping tasks into workstations on a U-line. Moreover, a U-line eliminates the need for special material-handling equipment such as conveyors and other special material-handling operators that are necessary in straight line. Instead, production operators move products from machine to machine.
- Moreover, U-shaped lines offer organizational and social advantages. The operators are expected to become multi-skilled and they are able to manage several tasks, which provides job-enrichment. This prevents the daily activities of the operators from becoming routine. Since the operators can see the end product, they are motivated to achieve a higher quality level (Scholl and Klein, 1999). Moreover, a better visibility, communication and teamwork can be achieved by means of the U-shaped lines. This facilitates a sense of belonging, and increases responsibility and ownership compared to a straight line.

For solving the UALBP, Miltenburg and Wijngaard (1994) employed a dynamic programming formulation to solve small problems with up to 11 tasks and proposed a heuristic to solve larger problems. Urban (1998) presented an integer linear programming formulation to solve small to medium sized U-line balancing problems with up to 45 tasks by using standard mathematical programming software CPLEX. Scholl and Klein (1999) developed a branch and bound procedure called ULINO to solve problems with up to 297 tasks. Becker and Scholl (2006) extended the problem by integrating practical and relevant aspects, like parallel lines or processing alternatives. In spite of these efforts, there is a wide gap between the academic discussion and practical applications (Boysen et al., 2007).

An important issue in U-shaped assembly line balancing problem is the consideration of human factors. Since U-shaped lines are concerned with manual assembly operations, human factor plays a major role in production systems. However, there is a limited literature on human factors in line balancing. These are;

- Ergonomic aspects such as physical effort of operators and the risks that they face (Choi, 2009; Otto and Scholl, 2011; Xu et al., 2012),
- Learning effect (Costa and Miralles, 2009; Toksari et al., 2008; 2010),
- Fatigue (Digiesi et al., 2009) and
- Workers' skills (Miralles et al., 2007, 2008; Wong et al., 2006).

Worker performance must be considered in line balancing, because as a worker becomes more experienced in performing a specific task, in other words his/her cumulative production quantity increases, his/her task time per one piece of product decreases in a non-linear sense. Therefore, task times are not independent from workers' performance. Another fact is, that every worker cannot perform every task at the same processing time. In addition, every worker cannot be able to perform every task in production systems. These facts can significantly cause actual task times differ from the preassumed standard times. However, most researchers assumed that the time of task is independent from workers performance.

In this study, a Nonlinear Integer Programming Model that intends to assign tasks to the operators of a U-shaped assembly line is developed. Thus, the worker performance that is a significant human factor was reflected to the U-shaped Assembly Line Balancing Problem (UALBP). This is a unique aspect of this study. To the best of the author's knowledge, there is no past study that considers simultaneously both minimization number of workstation and optimization of worker assignment while balancing the single model U-shaped assembly lines.

The thesis is organized as follows: First, assembly lines and line balancing problem are explained. Then, a detailed literature research is conducted. The proposed mathematical model is explained in section 4 and computational experiments are conducted in section 5. The study is completed with a conclusion, suggestions and further research.

Keywords: U-shaped Assembly Line Balacing, worker performance, Nonlinear Integer Programming Model

1. GİRİŞ

Montaj hatları, toplam iş yükünün anlamlı iş parçalarına ayrılıp bu parçalar üzerindeki işlemlerin işgücü ve donanımdan yararlanılarak bir hat boyunca transfer edildiği üretim sistemleridir (Tanyaş ve Baskak, 2006). İş öğelerinin istasyonlar arasındaki transferi genellikle bir bant veya konveyör gibi malzeme taşıma ekipmanları ile gerçekleştirilir. Montajı yapılan ürün, tüm istasyonlardan geçerek hat boyunca ilerler ve montajı tamamlanmış nihai ürün olarak hattı terkeder.

İngiltere’de başlayan sanayi devrimi ile birlikte üretim sektöründe yaşanan gelişmeler ürünlerin hızlı ve istenen kalitede üretilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak üretimde yeni teknik ve teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Montaj hatları ilk defa 20. yüzyılın başlarında ABD’de Henry Ford ve arkadaşları tarafından “Model T” adı verilen otomobili üretmek için kullanılmaya başlanmıştır (Miltenburg ve Wijngaard, 1994). Montaj hatları kullanılmadan önce bir işgören montajın tümünden sorumluydu. Bu nedenle bir ürünün üretimi çok fazla zaman almaktaydı. İş yükünün parçalara ayrılmasıyla birlikte iş öğeleri gruplandırılmış ve her işgörenin montajın sadece bir bölümünden sorumlu olması sağlanmıştır. Montaj hattında seri üretime geçilmesiyle birlikte, üretim hızı son derece artmış, istenen kalitede ve miktarda ürünlerin üretilmesi olanağı doğmuştur (Miltenburg ve Wijngaard, 1994).

Montaj hatlarının endüstriyel sektörde kullanımının yaygınlaşması ve rekabetin giderek artmasıyla birlikte bu hatların etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasının önemi artmıştır. Bunun bir sonucu olarak montaj hattı dengeleme çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Montaj Hattı Dengeleme Problemi ilk olarak Salveson tarafından 1955 yılında ortaya atılmıştır. Günümüze kadar, birçok araştırmacı tarafından Montaj Hattı Dengeleme Problemi ele alınmış ve çok sayıda çözüm yöntemi önerilmiştir. Tüm bu çalışmalara rağmen, akademik araştırmalar ile pratik uygulamalar arasında büyük bir uçurum vardır (Boysen ve diğ., 2007).

Montaj Hattı Dengeleme Problemi, üretim sektörü için büyük önem arz eden bir üretim planlama faaliyetidir. Seri üretim sistemlerinin önem kazanması ile montaj hatlarının kullanımı da artmıştır. Üretimin çok miktarda, hızlı ve maliyeti minimize edecek şekilde gerçekleştirilebilmesi için montaj hattının tasarımı ve dengeleme çalışması belirleyici bir faktördür. Tam Zamanında Üretim ilkesinin uygulandığı sistemlerde ise birçok avantajından dolayı U-tipi hatlara geçiş olmuştur (Miltenburg ve Wijngaard, 1994). U-tipi montaj hatlarındaki esneklik ile değişen üretim koşullarına uyumun sağlanması kolaylaşmaktadır. Bu hatlarda, işgören sayısında artış veya azalış yapılarak üretim hızı istenen seviyede tutulabilmektedir. Ayrıca, U-tipi hatlarla düz hatlara kıyasla daha az sayıda istasyon ile montaj hattını dengelemek mümkündür (Scholl ve Klein, 1999). Bu ve birçok avantajından dolayı U-tipi hatların kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

Montaj Hattı Dengeleme (MHD) çalışmalarının çoğunda problemin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla birçok varsayım yapılmaktadır. Bu varsayımlardan en önemlisi ve dikkate alınması gereken faktör işgörenlerdir. Klasik MHD çalışmalarında, her işgörenin her işi gerçekleştirebildiği ve işgörenlerin işleri aynı sürelerde gerçekleştirdiği varsayımı yapılmaktadır. Bu nedenle, literatürdeki birçok çalışmanın gerçek hayata uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır.

Manuel veya yarı otomatik bir montaj hattında dengeleme çalışması yapılırken insan faktörü göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde, insan faktörü dikkate alınarak montaj hattı dengeleme çalışmalarının sayısı oldukça azdır. Bu faktörlerden bazıları; öğrenme etkisi, yorgunluk, operatörlerin fiziksel gücü ve karşılaştıkları risklerdir.

Bu çalışmada, işgörenlerin performansı dikkate alınarak montaj hattı dengeleme çalışması yapılmıştır. Bu yaklaşım, tek modelli U-tipi montaj hatları için uygulanmıştır. Belirli bir çevrim süresi için, eş zamanlı olarak istasyon sayısının minimize edilmesi ve işgörenlerin optimum şekilde istasyonlara atanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Urban'ın (1998) U-tipi montaj hatları için önerdiği Tamsayı Doğrusal Programlama Modeli temel alınarak yeni bir Doğrusal Olmayan Tamsayı Programlama Modeli geliştirilmiştir. Bu modelde, literatürde olmayan bazı kısıtlar modele dâhil edilmiş ve bazı kısıtlarda işgören performansı dikkate alınarak değişiklikler yapılmıştır. Daha sonra, bu model GAMS (General Algebraic Modeling System) modelleme sisteminin BARON (Branch-And-Reduce Optimization

Navigator) çözücüsü kullanılarak iki test problemi için çözülmüş ve sonuçlar işgören performansının dikkate alınmadığı durum ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde genel bir giriş yapılmış, ikinci bölümde ise montaj hattı, hat dengeleme kavramları ve Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, montaj hatları ile alakalı ayrıntılı bir literatür araştırması yapılmıştır. Daha sonra, literatür çalışması belirli faktörlere göre analiz edilmiştir. Dördüncü bölümde, işgören performansı dikkate alınarak U-tipi MHDP için geliştirilen matematiksel model açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise önerilen model iki örnek problem üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çeşitli performans faktörleri için değerlendirilmiş ve klasik durumla karşılaştırılmıştır. Son olarak, sonuçlar ve öneriler ifade edilmiş, gelecekteki çalışmalara değinilmiştir.

2. MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ

2.1 Üretim Sistemleri ve Üretim Hatları

Üretim, ekonomik değeri olan mal veya hizmetlerin oluşturulmasını sağlayan faaliyetler bütünü olarak tanımlanabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006). Üretim kavramını tek bir tanımla ifade etmek yeterli değildir. Farklı bilim dalları için üretim kavramı farklı anlamlar taşıyabilir. Ekonomistler, üretimi ekonomik yönüyle ele alırken eğitimciler ise kattıkları değer olarak düşünürler. Üretim sadece fiziksel bir çıktı olmayabilir, aynı zamanda ulaşım, sağlık, eğitim gibi hizmet üreten sistemler de topluma değer kattıkları için bir üretim faaliyeti olarak değerlendirilebilir.

Üretim sistemleri, belli bir amaç doğrultusunda girdiler ve çıktıları olan ve belirli süreçlerden oluşan öğeler topluluğudur. Mühendislik bilimi bakış açısıyla üretim sistemleri “hammadde ve/veya yarı mamullerin belirli faaliyetler sonucunda nihai ürüne dönüştüğü sistemler” olarak tanımlanabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

Üretim sistemlerini, üretim miktarına ve ürün çeşidine göre üç ana sınıfa ayırmak mümkündür. Bunlar; Sipariş Tipi Üretim, Parti Tipi Üretim ve Seri (Akış) Tipi Üretim sistemleridir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

Sipariş Tipi Üretim: Az sayıda ürünün tek seferde veya belirli/belirsiz aralıklarla üretildiği üretim sistemleridir. Ürün miktarı düşük, ürün çeşitliliği fazladır. Sipariş tipi üretim, proje tipi üretim olarak da adlandırılmaktadır. Bu üretim sisteminde, çok işlevli tezgâhlar kullanılır. Üretim yapısı esnek olduğu için nitelikli elemanlara ihtiyaç duyulur. Tezgâhların yerleştirilmesi, aynı işlemleri tezgâhların gruplanarak belirli alanlarda toplanmasıyla sağlanır. Bu nedenle iş akışları karmaşıktır (Tanyaş ve Baskak, 2006).

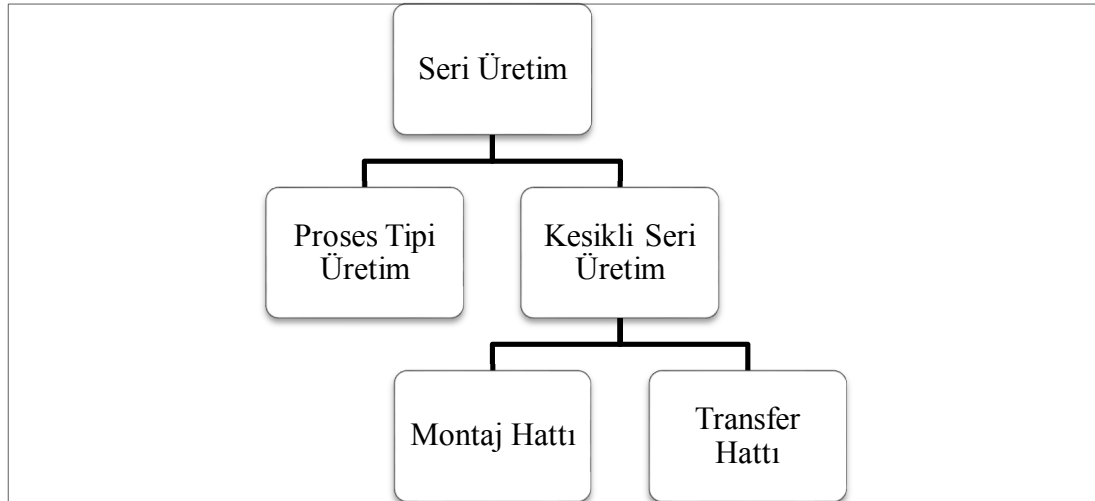
Parti Tipi Üretim: Benzer veya aynı cins ürünlerin sınırlı miktarlarda belirli/belirsiz zaman aralıklarında partiler halinde üretimidir. Bu üretim tipinde, her partide aynı ürün üretildiği için üretim hattı sıra ile farklı ürünlere ayrılmıştır. Parti hacmi büyüdükçe parti halinde üretimden kitle (seri) üretime geçiş söz konusu olmaktadır. Parti

üretiminde, malzeme taşıma ve hazırlık sürelerinin yüksek olması verimliliği azaltan faktörlerdir. U-tipi hücreli üretim sistemlerinde parti tipi üretim yapılmaktadır.

Seri (Akış Tipi) Üretim: Talebin fazla ürün çeşitliliğinin az olduğu yüksek miktarlarda üretimin yapıldığı üretim sistemleridir. Bu tip sistemlerde, maliyeti yüksek özelleşmiş donanımlarla üretim hatları kurulur. Böylelikle, üretimin hızlı olması ve yüksek miktarlarla gerçekleştirilmesi sağlanır. Seri üretim tipinde üretim hattı üretilecek ürüne göre tasarlanır. Bu sistemlerde üretim planlama çok önemlidir. Üretim hatlarının iyi dengelenmiş olması ise verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır (Tanyaş ve Baskak, 2006).

Seri üretim, proses tipi üretim ve kesikli üretim olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Proses tipi üretimde, işlenen hammadde ve ürünler doğal yapılarında dolayı üretim hattı boyunca kendiliğinden akar. Örneğin; çimento, şeker, gıda maddeleri vb. Kesikli seri üretimde ise, ürünler tek tek birimler halinde birbirini izleyen iş istasyonlarındaki gerekli iş öğelerinin yapılmasıyla oluşur (Tanyaş ve Baskak, 2006).

Kesikli seri üretim sistemleri ise kendi içinde transfer hattı ve montaj hattı olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.1’de seri üretim sistemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Seri üretim sistemleri.

2.2 Montaj Hattı ve Hat Dengeleme Kavramı

Malzemelerin, akış hattı boyunca işgücü veya donanımdan yararlanılarak transfer edildiği ve parça üzerindeki işlemlerin aralarındaki öncelik ilişkileri ve çevrim süresi

gibi kısıtlar dikkate alınarak birleştirilmesiyle oluşturulan istasyonların, bir hat boyunca sıralanmalarıyla oluşan sisteme **montaj hattı** denir (Tanyaş ve Baskak, 2006). Montajı yapılan ürün, tüm istasyonlardan geçerek hat boyunca ilerler ve montajı tamamlanmış olarak hattı terk eder.

Montaj hatlarında malzeme manuel sistemlerde işgücü yardımıyla işlenir. İşgörenler istasyonlara sürekli olarak meşgul olacak şekilde atanmaya çalışılır. Her istasyonda her bir işgören, iş ögeleri üzerinde kendi istasyonuna atanmış işlemleri gerçekleştirir, daha sonra bu istasyondan çıkan ürün bir sonraki işlemler için izleyen istasyona geçirilir, hemen ardından da bir önceki istasyondan yeni iş ögeleri gelir (Askin ve Standridge, 1993). Bu işlemler, istenen sayıda ürün elde edilene kadar sürdürülür.

Montaj hatları tasarlanırken, belirli bir çevrim süresi ve iş akışı için her bir istasyondaki boş sürenin en aza indirilmesi yani hattın maksimum verim elde edilmesi amaçlanır. İstasyonların dengeli bir şekilde kurulması işgörenden etkin bir şekilde yararlanılmasını da sağlamaktadır. Bu nedenle, montaj hattının dengelenmesi işletmeler için son derece önemli bir problemidir.

2.3 Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj Hattı Dengeleme Problemi, yapılması gerekli olan iş ögeleri ve bu iş ögelerinin süreleri belirlendikten sonra, iş ögeleri arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak, iş ögelerinin bir veya birden fazla performans ölçütünü optimize edecek şekilde sıralı iş istasyonlarına atanması problemidir (Scholl ve Klein, 1999).

Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP), üretim hızının belirlenmesi ve kaynakların verimli kullanılmasına yönelik bir problem olması nedeniyle üretim sektörü için büyük önem taşımaktadır. Tüm istasyonlardaki işlem sürelerinin çevrim süresi kadar olduğu montaj hattı ulaşılabilecek en mükemmel dengededir. Dengelenmemiş bir montaj hattında, istasyonlardaki boş süreler fazla, işgörenlerden yararlanma seviyesi düşük olmaktadır. Üretim miktarı arttıkça kapasite kullanım oranı ciddi bir şekilde azalır ve bu da işletme için ekstra maliyetlere sebep olur. Ayrıca, üretim kapasitesi etkin bir şekilde kullanılmadığı için ürünlerin tedarik süresi uzar ve bu da müşteri memnuniyetsizliğine neden olur.

Günümüzde, üretim miktarları ve rekabet arttığından kaynakları verimli kullanarak taleplere zamanında karşılık vermek üretim hatlarının tasarlanması ve dengelenmesinin önemini arttırmaktadır.

2.4 Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Genel Tanımlar ve Kavramlar

Bir montaj hattı m adet istasyon ve n adet iş ögesinden oluşan, her bir istasyondan sorumlu bir işgörenin olduğu bir üretim sistemidir. İstasyonlar arasındaki bağlantı genellikle taşıma bandı veya mekanik bir malzeme taşıma ekipmanı ile sağlanır. Montaj hattında iş ögeleri bir istasyondan diğerine ardışık olarak taşınır. Her bir istasyonda, montajı yapılacak iş ögeleri belirli bir çevrim süresinde tekrar tekrar işlem görerek gerçekleştirilir. Bu iş ögelerinin aralarındaki öncelik ilişkisi göz önünde bulundurularak, verilen çevrim süresini aşmadan ve bazı performans ölçütlerini optimize edecek şekilde hangi istasyonda hangi iş ögesi veya iş ögelerinin işlem göreceğinin kararı Montaj Hattı Dengeleme Problemi'dir. Yüksek miktarlarda standartlaşmış ürünlerin üretildiği endüstriyel işletmelerde montaj hattının dengelenmesi önemli bir üretim planlama problemidir. Bu tür sistemlerde bir ürünün çevrim süresindeki az miktarda azalma veya artma üretim miktarı arttıkça sistemin verimliliğinde önemli seviyede değişikliklere sebep olmaktadır. Bu nedenle, montaj hattının dengelenmesi üretim planlamacılar veya karar vericiler için büyük bir öneme sahiptir.

MHDP'de kullanılan birçok tanım ve kavram vardır, bunlara bu bölümde değinilecektir.

İş Ögesi: Montaj sürecinde toplam iş yükünün mantıksal olarak bölünmüş bir parçasıdır. İş ögesi bazı tanımlarda bölünemeyen en küçük iş parçası olarak ifade edilir; fakat bazen mantıksal olarak birden fazla en küçük iş parçası da bir iş ögesi olarak tanımlanabilir. Örneğin; bir parçaya üç adet vida takmayı gerektiren bir iş grubunun her bir vidalama işi için üç ayrı iş ögesine ayrılması mantıklı bir yaklaşım değildir. Bu iş grubunun bir iş ögesi olarak belirlenmesi makul olan yaklaşımdır. Bir iş ögesinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan süre ise **İş ögesi işlem süresi** olarak adlandırılır. İş ögesi genellikle "i" harfi ile sembolize edilir. İş ögesi işlem süresi ise t_i sembolü ile gösterilir.

İş İstasyonu: Montaj hattında, bir veya birden fazla iş ögesinin gerçekleştirildiği hattın her bir bölümüne iş istasyonu denir. İş istasyonlarındaki iş ögeleri genellikle işgörenler tarafından gerçekleştirilir. Otomatik olarak gerçekleştirilen istasyonlarda ise işgücü kullanımı düşüktür.

İş İstasyonu Süresi: Bir istasyondaki iş içeriği, **İş yükü** olarak adlandırılır. İş yükünü gerçekleştirmek için gerekli olan süre ise İş istasyonu süresi olarak adlandırılır.

Çevrim Süresi: Çevrim süresi (cycle time), montaj hattında ürünün bir istasyonda kalabileceği en büyük süre veya bir iş istasyonundaki işgörenin o istasyonda yapılması gerekli olan işleri tamamlaması için gerekli süre olarak tanımlanabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006). Çevrim süresi, bir ürünün montaj hattından çıkması gereken süre olarak düşünülebilir. Bu nedenle, çevrim süresi aynı zamanda üretim hızıdır. Belli bir sürede üretilmesi istenen ürün miktarı, çevrim süresine bağlıdır.

C: Çevrim süresi.

T: Kullanılabilir üretim süresi.

ÜS: Üretilmek istenen ürün sayısı

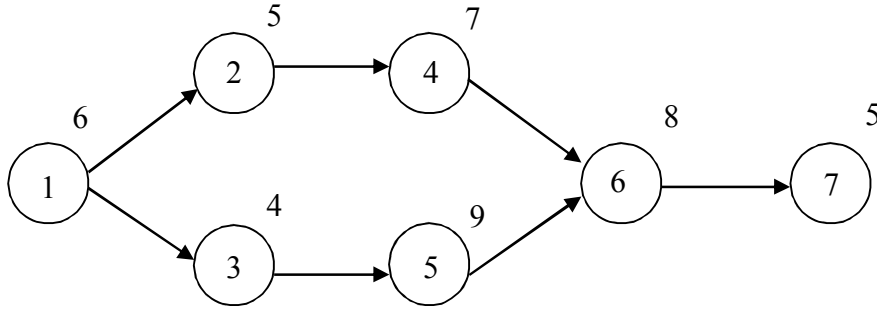
olmak üzere çevrim süresi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$C = T / \text{ÜS}$$

İş İstasyonu boş süresi: Çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki pozitif fark, o istasyonun boş süresini (âtıl süre) gösterir. Belirlenen çevrim süresinden daha az bir sürede iş ögelerinin gerçekleştirildiği bir istasyonda, boş süre kadar işgörenden yararlanılamaz ve üretim kapasitesi tam verimle kullanılamaz.

Öncelik Diyagramı: İş ögeleri arasındaki öncüllük ve ardılık ilişkilerinin düğümler ve oklarla gösterildiği ağ diyagramına öncelik diyagramı denir. Düğümlerin sağ üst köşesindeki rakamlar ise ilgili iş ögesinin süresini ifade eder. Öncelik diyagramında, her bir düğüm bir iş ögesini; oklar ise iş ögeleri arasındaki öncüllük ve ardılık ilişkilerini gösterir. Öncelik diyagramında, okların sağ tarafındaki işler okların sol tarafındaki işler yani öncülleri tamamlanmadan gerçekleştirilemez. Başka bir ifadeyle, bir işin ardıllarının gerçekleştirilebilmesi için o işin öncüllerinin tamamlanmış olması gerekir. Öncelik diyagramı, montaj hattındaki iş ögelerini ve iş ögeleri arasındaki öncelik ilişkilerini görsel bir şekilde ifade ettiği için kolaylaştırıcı bir diyagramdır.

Şekil 2.2’de 7 iş öğeli bir montaj hattı için oluşturulan öncelik diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.2 : Öncelik Diyagramı.

Öncelik Matrisi: İş öğeleri arasındaki ilişki öncelik diyagramı ile gösterilebildiği gibi öncelik matrisi oluşturularak da ifade edilebilir. Bu matriste, iş ögesinin numarasının olduğu satırla, ardılı olan iş ögesinin numarasının olduğu sütunun kesiştiği hücreye 1, diğer hücrelere 0 rakamı konur. Şekil 2.2’de gösterilen öncelik diyagramı için oluşturulan öncelik matrisi Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Öncelik Matrisi.

	Ardıl İş Öğeleri							
		1	2	3	4	5	6	7
Öncül İş Öğeleri	1	-	1	1	1	1	1	1
	2		-	0	1	0	1	1
	3			-	0	1	1	1
	4				-	0	1	1
	5					-	1	1
	6						-	1
	7							-

Esneklik Oranı: Bir montaj sürecinin öncelik yapısının belirlenmesinde kullanılan bir ölçüttür.

E: Esneklik oranı

Y: Öncelik matrisinde sıfır (0) değerine sahip göz sayısı

N: Toplam iş ögesi sayısı

olmak üzere esneklik oranı şu şekilde yazılabilir (Dar-el, 1973):

$$E = (2*Y) / [N*(N-1)] \quad (2.1)$$

Bu oran, öncelik diyagramı seri şekilde sıralıysa sıfıra (0), öncelik ilişkileri olmayan diyagramlar için ise 1'e eşittir. E oranının sıfıra yakın olması, istasyonlara iş ögesi atamada esnekliğin az olduğunu göstermektedir.

Yukarıda örneği verilen öncelik matrisi için esneklik oranı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = (2*4) / [7*(7-1)] = 8/42 = 0.19$$

Gerekli Olan En Az İş İstasyonu Sayısı: Tüm iş ögelerinin çevrim süresini aşmamak koşulu ile istasyonlara atanması durumunda gereksinim duyulan en az istasyon sayısıdır. Bu istasyon sayısını belirlemek için literatürde çeşitli yöntemler vardır. Urban (1998), bir U-tipi montaj hattı için gerekli olan en az istasyon sayısını şu şekilde ifade etmiştir.

$m_{\min}$: Gerekli olan en az iş istasyonu sayısı

n : Toplam iş ögesi sayısı

C : Çevrim süresi

t_i : i. iş ögesinin işlem süresi olmak üzere;

$$m_{\min} = \left[\sum_{i=1}^n t_i / C \right]^+ \quad (2.2)$$

Bu ifadedeki $[x]^+$; x'e eşit ya da x'ten büyük en küçük tamsayı değeridir.

Düzgünlük İndeksi: Düzgünlük indeksi, montaj hattındaki iş istasyonlarının işlem sürelerinin düzgünlüğünü gösterir. Diğer bir ifadeyle, işlerin istasyonlar arasında orantılı olarak dağıtılıp dağıtılmadığını kontrol eder. Düzgünlük indeksinin küçük olması, hat üzerinde iyi bir dengenin sağlanmış olduğunu gösterir.

$D\bar{I}$: Düzgünlük indeksi

T_{enb} : İş istasyonu sürelerinin en büyüğü

T_i : i. iş istasyonunun işlem süresi

olmak üzere düzgünlük indeksi aşağıdaki gibi hesaplanır (Tanyaş ve Baskak, 2006).

$$Dİ (\%) = \left[\sqrt{\sum (T_{enb} - T_i)^2 / (n * C)} \right] * 100 \quad [i = 1, 2, \dots, n] \quad (2.3)$$

Denge Kaybı: İşlerin, istasyonlara dağıtımının ne ölçüde dengeli olduğunu gösteren bir ölçüttür. Denge kaybının sıfır olması ideal durumdur.

D : Denge kaybı

n : Dengeleme sonucunda elde edilen iş istasyonu sayısı

olmak üzere şu ifade yazılabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

$$D (\%) = [(C - C^*) / C] * 100 = [(n * C - \sum_i^N t_i) / (n * C)] * 100 \quad (2.4)$$

Hat Etkinliği: İş öğelerinin toplam sürelerinin, istasyon sayısı ile çevrim süresinin çarpımına oranı hat etkinliğini verir. Hat etkinliği, montaj hattındaki kapasitenin ne kadarlık bir kısmının kullanıldığını gösterir.

HE : Hat etkinliği

olmak üzere şu ifade yazılabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

$$HE (\%) = [\sum_i^N t_i / (n * C)] * 100 \quad (2.5)$$

Kuramsal Etkinlik: Montaj hattının, verilen bir çevrim süresi için en az istasyon sayısı ile kurulması durumundaki etkinliğidir. Mevcut iş öğeleri ile ulaşılabilecek en yüksek hat etkinliğidir.

KE : Kuramsal Etkinlik

olmak üzere şu ifade yazılabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

$$KE (\%) = [\sum_i^N t_i / (n_{enaz} * C)] * 100 \quad (2.6)$$

2.5 Montaj Hatlarının Dengelenmesindeki Amaç ve Kısıtlar

2.5.1 Amaç

Montaj hatları dengelenirken bir veya daha fazla performans ölçütü optimize edilmeye çalışılır. MHDP’de çoğunlukla, verilen bir çevrim süresi için istasyon sayısının minimize edilmesi amaçlanır. Bu problem, MHDP-1 olarak ifade edilir. Diğer bir amaç ise, belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresinin minimize edilmesidir ve MHDP-2 olarak ifade edilir. Bunların dışında, hat etkinliğinin maksimize edilmesi, aynı anda hem istasyon sayısının hem de kaynakların maliyetinin minimize edilmesi gibi amaçlar da vardır.

2.5.2 Kısıtlar

Montaj hatlarının dengelenmesini etkileyen birçok faktör vardır. Montaj hattındaki kısıtlar dengeleme yapılırken dikkate alınması gereken faktörlerdendir. Bu kısıtları birincil ve ikincil kısıtlar olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür (Tanyaş ve Baskak, 2006).

2.5.2.1 Birincil kısıtlar

Birincil kısıtlar, her montaj hattı dengeleme probleminde göz önünde bulundurulması gereken kısıtlardır. Bu kısıtlar, çevrim süresi ve öncelik ilişkileridir.

Çevrim Süresi: Çevrim süresi, bir ürünün montaj hattından çıkması gereken süredir. Diğer bir ifadeyle; bir ürünün üretimi sırasında herhangi bir istasyonda işlem görebileceği en büyük süredir. Bu sürenin belirlenebilmesi için, işletmenin üretmek istediği ürün sayısını ve kullanılabilir üretim süresini belirmesi gerekir. Montaj hattında bir istasyona atanan iş öğelerinin süreleri toplamı, çevrim süresini aşamaz.

Öncelik İlişkileri: Bir işin ardıllarının gerçekleştirilebilmesi için o işin öncüllerinin tamamlanmış olması gerekir. Yani, montaj hattında bir iş ögesinin yapılmaya başlanabilmesi için, diğer iş ögesi veya öğelerinin kesinlikle bitirilmiş olması gerekebilir. İstasyonlara iş öğeleri atanırken bu öncelik ilişkilerinin dikkate alınması gerekir.

2.5.2.2 İkincil kısıtlar

İkincil kısıtlar montaj hattının durumuna göre dengeleme probleminde dikkate alınması gereken ek kısıtlardır.

Konum Kısıtı: Montajı yapılan iş ögesi ile işgören arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılan bir kısıttır. Bu tür kısıtlarla, genellikle büyük ölçekli ürünlerin montajında karşılaşılr. Bir ürünün montajının aynı anda bantın hem önünden hem arkasından iki işgören tarafından yapılması gerektiği durumlar konum kısıtına örnektir.

İşgören Atama Kısıtı: İşgören atama kısıtı;

- Her işin her işgören tarafından gerçekleştirilemediği,
- Özel yetenek gerektiren işlerin bu yeteneğe sahip işgörenler tarafından gerçekleştirilmesinin istendiği,
- İşgörenlerin performansına göre atama yapılmasının istendiği durumlarda karşılaşılan bir kısıttır.

Sabit Donanım Kısıtı: Bazı donanımların veya tezgâhların belirli bir yere sabitlendiği durumlarda karşılaşılan kısıtlardır. Sabit donanım kısıtı, iş öğelerinin istasyonlara atanmasındaki esnekliği azaltan bir kısıttır.

İstasyon Yüğü: Bazı istasyonların işlem süresinin, çevrim süresinden bir miktar daha az bir süreye sahip olması istenebilir. Bu kısıt genellikle, istasyondaki olası bir gecikmenin tüm hattı etkilemesine engel olmak için kullanılır. Bu durum ilk istasyonlarda veya kritik işlemlerin yapıldığı istasyonlarda karşılaşılabilen bir durumdur.

Aynı İstasyona Atanması İstenen İş Öğeleri: Montaj hattında bazı işlerin aynı istasyonda gerçekleştirilmesi gerekebilir veya istenebilir. Bu durum, aynı donanım veya özel ekipman kullanılarak gerçekleştirilmesi gereken işlerde ortaya çıkabilir. Örneğin, özel ekipman kullanımını gerektiren iki iş öğesinin aynı işçi tarafından yapılması, ikinci bir ekipman gereksinimini ortadan kaldıracağı için, istenilen bir durumdur. Ayrıca, özel yetenek gerektiren bazı işlerin aynı işgörene atanması istendiğinde bu kısıt kullanılır.

Aynı İstasyona Atanmaması İstenen İş Öğeleri: Fazla miktarda fiziksel güç veya enerji gerektiren işlerin aynı istasyona atanması istenmeyen bir durumdur. Çünkü bu durum, o istasyona atanan işgörende ilerleyen zamanlarda ergonomik açıdan sorunlara yol açmakta ve hat dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde, titreşimli bir çalışma ile hassas ölçme gerektiren bir çalışmanın ayrılması buna bir örnek olarak verilebilir.

2.6 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

2.6.1 Model sayısına göre montaj hatları

Model sayısına göre montaj hatları; tek modelli, karışık modelli ve çok modelli montaj hattı olmak üzere üçe ayrılır.

2.6.1.1 Tek modelli

Tek tip ürünün üretildiği montaj hatlarıdır. Genellikle, bir ürünün yüksek miktarlarda sürekli olarak üretildiği durumlarda montaj hattı bu ürüne göre tasarlanır. Kurulum sürelerinin önemsizmeyecek ölçüde az olduğu birden fazla benzer ürünün üretildiği hatlar da tek modelli hat olarak düşünülebilir.

2.6.1.2 Karışık modelli

Birden fazla ürünün veya bir ürünün benzer modellerinin, aynı anda ve karışık olarak üretildiği montaj hatlarıdır. Modellerin üretim süreçleri temel olarak aynıdır, sadece bazı farklı işlemlerle modeller birbirlerinden ayrışırlar. Bazı iş öğeleri farklı modeller için aynı iken, aynı iş öğelerinin farklı modeller için farklı işlem süreleri vardır. Tüm modeller için benzer iş öğeleri söz konusu olduğundan hazırlık süreleri çok kısadır. Bu hatların avantajı, farklı ürünlerin müşteri taleplerinin sürekli olarak yapılan üretimle karşılanabilmesidir. Bununla birlikte, bu hatların tasarımı ve hatta üretilecek ürünlerin sırasının belirlenmesi oldukça zordur.

2.6.1.3 Çok modelli

Farklı ürünler aynı hat üzerinde farklı zamanlarda partiler hâlinde üretilirler. Bu hatlarda, hazırlık süreleri ve hazırlık maliyetleri dikkate alınmalıdır. Çok modelli

montaj hatları, eğer partiler büyük ise tek modelli montaj hatlarına, küçük ise karışık modelli montaj hatlarına benzerlik gösterirler.

2.6.2 Hattın yerleşim tipine göre montaj hatları

2.6.2.1 Düz / I tipi

Düz montaj hatları, birbiri ardına seri olarak sıralanmış iş istasyonlardan oluşan hatlardır. Bu tür hatlarda, montajı yapılacak ürün ilk istasyondan girer ve son istasyondan montajı tamamlanmış ürün olarak çıkar. Düz hatlarda iş akışı kolay ve hızlıdır, fakat hattın kapladığı alan fazladır. Ayrıca, düz hatlarda işgörenler arasındaki iletişim son derece azdır.

2.6.2.2 U-tipi

U-tipi montaj hatları U şeklinde tasarlanan hatlardır. İlk olarak Toyota fabrikasında uygulanmıştır. Bu fabrikada, farklı özelliklere sahip aynı türden çeşitli arabalar üretildiği ve her bir araba için talep değişkenlik gösterdiği için montaj hattında U-tipi yerleşime geçilmiştir. Böylelikle, talepte meydana gelen değişikliklere uyum ve işgören sayısında esneklik sağlanmıştır. Talebin miktarına göre işgören sayısında değişiklik yapılarak üretim hızı belirlenebilmektedir. Bu nedenle, Tam Zamanında Üretim (Just In Time) sistemlerinde U-tipi hat yerleşimi tercih edilmektedir.

U-tipi yerleşimin avantajları;

- İşletmeler, işgören sayısını artırarak veya azaltarak, ihtiyaç duyulan üretim hızını belirleyebilirler. Böylelikle, üretim hacminde esneklik sağlanmış olur.
- U-tipi yerleşimde, işgörenler birçok iş istasyonunu görebildiği için işgörenler arasındaki iletişim artar.
- İşgörenlerin yürüme mesafesi azalır (Cheng ve diğ, 2000).
- İşgörenler birden fazla iş istasyonunda görev alabilir, böylelikle işgörenler çok yetenekli (multi-skilled) hale gelir ve iş zenginleştirmesi sağlanır.
- Görsellik, iletişim ve takım çalışması U-tipi yerleşimle sağlanır.
- İşgörenler son ürünü görebildikleri için sorumlulukları ve motivasyonları artar (Scholl ve Klein, 1999).

- U-tipi yerleşim iş öğelerinin gruplandırılmasında düz hatlara göre daha fazla esneklik sağladığı için, U-tipi hatlarda ihtiyaç duyulan istasyon sayısı hiçbir zaman düz hatlarda ihtiyaç duyulan istasyon sayısından daha fazla olamaz (Cheng ve diğ, 2000).

2.6.2.3 Paralel

Talebin fazla olduğu ve tek bir hattın kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda özdeş ikinci bir hattın paralel olarak kurulması gerekmektedir. Ayrıca, her bir ürün talebinin montaj hattı kurmak için yeterli büyüklükte olması durumunda, birden fazla benzer ürünün birbirinden ayrı montaj hatlarında üretilmesi birbirine paralel olarak yerleştirilen montaj hatlarıyla sağlanır.

2.6.2.4 İki yönlü

Hattın her iki tarafının (hem sağ hem sol) kullanıldığı montaj hatlarıdır. Genellikle, yüksek miktarda üretilen büyük boyutlu standartlaşmış ürünler için tasarlanan bir hat şeklindedir. Örneğin; kamyon, otobüs, otomobil, çamaşır makinesi gibi ürünlerin montajı hattın her iki tarafında yapılabilmektedir. Bu üretim sisteminde, genellikle özelleşmiş bir makinaya ve kalifiye işgörene ihtiyaç duyulur.

2.6.3 Otomasyon düzeyine göre montaj hatları

2.6.3.1 Manuel

Manuel hatlar iş yükünün işgücüne dayalı olarak gerçekleştirildiği hatlardır. Üretim sistemindeki montaj hatlarının çoğunluğu manuel hatlardan oluşmaktadır. Manuel hatlar, özellikle otomatik montaj hatlarında zarar görebilecek hassas veya kırılabilir parçaların üretildiği sistemlerde tercih edilir. Ayrıca işgücü maliyetlerinin, otomatik montaj hatlarında kullanılan makinelerin maliyetlerine kıyasla daha düşük olduğu durumlarda manuel hatlar tercih edilmektedir.

Manuel hatlarda dikkat edilmesi gereken en önemli faktör işgörenlerin performansıdır. İşgörenler bir işi tekrar tekrar yaptıkça zamanla o işte kalifiye olurlar ve işgörenlerin işleri gerçekleştirme süresi bununla orantılı olarak azalma gösterir. Bununla birlikte, çevresel, fiziksel veya zihinsel etkenlerden dolayı işgörenlerin performansı değişkenlik gösterebilmektedir. Montaj hattı dengelenirken bu unsurların dikkate

alınması gerekmektedir. İşgörenin dikkate alınmadığı bir montaj hattında zamanla denge kayıpları artar, verimlilik azalır. Böylelikle, hem işgörenden hem de montaj hattından etkin bir şekilde yararlanılamamış olur.

Manuel hatlarda işgörenler arasındaki iletişim son derece önemlidir. Bu nedenle, montaj hattının U-tipi şeklinde yerleştirilmesi manuel hatlarda önemli bir faktördür. Çünkü U-tipi hatlar işgörenler arasında yardımlaşmaya ve iletişime olanak sağlar. Böylelikle işgörenler zamanla kalifiye hale gelirler.

2.6.3.2 Otomatik

Otomatik montaj hatlarında, istasyonlardaki işler ve istasyonlar arasındaki geçişler otomatik olarak gerçekleştirilir. İşgücü maliyetinin yüksek olduğu durumlarda otomatik makineler ve/veya robotlar kullanılarak montaj hattı tasarlanır. Ayrıca, insan gücüyle gerçekleştirilemeyecek işlerde veya çalışma ortamının işgörenlerde ciddi sağlık problemlerine yol açabileceği üretim sistemlerinde otomatik hatlar tercih edilir.

Otomatik hatlarda, istasyonların işlem sürelerindeki değişkenlik çok azdır. Manuel hatlarda karşılaşılan boş bekleme ve gecikme gibi durumlarla bu hatlarda daha az karşılaşılmaktadır.

2.6.4 Kurulum sıklığına göre montaj hatları

2.6.4.1 İlk kez dengeleme

Montaj hattı ilk kez kurulacağı zaman hattın tasarımının belirlenmesi problemidir. Üretilen ürünün iş akışı ve iş öğeleri arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak hattın kurulması gerekmektedir. Farklı makineler ve farklı işgörenler dikkate alınarak atamaların maliyetleri en aza indirecek şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca, satış tahminleriyle üretilen ürünün belirli bir süre için üretim miktarı belirlenmeli ve üretim hızına (çevrim süresine) karar verilmelidir.

2.6.4.2 Yeniden dengeleme

Montaj hatlarının, değişen müşteri talepleri veya üretim tekniklerine göre yeniden dengelenmesi gerekmektedir. Gerçek hayatta, montaj hattı dengeleme problemi çoğunlukla yeniden dengeleme durumunda ortaya çıkmaktadır. Bir montaj hattı ilk kez kurulduktan sonra, montaj hattının yeniden kurulması pek mümkün olmamaktadır. Bu

durumlarda amaç, istasyon sayısını en aza indirmekten ziyade çevrim süresini en aza indirecek bir dengenin yeniden sağlanmasıdır.

Literatürdeki çalışmaların çoğunluğu yeniden dengeleme üzerinedir. Günümüzde, değişen talepler, yeni makineler, yeni yöntemler ve değişen işgücü gibi faktörler yeniden dengeleme çalışmasının önemini arttırmaktadır.

2.7 Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması

Montaj hattı dengeleme problemleri, araştırmacıların kullandığı varsayımlara göre, Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP) ve Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (GMHDP) olarak iki ana sınıfa ayrılabilir (Baybars, 1986; Becker ve Scholl, 2006).

2.7.1 Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Birçok kolaylaştırıcı varsayım bulunduran, iş ögesi süresi deterministik olan tek modelli problemler, Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi olarak adlandırılmıştır (Baybars, 1986). BMHDP'deki varsayımlar aşağıdaki gibidir (Baybars, 1986; Tanyaş ve Baskak, 2006):

1. Tüm girdi parametreleri belirlidir.
2. Bir iş ögesi, iki veya daha çok istasyon arasında bölünemez.
3. İş öğeleri, teknolojik öncelik ilişkilerinden dolayı, keyfi sıralarda işlem göremez.
4. Tüm iş öğeleri yapılmalıdır.
5. İstasyonlar tüm iş ögelerini yapmak için gerekli donanım ve işgücüne sahiptir.
6. İş ögesi süreleri, yapıldıkları istasyonlardan ve önceki/sonraki iş ögelerinden bağımsızdır.
7. Her işlem her istasyonda yapılabilir.
8. Tüm hat, besleyici veya paralel alt montaj hatlı olmayacak şekilde seri olarak düzenlenmelidir.
9. Montaj sistemi, tek bir ürünün tek bir modeli için tasarlanmıştır.
10. Çevrim süresi verilmiştir ve sabittir.
11. İstasyon sayısı verilmiştir ve sabittir.

İlk 9 kısıt tüm Basit MHD'ler için geçerlidir. Son iki kısıt amaç fonksiyonuna göre değişmektedir. Çevrim süresinin verildiği, istasyon sayısının minimize edilmesinin amaçlandığı problemler Basit MHD-1 olarak adlandırılmaktadır. İstasyon sayısının verildiği çevrim süresinin minimize edilmesinin amaçlandığı problemler ise Basit MHD-2 olarak adlandırılmaktadır.

2.7.2 Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemindeki varsayımlardan bir veya daha fazlası gevşetilirse, bu problem Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi adını alır. Literatürdeki çalışmaların çoğu Basit MHD Problemleri üzerinedir. MHD Problemlerinde varsayımların gevşetilmesi problemin zorluk seviyesini arttırdığı için, literatürde Genel MHD Problemleri Basit MHD Problemlerine göre daha az çalışılmıştır. Fakat, Basit MHD Problemleri üzerine yapılan çalışmaların günümüz üretim koşullarında ihtiyaçları karşılayamaması nedeniyle, son yıllarda araştırmalar Genel MHD Problemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Montaj hatlarında farklı koşullar için çeşitli yaklaşımlarla Genel MHD Problemi ele alınmaktadır.

Genel MHD Probleminin söz konusu olduğu durumlara aşağıdaki örnekler verilebilir:

- İşgörenlerin her bir işi gerçekleştirme süresinin birbirinden farklı olması (İşgören performansı).
- Aynı işin farklı işgörenler tarafından gerçekleştirilme süresinin birbirinden farklı olması (İşgörenler arasındaki performans farklılığı).
- Her işin her makinede gerçekleştirilemediği durumlar.
- İşgörenlerin yürüme mesafesinin dikkate alınması gerektiği durumlar.
- Özel donanım veya ekipman gerektiren işlerin varlığı.
- İş öğelerinin işlem sürelerinin değişken olması.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Montaj Hattı Dengeleme Problemi ilk olarak Salveson tarafından 1955 yılında ortaya atılmıştır. Günümüze kadar, birçok araştırmacı tarafından MHDP incelenmiş ve çok sayıda çözüm yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemleri, kesin (analitik) yöntemler ve sezgisel yöntemler olarak iki ana sınıfa ayırmak mümkündür. Kesin yöntemler, optimum çözümü garanti eden yöntemlerdir, sezgisel yöntemler ise optimum çözümü garanti etmese de optimum veya optimumuma yakın çözümlerin elde edilebildiği yöntemlerdir.

Montaj hattı dengeleme problemleri, araştırmacıların kullandığı varsayımlara göre, Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP) ve Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (GMHDP) olarak iki ana sınıfa ayrılır. Birçok kolaylaştırıcı varsayım bulunduran, iş ögesi süresi deterministik olan tek modellenli problemler, Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi olarak adlandırılmıştır (Baybars, 1986). Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemindeki varsayımlardan bir veya daha fazlası gevşetilirse, bu problem Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi adını alır. Literatürdeki çalışmaların çoğu Basit MHD Problemleri üzerinedir. MHD Problemlerinde varsayımların gevşetilmesi problemin zorluk seviyesini arttırdığı için, literatürde Genel MHD Problemleri Basit MHD Problemlerine göre daha az çalışılmıştır. Fakat, Basit MHD Problemleri üzerine yapılan çalışmaların günümüz üretim koşullarında ihtiyaçları karşılayamaması nedeniyle, son yıllarda araştırmalar Genel MHD Problemleri üzerine yoğunlaşmıştır.

MHDP’de detaylı literatür incelemesi için Battaia ve Dolgui (2013), Boysen ve diğ. (2008), Scholl ve Becker (2006) tarafından yapılan çalışmalara bakılabilir. Basit MHDP ile ilgili en güncel literatür araştırması Battaia ve Dolgui (2013) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 300 makale incelenmiş ve bazı kriterlere göre makaleler analiz edilmiştir. Boysen ve diğ. (2008), Basit MHDP için yaptıkları literatür araştırmasında, inceledikleri 312 makalenin sadece 15’inin gerçek hayattaki montaj sistemleri için uygulanabilir bir dengeleme çalışması olduğunu belirtmiştir. Yazarlar,

bu boşluğun doldurulması için MHDP'deki bazı varsayımların gevşetilerek gerçek hayata uygulanabilir hale getirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Scholl ve Becker (2006) ise literatürdeki en bilinen çalışmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Scholl ve Becker (2006), son yıllarda araştırmacıların Basit MHDP yerine daha gerçekçi olan ve maliyet fonksiyonu, malzeme seçimi, paralel istasyonlar, U-tipi yerleşim, karma modelli üretim gibi faktörlerin dikkate alındığı çalışmalar üzerine yoğunlaştığını belirtmiştir. Ayrıca, yazarlar pratik hayata uygulanabilir çözüm yöntemlerinin sınırlı sayıda olduğunu ve gelecekte buna yönelik çalışmaların olması gerektiğini belirtmiştir.

Bu bölümde, Montaj Hattı Dengeleme Problemi ile ilgili çalışmalar Basit ve Genel MHD Problemleri olarak iki ana sınıfta ele alınarak ayrıntılı bir literatür çalışması sunulacaktır. Çalışmalar, MHDP'nin tarihsel gelişimini göstermek için kronolojik olarak sıralanmıştır. Bununla birlikte, çalışmaların birbirleriyle olan ilişkilerine de değinilmiştir. Bu tezin konusu olan U-tipi montaj hatları ile ilgili çalışmalar ise Genel MHD Probleminin alt başlığı altında incelenmiştir. Montaj hatlarında insan faktörünü dikkate alan çalışmalar ise literatür araştırmasının son bölümünde incelenmiştir.

3.1 Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Salveson, 1955 yılında MHD Problemi için, bir matematiksel formülasyon oluşturmuş ve böylece bu problem için literatürdeki ilk analitik yöntemi sunmuştur. Bu tarihten günümüze kadar, MHD Problemi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır ve halen çalışmalar farklı çözüm yaklaşımlarıyla devam etmektedir.

Salveson'un çalışmasından sonra, Jackson (1956), "Aşamalı Sıralamayla Çözüm" adını verdiği bir prosedür geliştirmiştir. Bu yönteme göre, çevrim süresini aşmamak ve öncelik ilişkilerini ihlal etmemek koşuluyla, tüm işlerin olası tüm atamaları belirlenir. Daha sonra, çözümü kolaylaştıracak bazı sadeleştirmeler yapılır ve optimum çözüm bulunur.

Bowman'ın (1960), "Doğrusal Programlama ile Montaj Hattı Dengeleme" adlı çalışmasında MHDP için analitik bir yöntem önermiştir.

Helgeson ve Birnie (1961) tarafından "Konum Ağırlıklı Dengeleme Tekniği" geliştirilmiştir. Bu yöntemde, her iş ögesine kendisinden sonra gelen iş ögelerinin

toplam süresinin büyüklüğüne göre bir ağırlık verilir. Bu ağırlığa konum ağırlığı denir. Bu yöntemde, her bir iş ögesi, konum ağırlığı en yüksek olandan başlayarak öncelik ilişkileri de dikkate alınarak istasyonlara atanmaktadır.

Kilbridge ve Wester (1961), “Sezgisel Hat Dengeleme Yöntemi” geliştirmiştir. Bu yöntemde, çevrim zamanı ve iş istasyonu sayısı değişkendir. Belli kurallar çerçevesinde, gruplama yöntemiyle iş ögeleri istasyonlara atanır.

Held ve diğ. (1963), Jackson’ın (1956) “Aşamalı Sıralama ile Çözüm” adlı yöntemini geliştirerek bir Dinamik Programlama modeli önermiştir. Bu yöntemde, toplam istasyon süresini bulmak için bir formülasyon geliştirilmiş ve bu formülasyona göre belli prosedürlerle atamalar yapılmıştır. Amaç, belli bir çevrim süresi için iş istasyonu sayısını minimize etmektir.

Hoffmann (1963), montaj hatları için, 0-1 tamsayılarından oluşan bir öncelik matrisi oluşturarak, belli kurallar kullanarak yeni bir sezgisel dengeleme yöntemi önermiştir. Bu yönteme göre, ilk olarak iş ögelerinin öncelik ilişkileri dikkate alınarak aralarında öncelik ilişkisi olan iş ögeleri “1”, öncelik ilişkisi olmayan iş ögeleri ise “0” sayılarıyla kodlanarak bir öncelik matrisi oluşturulur. Daha sonra, öncelik matrisindeki 0-1 kod numaraları her sütun için toplanır. Öncelik ilişkileri dikkate alınarak, “0” kodlu soldaki ilk satırdan başlanarak iş ögeleri tek tek istasyonlara atanır. Birden fazla “0” kodlu iş ögesi varsa bunlardan istasyondaki boş süreyi minimum yapan iş seçilir ve ilgili istasyona atanır. Hoffmann, bu yöntemi FORTRAN programında 9 iş ögeli bir montaj hattı problem için uygulamış ve diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin genellikle optimum çözümü verdiğini göstermiştir.

Klein (1963), Basit MHD Problemini “En Kısa Yol Problemi” ne dönüştürerek formüle etmiştir. Bu çalışma, literatürde Basit MHD Problemini En Kısa Yol Problemi olarak formüle eden ve çözüm yöntemi sunan ilk çalışmadır. Bu yaklaşım, daha sonra U-tipi MHD Problemleri için Gökçen ve diğ. (2005) tarafından geliştirilmiştir.

Moddie ve Young (1965), iki aşamalı bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. İşlem sürelerinin sabit ve değişken olarak kullanılabilirdiği bir yöntemdir. Bu sezgisel yöntemde, ilk aşamada belli kurallara göre atamalar yapılır, daha sonra çevrim süresindeki küçük değişikliklerle optimum hat dengesi bulunmaya çalışılır.

Arcus (1966), “COMSOAL” (Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines: Montaj Hatları için Bilgisayarla Sıralama Metodu) adını verdiği bilgisayar destekli bir yöntem geliştirmiştir. COMSOAL, bilgisayar kullanılarak benzetim tekniği ile montaj hattı denge sistemleri oluşturur. 1966 yılından önceki çalışmalar, elle çözüm yöntemleri sunduğu için ve bu yöntemlerin uygulanması çok zor olduğu için, bu yöntemde daha öncekilere göre daha etkili bir çözüm tekniği sunulmuştur.

Nevins (1972), istasyon sayısını doğrudan minimize etmek yerine, istasyon sayısı için bir üst sınır belirledikten sonra, istasyon sayısını birer birer azaltarak, teorik olarak elde edilebilecek minimum sayıda istasyon kurmaya yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Nevins (1972), bu yöntemi literatürdeki bir test probleminde uygulamış, optimum veya optimuma yakın çözümler elde etmiştir.

Pinto ve diğ. (1978), iki aşamalı bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. İlk aşamada, çok geçişli bir sezgisel kullanılarak bir takım olurlu çözümler elde edilir. Bu çözümler, tüm diyagramdan bir alt diyagram oluşturmak için ikinci aşamada kullanılır. Alt grafiği bulmak, yani tek bir çözüm elde etmek için, en kısa yol yöntemi uygulanır.

Akagi ve diğ. (1983), bir istasyona birden fazla işgörenin atanmasına izin veren iki aşamalı bir yöntem geliştirmiştir. İlk aşamada, işler literatürdeki bazı kurallara göre istasyonlara atanır ve bu prosedür farklı sayıdaki işgörenler için tekrarlanır. İkinci aşamada ise, iş öğelerinin her bir istasyondaki işgörelere ataması gerçekleştirilir.

Agrawal (1985), iş öğelerini istasyonlara atamak için, “En Geniş Küme Kuralı” algoritmasını geliştirmiştir. Bu yöntemde göre, ilk olarak tüm iş öğeleri için birikimli süre değerleri hesaplanır. Daha sonra, çevrim süresinden küçük olan en büyük birikimli süreye karşılık gelen tüm iş öğeleri işgörelere atanır ve bu iş öğeleri öncelik diyagramından çıkartılır. Tüm iş öğeleri istasyonlara atanana kadar bu prosedür uygulanır. Bu yöntem etkili olmasına rağmen, diğer sezgisel algoritmalar gibi optimum çözümü garanti etmez.

Baybars (1986), Montaj Hattı Dengeleme Problemi için, beş aşamadan oluşan bir prosedür önermiştir. İlk dört aşamada, problemin bazı özelliklerinden yararlanılarak problemin boyutunun azaltılması amaçlanır. Son aşamada ise, indirgenmiş probleme tek geçişli sezgisel bir yöntem uygulanarak çözüm aranır. Yöntem, literatürdeki bazı

test problemleri için uygulanmış, sonuçlar yöntemin çoğu durumda optimum çözümü verdiğini göstermiştir.

Dar-El ve Rabinovitch (1988), Basit Montaj Hattı Problemi için, geleneksel yöntemdeki sürekli üretim yerine parti üretimini ele almış ve ekonomik koşulları incelemişlerdir. Amaç, çevrim süresini ve istasyon sayısını eş zamanlı olarak optimize etmektir. Bu yöntemde, 5 etken ele alınmıştır. Bunlar; öğrenme, envanter, yükleme, dengeleme ve yerleşim maliyetidir. Dar-El ve Rabinovitch (1988), yaptıkları araştırmada sanayileşmiş ülkelerde toplam üretimin büyük bir bölümünü parti üretimin oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Ekonomik olarak en büyük tasarrufu 1000 ürünlük parti üretiminde elde etmişlerdir.

Johnson (1988), Montaj Hattı Dengeleme Problemi için “FABLE” adını verdiği yeni bir algoritma geliştirmiştir. “FABLE”, derin öncelikli arama ve Dal&Sınır algoritmasıdır. Bu yöntemin performansı, her istasyondaki iş ögesi sayısına, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin sayısına ve her problemdeki toplam iş ögesi sayısına duyarlıdır. Bu yöntemde yeni ve literatürdeki mevcut öncelik kuralları ile sınır parametreleri kullanılmıştır. Johnson (1988), bu çalışmada “FABLE” in sezgisel algoritmasını da açıklamıştır. “FABLE” ile 1000 görevli montaj hatlarında ve ortalama 6 iş ögesinden oluşan istasyonlarda, bilgisayar ile 20 sn’den az bir sürede optimal sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu yöntem literatürde bilinen 64 test problem için denenmiş ve kısa sürede (3.16 sn) optimal sonuçlar bulunmuştur.

Shtub ve Dar-El (1990), MHD Problemi için, montaj çizelgelemeye yönelik bir yaklaşım geliştirmiştir. Çoğu MHD yönteminde hat dengeleme için gerekli olan bilgiler, öncelik diyagramı ve iş öğelerinin süreleridir. Bu yöntemde, iş yöntemini iyileştirme ve iş zenginleştirme gibi amaçlar Montaj Hattı Dengeleme Problemine dahil edilmiştir. Bu yaklaşımın amacı, hem istasyonlardaki boş süreyi hem de her istasyonda yapılması gereken alt montaj sayısını minimize etmektir.

Johnson (1991), çalışma grupları ve takımlar için Montaj Hattı Dengeleme Problemini ele almış ve bir Dal&Sınır Algoritması geliştirmiştir. Bu çalışmanın geleneksel problemlerden farkı, bir istasyonda aynı ürünün farklı montaj işlerini eş zamanlı olarak yapan birden fazla işgörenin olmasıdır. Bu durum, ürünün yeterli büyüklükte olmasını ve işgörenlerin birbirini engellememesini gerektirir. Johnson (1991), bu çalışmasını

bir otomobil montaj hattında uygulamış ve literatürdeki bilinen problemler üzerinde test etmiştir. Sonuçlar, bu yöntemin gerçek hayata uygulanabilirliğini ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Rachamadugu ve Talbot (1991), yaptıkları çalışmada, sadece istasyon sayısının veya çevrim süresinin minimize edilmesi amacının istasyonlarda dengesiz iş dağıtımlarına neden olacağını vurgulamış ve bunun üstesinden gelebilmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Model, verilen bir çözüm üzerinden iş yükünün düzgünleştirilmesine yöneliktir. Sonuçlar, uygulanan yöntemin iş yükünün dengelenmesi için çok etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Nourie ve Venta (1991), MHD Problemi için optimum çözümü bulmaya yönelik “OptPack” adında yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu yöntem, literatürdeki problemlerle test edilmiş, optimum çözümü hızlı bir şekilde verdiği gösterilmiştir. “OptPack” algoritmasının bilgisayar uygulaması da anlatılmış ve sayısal testler yapılmıştır.

Nourie ve Venta (1996), bu çalışmalarında, geliştirdikleri “OptPack” algoritmasının üstünlüğü göstermek için, bu yöntemi literatürdeki Johnson’ın (1988) “FABLE” ve Hoffmann’ın (1993) “EUREKA” yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Hem çözüm hızı hem de verilerin kapladığı alan bakımından “OptPack” algoritması diğer iki yönteme göre daha iyi performans göstermiştir.

Klein ve Scholl (1996), Basit MHDP-2 (istasyon sayısı belli iken çevrim süresinin minimizasyonu) için bir Dal&Sınır Algoritması geliştirmiştir. Üretim oranının maksimizasyonu amacıyla geliştirilen bu yöntemde, yeni bir sayım tekniği olan ve bir dizi sınırlama ve baskınlık kuralları ile tamamlanan “Yerel Alt Sınır Yöntemi” kullanılmıştır. Bu çalışma, Basit MHDP-2 için geliştirilen en önemli ve kapsamlı çalışmalardan biridir. Önerilen yöntemi test etmek için, 302 örnekten oluşan yeni bir veri kümesi kullanılmıştır. Sayısal testlerden elde edilen sonuçlara göre, bu yöntemle daha önceki yöntemlerden daha üstün bir performans elde edilebildiği gösterilmiştir.

Scholl ve Klein (1997), MHDP için “SALOME” adını verdikleri yeni bir Dal&Sınır Algoritması geliştirmişlerdir. Bu yöntemin temel özelliği, yeni bir dallandırma stratejisi ve çift yönlü dallandırma kuralı içermesidir. Ayrıca, bu yöntemde yeni sınırlama ve baskınlık kuralları eklenmiştir. Sayısal testler, bu yöntemin o zamana

kadar geliştirilen diğer yöntemlere göre daha etkili sonuçlar elde edebildiğini göstermiştir.

Scholl ve Klein (1999), 1997 yılında geliştirdikleri “SALOME” adlı Dal&Sınır Algoritmasının etkinliğini göstermek için, bu yöntemi literatürdeki en bilinen benzer yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Basit MHDP-1 için geliştirilen Johnson’ın (1988) “FABLE”, Nourie ve Venta’nın (1991) “OptPack”, Hoffmann’ın (1992) “EUREKA” adlı yöntemleri “SALOME” yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, “SALOME” yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi çözümler verdiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, dinamik numaralandırma ve baskınlık kuralları ile “SALOME”nin performansının geliştirilebileceği gösterilmiştir.

Sabuncuoğlu ve diğ. (2000), tek modellenli düz montaj hatları için Genetik Algoritma tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, Genetik Algoritmadaki kromozom yapısı değiştirilerek “Dinamik Parçalama” adında yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca, modelde Tavlama Benzetimi algoritmasındaki seçkincilik (elitizm) modeli uygulanmıştır. Sayısal deneyler, birçok test probleminde bu yöntemin üstün bir performans sergilediğini göstermiştir.

Amen (2000), Basit MHD Problemi için maliyet odaklı bir yaklaşım önermiştir. Amen, maliyet minimizasyonu amacıyla yeni bir matematiksel model geliştirmiştir. Deneysel sonuçlar, bu modelin küçük ve orta ölçekli problemler için optimal sonuçları kabul edilebilir bir sürede bulabildiğini göstermiştir.

Fleszar ve Hindi (2003), Hoffmann’ın (1963) “Öncelik matrisi ile çözüm” yöntemini geliştirerek yeni bir dengeleme yöntemi önermişlerdir. Hoffmann’ın geliştirdiği yöntemin dezavantajı bir veya birden fazla istasyonda boş sürenin artmasına neden olmasıdır. Fleszar ve Hindi, bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çift yönlü yaklaşım önermiştir. Ayrıca, daha etkin bir çözüm elde edebilmek için bazı indirgeme teknikleri uygulanmıştır. Bu yöntem, literatürdeki bilinen test problemleri kullanılarak benzer diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin yaklaşık 2 sn’lik bir işlem süresinde optimal veya optimale yakın çözümler elde edebildiğini ve diğer yöntemlerle rekabet edebilir olduğunu göstermiştir.

Scholl ve Becker (2005), Amen’in (2000) Basit MHD Problemleri için geliştirdiği maliyet odaklı dengeleme modelinde uygulanan baskınlık kurallarından birinin doğru

olmadığını göstermiş, daha sonra bu kuralın düzeltilmiş ve kolaylaştırılmış bir versiyonunu geliştirmiştir. Bu yöntem için karmaşık tamsayılı programlama modeli formüle edilmiştir. Scholl ve Becker, maliyet odaklı yaklaşım için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini ve bunların deneysel sonuçlarla desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Amen (2006), montaj hatları için maliyet odaklı yeni bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu modelde, optimum sonucu hızlı bir şekilde elde edebilmek için yeni sınırlamalar geliştirilmiştir. Bu modeldeki amaç, klasik MHD Problemlerindeki gibi istasyon sayısının minimizasyonu değil, bir birim ürün başına düşen maliyeti minimize etmektir. Bu çalışmada, önerilen modelin formülasyonu, çözüm zorluğu, üst ve alt sınırlar detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Miltenburg (2006), Johnson'ın (1988) önerdiği "FABLE" algoritmasını yeni özellikler ekleyerek geliştirmiştir. Miltenburg, güncellediği bu algoritmayı "FABLE 2003" olarak adlandırmıştır. Bu yöntemde yeni eklenen özellikler; iş öğelerinin önceliklerini değiştirme, her örneği birden fazla kez çalıştırma, bazı budama yöntemleri eklenmesi ve algoritmanın C programlama dilinde kodlanmasıdır. Yapılan testler, bu yöntemin literatürdeki en iyi algoritmalar kadar iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, "FABLE 2003" istasyonlardaki iş ögesi sayısı 3 veya daha az olan problemler için yetersiz kalmıştır. Miltenburg, gelecekteki çalışmalarda, bu tür problemlerin çözümü için çalışmalar yapılması gerektiğini ifade etmiştir.

Kılınçcı ve Bayhan (2006), Basit MHDP-1 (verilen bir çevrim süresi için istasyon sayısının minimizasyonu) için Petri Ağı yöntemindeki ulaşılabilirlik analizini kullanan bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma MATLAB'de kodlanmış, Talbot ve Hoffmann'ın veri kümeleri kullanılarak test edilmiştir. Sayısal sonuçlar, bu yöntemin Tonge'nin 70 iş ögeli test problemi için literatürdeki diğer yöntemlere göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Nearchou (2007), Basit MHDP-2 için Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) tabanlı yeni bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. DEA, sürekli değişken verilerin söz konusu olduğu optimizasyon problemlerinde etkin sonuçlar verebilen bir yöntemdir. İstasyon sayısı sabit iken çevrim süresinin minimizasyonu problemlerinde (BMHDP-2), çevrim süresi değişken olduğu için, bu yöntem bu problem için uygulanabilir bir sezgisel

yöntemdir. Nearchou, bu yöntemi literatürdeki 297 iş ögeli problem örneklerine kadar test etmiş ve yöntemin üstün performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, literatürdeki diğer sezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yöntemin daha etkin olduğu belirtilmiştir.

Blum (2008), Basit MHDP-1 için, Işın Araması ve Karınca Koloni Algoritmasını (KKA) birleştirerek yeni bir hibrit sezgisel algoritma geliştirmiş ve bu yöntemi “Beam-ACO” (Işın-Karınca Kolonisi Optimizasyonu) olarak adlandırmıştır. Bu yöntemin diğer hibrit algoritmalarından farkı, optimal çözümü birden fazla aşamadan sonra değil de doğrudan elde etmesidir. Sayısal deneyler, bu yöntemin literatürdeki bilinen 269 test probleminden 263’ünde optimal çözümü elde ettiğini göstermiştir.

Bautista ve Pereira (2008), Basit MHDP-1 için “Sınırlandırılmış Dinamik Programlama” adını verdikleri bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Bu yöntem, literatürdeki bilinen problemler ile test edilmiş ve 269 örnekten 267’sinde optimal çözümler elde edilmiştir.

Scholl ve diğ. (2010), Basit MHD Problemi için bazı atama kısıtları içeren yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, Scholl ve Klein’in (1997), “SALOME” adlı Dal&Sınır algoritmasının genişletilmiş halidir ve “ABSALOM” olarak adlandırılmıştır. Yeni yöntemdeki ek kısıtlar; birbiriyle uyummayan iş ögeleri ve birbiriyle bağlantılı iş ögeleri kısıtlarıdır. Yapılan sayısal deneyler, ek atama kısıtlarına rağmen bu yöntemin ümit verici bir kesin çözüm yaklaşımı olduğunu göstermiştir.

Nearchou (2011), Basit MHDP-2 için çok amaçlı, Parçaçık Sürü Optimizasyonu (PSO) tabanlı bir metasezgisel algoritma geliştirmiştir. Yazara göre bu çalışma, Montaj Hattı Dengeleme Problemi için literatürde PSO algoritması kullanılarak yapılan ilk çalışmadır. PSO algoritması, sürekli ve doğrusal olmayan problemler için kullanılan bir küresel optimizasyon yöntemidir. MHD Problemi, kesikli karar değişkenlerine sahip bir problem olduğu için, PSO algoritmasını bu problem için kullanmak zordur. Nearchou, bu zorluğun üstesinden gelmek için hareketli noktalar (floating-points) vektörü yöntemini kullanarak dengeleme çözümlerini haritalandırmıştır. Bu yöntemde iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır, bunlar; verilen bir istasyon sayısı için çevrim süresinin maksimizasyonu (üretim oranının maksimizasyonu) ve iş yükünü maksimum seviyede düzgünleştirilmesidir. Nearchou,

bu yöntemin etkinliğini test etmek için kapsamlı sayısal testler yapmıştır. Sonuçlar, bu yaklaşımın yüksek bir performans sergilediğini göstermiştir.

Wei ve Chao (2011), Basit MHD tip-1 ve tip-2 problemlerini birleştirerek Basit MHDP-E için bir matematiksel model geliştirmiştir. Modelin amacı, hat etkinliğini ve toplam boş süreyi eş zamanlı olarak minimize etmektir. Sayısal deneyler, çevrim süresinin üst sınırı(ct_{max}) belirlendiğinde, önerilen modelin minimum değişken, kısıt ve hesaplama zamanı ile optimum çözümü verebildiğini göstermiştir.

Sewell ve Jacobson (2012), Basit MHD Problemi için optimum çözümü garantileyen Dal, Sınır ve Hatırlatma Algoritması geliştirmiştir. Bu algoritma, gereksiz alt problemleri hatırlama yoluyla elemine eden Dal&Sınır yöntemi temelli yeni bir algoritmadır. Algoritmanın performansı literatürde bilinen bazı problemler ile test edilmiş ve sonuçlar bu algoritmanın her problem için 1,5 sn'den daha az bir sürede optimum çözümü bulunduğunu göstermiştir. Bu algoritma, Basit MHDP-1 için şuna kadar literatürde bilinen 269 test probleminin tamamı için optimum çözümü elde eden tek algoritmadır. Aynı test problemleri için literatürde en bilinen algoritmalarından biri olan Scholl ve Klein'in (1997) geliştirdiği SALOME algoritması, 269 problemin 260'ında optimum çözümü elde edebilmiştir.

Basit MHD Problemleri barındırdığı birçok kolaylaştırıcı varsayımdan dolayı gerçek hayattaki montaj hatlarının ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda çalışmalar daha çok Genel MHD Problemlerine yönelmiştir. Bununla beraber, araştırmacılar Basit MHD Problemleri için literatürde var olan çözüm yöntemlerini geliştirmeye yönelik sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar geliştirmeye devam etmektedir.

3.2 Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Raouf ve Tsui (1982), iş ögesi sürelerinin stokastik olduğunu kabul ederek, MHDP için yeni bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemin temel özelliği iş öğelerine öncelik atanması ve istasyonlara iş öğeleri atanırken öncelikli iş öğelerinin tercih edilmesidir. Bu yöntemde, her istasyonun yönetici tarafından belirlenen güvenilirlik seviyesini aşmayacak şekilde dengelenmesi ve her istasyondaki değişkenliğin minimize edilmesi hedeflenmektedir.

Shtub (1984), işlem sürelerinin stokastik olduğu ve her bir iş istasyonuna birden fazla işgörenin tahsis edilebildiği bir matematiksel model önermiştir. Modelin amacı, hattın toplam maliyetini minimize etmektir. Hattın toplam maliyeti; süreç içi envanter maliyeti, işgücü maliyeti ve işin tamamlanmama maliyetlerinden oluşmaktadır.

Wilson (1986), montaj hatlarında çok işgörenli iş istasyonları için, Shtub'ın (1984) önerdiği formülasyonu yeniden formüle ederek geliştirmiştir. Bu yöntemde, işleri çok işgörenli istasyonlara atayarak etkili bir üretim hattı tasarlamak için, tamsayılı programlama modeli kullanılmıştır.

Gökçen ve Erel (1997), karışık modellenli düz montaj hatları için 0-1 tamsayılı Hedef Programlama modeli önermiştir. Bu modelde, çok kriterli karar verme yaklaşımı geliştirilmiştir ve bu bağlamda üç farklı hedef belirlenmiştir. Bu çalışmada, tek amaçlı bir optimum çözüm elde etmekten ziyade, çakışan amaçlar için memnun edici seviyede bir performans sağlanması tercih edilmiştir. Önerilen model, karar vericilere alternatifleri değerlendirebilmeleri için esneklik sağlamıştır.

Buckhin ve Masin (2004), takım odaklı montaj sistemleri için her takımın yarı-otonom olduğu ve sorumluluklarının iyi tanımlandığı bir tasarım yöntemi sunmuştur. Takım odaklı montaj sistemleri, modern montaj sistemlerinin yeni hedeflerini karşılar. Aynı zamanda, daha tatmin edici bir çalışma ortamı oluşturur. Tasarım kararı, takım sayısını, bunlar arasındaki öncelik ilişkilerini, takım boyutunu ve her takımın görevini içermektedir. Problemin çözüm yaklaşımı, ürünün yapısına odaklanır ve ürün ağacına göre iş öğelerinin atanmasına dayanır. Yöntemin kalitesini değerlendirmek için 5 adet performans ölçütü türetilmiştir. Korelasyon analizi performans ölçütleri arasında düşük korelasyon olduğunu, fakat hiçbirinin gereksiz olmadığını göstermiştir. Çok amaçlı tasarım problemini çözmek ve tüm etkili tasarım seçeneklerinden verimli bir sınır bulmak için geriye Dal&Sınır algoritmasına dayalı optimum çözüm önerilmiştir. Optimum algoritmaya dayanarak, büyük ölçekli problemlerin çözümü için hızlı ve etkili bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Gökçen ve diğ. (2006), tek modellenli paralel montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir matematiksel model önermiştir. Bu modelde, aktif ve pasif durum olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Aktif durumda, her bir hatta montajı yapılan ürünler, bir ürünün farklı veya benzer modelleri olmalı ve çevrim süreleri aynı olmalıdır. Pasif

durumda ise, iki farklı montaj hattında aynı çevrim süresine sahip olan birbirinin aynı ürünlerin montajı yapılmaktadır. Önerilen model, literatürdeki bilinen bazı veri kümeleri ile test edilmiş ve sonuçlar bu yöntemin üstün bir performans sergilediğini göstermiştir.

Vilarinho ve Simaria (2006), karışık modellenli paralel montaj hattı dengeleme problemi için bir Karınca Kolonisi Optimizasyon (KKO) algoritması önermiştir. Önerilen algoritmada, verilen bir çevrim süresi için işgören sayısını minimize etmek ve istasyonlardaki iş yükünü düzgünleştirmek amaçlanmıştır. Algoritmanın etkinliği sayısal deneylerle gösterilmiştir.

Wu ve diğ. (2008), iki yönlü montaj hatları için Dal&Sınır Algoritması'na dayanan bir dengeleme yöntemi önermiştir. İki yönlü montaj hatları genellikle otobüs ve kamyon gibi büyük boyutlu ürünlerin montajında kullanılır. İki yönlü montaj hatları kendine has bazı özelliklerinden dolayı karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, literatürde iki yönlü montaj hattı dengeleme problemi bu güne kadar çok az sayıda çalışılmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntem, 21 tane test problemine uygulanmış ve sonuçların umut verici olduğu belirtilmiştir.

Pastor ve Ferrer (2009), Basit MHDP-1 ve Basit MHDP-2 için bir matematiksel programlama modeli geliştirmiştir. Bu modelin temel özelliği, hem çevrim süresinin üst sınırı hem de istasyon sayısının üst sınırına bağlı olarak yeni kısıtlar eklenmesidir. Sayısal testler, önerilen matematiksel modelin literatürdeki diğer modellere göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Tuncel ve Topaloğlu (2013), bir elektronik imalat firmasında paralel istasyonlara sahip olan, iş atama kısıtları ve konum kısıtları içeren bir endüstriyel montaj sisteminde hat dengeleme çalışması yapmıştır. Bu çalışmada, verilen bir çevrim süresinde, toplam istasyon sayısını minimize etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak, problem 0-1 tamsayılı programlama modeli olarak formüle edilmiş ve CPLEX solver kullanılarak çözülmüştür. Daha sonra, çoklu vardiya ve mesai gibi alternatif iş çizelgelerinin etkileri analiz edilmiştir. Alternatif iş çizelgesi işgören maliyetini azaltmıştır ve daha dengeli bir hat oluşmasını sağlamıştır. Son olarak, sayısal bir çalışma ile önerilen modelin performansı değerlendirilmiştir. Modelin iyi çözüm zamanlarıyla yüksek kalitede çözümler ürettiği gösterilmiştir.

3.2.1 U-tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesi

U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi üzerine yapılan çalışmalar Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi-Literatür incelemesi.

Yazar	Yılı	Problem türü	Yöntem
Miltenburg ve Wijngaard	1994	Tek modelli	Dinamik Programlama
Miltenburg	1998	Tek modelli	Dinamik Programlama
Urban	1998	Tek modelli	Tamsayılı Doğrusal Programlama
Sparling ve Miltenburg	1998	Karma modelli	Sezgisel Algoritma
Scholl ve Klein	1999	Tek modelli	Dal&Sınır Algoritması
Nakade ve Ohno	1999	Tek modelli	Sezgisel Algoritma
Kim ve diğ.	2000	Karma modelli	Birlikte Evrimleşme Algoritması (co-evolutionary)
Erel ve diğ.	2001	Tek modelli	Tavlama Benzetimi
Aase ve diğ.	2003	Tek modelli	Dal&Sınır Algoritması
Nakade ve Ohno	2003	Tek modelli	Sezgisel Algoritma
Gökçen ve diğ.	2005	Tek modelli	En Kısa Yol Problemi
Erel ve diğ.	2005	Tek modelli	Işın Araması
Gökçen ve Ağpak	2006	Tek modelli	Hedef Programlama
Chiang ve Urban	2006	Tek modelli	Hibrit Sezgisel
Shewchuk	2008	Tek modelli	Matematiksel Model ve Sezgisel Algoritma
Toksarı ve diğ.	2008	Tek modelli	Sezgisel Algoritma
Sabuncuoğlu ve diğ.	2009	Tek modelli	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
Kara ve Tekin	2009	Karma modelli	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
Baykasoğlu ve Dereli	2009	Tek modelli	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
Sirovetnukul ve Chutima	2010	Tek modelli	Rastlantısal Algoritma
Rabbani ve diğ.	2012	Karma modelli	Tamsayılı Doğrusal Programlama ve Genetik Algoritma
Manavizadeh ve diğ.	2013	Karma modelli	Tavlama Benzetimi
Avikal ve diğ.	2013	Tek modelli	Kritik Yol Metodu
Zha ve Yu	2014	Tek modelli	KKO ve Işın Araması

Miltenburg ve Wijngaard (1994), tek modelli deterministik görev süreli U-tipi montaj hatları için Dinamik Programlama modeli geliştirmiştir. Miltenburg ve Wijngaard, Tam Zamanında Üretim (TZÜ) ilkesine geçişinin bir sonucu olarak birçok firmanın geleneksel düz hatlardan U-tipi hat yerleşimine geçtiğini belirtmiş ve bu bağlamda çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma, U-tipi montaj hatları için kesin çözüm yöntemi

sunan ilk çalışmadır. Önerilen model, Held ve diğ. (1963) tarafından önerilen Dinamik Programlama modelinin U-tipi montaj hattı dengeleme problemine uyarlanması ile elde edilmiştir. Sayısal testler, bu modelin 21 iş öğeli problemlere kadar optimum çözümü verebildiğini göstermiştir.

Urban (1998), U-tipi montaj hatlarında istasyon sayısının minimize edilmesi için bir tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Öncelik diyagramına bir hayalet öncelik diyagramı eklenerek iş öğeleri istasyonlara atanırken, hem hattın başından hem de hattın sonundan atama yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Ayrıca, modelin etkinliğini arttırmak için teorik olarak gerekli olan minimum sayıda istasyonun kurulduğu kabul edilmiştir. Urban (1998), bu modeli en fazla 14 istasyon ve 45 iş öğeli problemlere kadar test etmiştir. Elde edilen sonuçlar, Maksimum Konum Ağırlıklı Dengeleme Yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, test edilen 25 problemde 14'ünde Urban'ın (1998) tamsayılı programlama modelinin daha iyi çözüm elde ettiğini göstermiştir. Diğer 11 problemde ise iki yöntemde de aynı sayıda istasyon sayısı elde edilmiştir. Ayrıca, model Basit MHD Problemi ile de karşılaştırılmış, 5 problemde Urban'ın (1998) modeli daha iyi sonuç vermiştir. Sonuçlar, U-tipi montaj hatlarında düz montaj hatlarına göre daha az sayıda istasyon kurularak dengelemenin sağlanabildiğini göstermiştir.

Miltenburg (1998), çok sayıda U-tipi montaj hattının olduğu tesisler için bu hatlar arasındaki dengeyi kurmak için bir Dinamik Programlama modeli önermiştir. Bu model ile en fazla 22 iş öğeli problemlere kadar optimum denge sağlanmıştır.

Nakade ve Ohno (1999), kalifiye işgörenlerin olduğu U-tipi montaj hatlarında işgören atama problemi için bir algoritma önermiştir. Önerilen algoritmada, ilk olarak çevrim süresini garantileyen minimum işgören sayısı belirlenmiş, daha sonra bu işgörenler işlem süreleri dengeli olacak şekilde istasyonlara atanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada işgörenlerin yürüme ve bekleme süresi de dikkate alınmıştır.

Kim ve diğ. (2000), karma modellenli U-tipi montaj hatları için eşzamanlı olarak dengeleme ve sıralama yapan yeni bir algoritma geliştirmiştir. Yapay zeka tekniği kullanılan bu algoritma Birlikte Evrimleşen (Cooperative co-evolutionary) Algoritma olarak adlandırılmıştır. Sayısal deneylerle, bu algoritmanın benzer algoritmalara göre

dahi iyi bir performans sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, bazı değişikliklerle bu algoritmanın farklı problemlere uygulanabileceği belirtilmiştir.

Miltenburg (2001), U-tipi hatların pratik hayatta ne tür faydalarının olduğunu göstermek için kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Bu amaçla, Amerika ve Japonya’da toplam 114 firmada uygulanan U-tipi hat yerleşimi incelenmiştir. Bu hatlardaki ortalama makina sayısı 10.2, operatör sayısı 3.4 olarak tespit edilmiştir. İstasyonların yaklaşık dörtte biri ise bir operator tarafından yönetilmektedir. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, ortalama olarak, yarı mamul oranında %86, temin süresinde %75, hata oranında %83 düşüş, verimlilikte ise %76 artış görülmüştür. Bu sonuçlar, Tam Zamanında Üretim(TZÜ) prensibi ile çalışan firmalarda U-tipi hat yerleşiminin oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Erel ve diğ. (2001), U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için Tavlama Benzetimi tabanlı yeni bir algoritma önermiştir. Önerilen bu algorithmada, büyük çözüm uzayında akıllı araştırma yapan bir mekanizma geliştirilmiştir. Verilen bir çevrim süresi için istasyon sayısının minimize edilmesinin amaçlandığı bu yöntemde iki ana bileşen vardır. Bunların ilki, çözüm üretme modülü, diğeri ise Tavlama Benzetimi modülüdür. Bu algoritmanın diğ. Tavlama Benzetimi algoritmalarından farkı, çevrim süresini gevşeterek esnek çözümler sunmasıdır. Bu çalışma, U-tipi montaj hatları için Tavlama Benzetimi algoritmasının uygulandığı ilk çalışmadır. Sayısal deneyler, önerilen algoritmanın iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Aase ve diğ. (2003), U-tipi montaj hatları için “U-OPT” adını verdikleri bir Dal&Sınır Algoritması geliştirmiştir. Bu yöntemde, üç farklı dallandırma stratejisi ve iki yeni budama kriteri kullanılmıştır. Dört farklı veri seti kullanılarak yöntem test edilmiştir. Sonuçlar, “U-OPT” algoritmasının diğ. yöntemlere göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, “Eşleştirilmiş iş öğeleri” yaklaşımın alt sınır belirlemede önemli bir gelişme sağladığı vurgulanmıştır.

Aase ve diğ. (2004), U-tipi hatların işgücü verimliliği bakımından düz hatlardan daha avantajlı olduğunu göstermek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan testler sonucunda, düz hat yerleşiminden U-tipi hat yerleşimine geçişin ortalama %10’luk bir verimlilik artışı sağladığı tespit edilmiştir. Problem örneklerinin çoğunda, işgücü verimliliği bakımında bir iyileşme tespit edilememiştir. Fakat, azımsanmayacak

kadarında da artış görülmüştür. Eğer, verimlilikte artış sağlanırsa bunun oldukça büyük bir etkisinin olduğu ve %10'nun üzerinde bir iyileşme sağlayabileceği gösterilmiştir.

Gökçen ve diğ. (2005), Basit U-tipi MHD Problemi için En Kısa Yol Problemi yaklaşımıyla yeni bir çözüm yöntemi önermiştir. Bu çalışmada önerilen model, Gutjahr ve Nemhausers'in (1964) düz montaj hatları için geliştirdiği En Kısa Yol Modeli'ne dayanmaktadır. Gökçen ve diğ. (2005) bu çalışmada öncelikle U-tipi hat yerleşiminin avantajlarından bahsetmiş, daha sonra önerilen modeli 7 iş öğeli bir problem için test etmiştir. Bu problem 38 farklı durum türetilerek çözülmüş ve 4 istasyon ile hat dengelenmiştir. Ayrıca, bu problem aynı yöntem kullanılarak düz montaj hatları için de çözülmüş ve 5 istasyon ile hat dengelenmiştir. Böylelikle, U-tipi hat yerleşimine geçildiğinde düz hat yerleşimine göre daha az sayıda istasyon kurularak montaj hattının dengelenebildiği gösterilmiştir.

Erel ve diğ. (2005), U-tipi montaj hatları için Işın Araması (Beam Search) yöntemini esas alan yeni bir dengeleme yöntemi önermiştir. Işın Araması, bir arama ağacı üzerinde çalışan, Dal&Sınır Algoritması'na benzeyen bir yöntemdir. Bu çalışma, MHDP için Işın Araması yaklaşımını öneren ilk çalışmadır. Modelde, iş ögesi sürelerinin stokastik olduğu varsayılmıştır. Önerilen modelde, toplam işgücü maliyeti ve işlerin tamamlanmama maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Gökçen ve Ağpak (2006), basit U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için bir Hedef Programlama modeli geliştirmiştir. Önerilen modelde, Urban'ın (1998) U-tipi hatlar için geliştirdiği tamsayılı programlama modeli ve Deckro ve Rangachari'nin (1990) hedef programlama modeli esas alınmıştır.

Shewchuk (2008), U-tipi montaj hatlarında işgören atama problemi için bir matematiksel model ve bu modele dayanarak bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. İşgören atama probleminde MHD Probleminden farklı olarak, iş öğelerinin istasyonlara önceden atandığı ve hat yerleşiminin sabit olduğu varsayımı vardır. Önerilen modelin amacı, işgören sayısını minimize etmek ve atanan işgörenlerden yararlanma oranını maksimize etmektir. Bu yaklaşım, süreci iyileştirme yoluyla en az yararlanılan işgöreni sistemden çıkarma fırsatı verir. Önerilen algoritmanın performansı küçük (5-9 makine), orta (10-15 makine) ve büyük (15-20 makine) ölçekli

problemler ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın klasik yaklaşımlara göre genel olarak daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Baykasoğlu ve Dereli (2009), Basit ve U-tipi MHD problemlerinin çözümü için Karınca Kolonisi Optimizasyonu(KKO)'nu temel alan bir sezgisel algoritma önermiştir. Önerilen yeni algoritma COMSOAL algoritmasını, Konum Ağırlıklı Sıralama Yöntemini (RPWH) ve KKO'yu birbiriyle entegre ederek oluşturulmuştur. Bu yöntemin amacı, hattın performansını maksimize etmek veya iş istasyonu sayısını minimize etmektir. Önerilen yöntemi test etmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çoğu sonuçta, algoritma optimum çözümü kısa sürede vermiştir. Bu algoritmanın, bazı özel değişikliklerle paralel ve iki yönlü montaj hatları için de kullanılabileceği ve ileriki çalışmalarda algoritmanın stokastik ve karma modellenli montaj hatlar için de geliştirilebileceği belirtilmiştir.

Kara ve Tekin (2009), karışık modellenli U-tipi montaj hatları için karmaşık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Karışık modellenli montaj hatları karmaşık bir yapıya sahip olduğu için, araştırmacılar optimum çözümü elde etmekten ziyade optimuma yakın çözüm bulmaya yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma, karışık modellenli U-tipi MHD Problemi için karmaşık tamsayılı programlama modeli sunan ilk çalışmadır. Modelin amacı, verilen bir model sırası için istasyon sayısını minimize etmektir. Büyük ölçekli problemler için ise Arcus'un (1963) COMSOAL yöntemi esas alınarak bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, önerilen matematiksel modelin geçerli ve kullanışlı bir model olduğunu göstermiştir. Sezgisel algoritmanın ise test edilen problemlerin %91.1'inde optimum çözümü elde edebildiği gösterilmiştir.

Kara ve diğ. (2009), düz ve U-tipi montaj hatları için tamsayılı bulanık hedef programlama modeli önermiştir. Modelde, çevrim süresinin ve istasyon sayısının eş zamanlı olarak minimize edilmesi amaçlanmıştır. Birbiriyle çelişen ama aynı zamanda net olarak belirlenemeyen çevrim süresi ve istasyon sayısı için tamsayılı bulanık hedef programlama yöntemi ile optimum çözüm yerine tatmin edici çözümler elde edilmiştir.

Sabuncuoğlu ve diğ. (2009), tek modellenli U-tipi montaj hatları için Karınca Kolonisi Algoritması geliştirmiştir. Önerilen algoritma, literatürdeki bazı test problemlerine uygulanmıştır. Ayrıca, Scholl'un (1999) ULINO ve Erel ve diğ.'nin (2001) Tavlama

Benzetimi yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Karınca Kolonisi Algoritması'nın Tavlama Benzetimi Algoritması'ndan üstün bir performans sergilediğini, ULINO ile de rekabet edebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Sirovetnukul ve Chutima (2010), tek ve karışık modeli U-tipi montaj hatlarında işgörenlerin yürüme mesafesinin hat dengesine etkisini araştırmak için bir çalışma yapmıştır. En az ortalama işlem süresi kadar bir yürüme süresinin işgören sayısını arttırdığı tespit edilmiştir.

Rabbani ve diğ. (2012), karışık modellenmiş U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için çok amaçlı bir matematiksel model ve sezgisel algoritma önermiştir. Modelde, dengeleme probleminin model sırasından bağımsız olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada, geçişli istasyon sayısının minimize edilmesi ve hat etkinliğinin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak, küçük ve orta ölçekli problemler için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model, Lingo 8.0 yazılımı kullanılarak Thomopoulos'un (1970) test problemi için uygulanmış ve optimum çözümü 2 saatte elde etmiştir. Büyük ölçekli problemleri çözmek için ise Genetik Algoritma tabanlı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen algoritma MATLAB'de kodlanarak literatürdeki bilinen bazı problemler için uygulanmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin kabul edilebilir işlem süresi içinde iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Avikal ve diğ. (2013), Basit ve U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için Kritik Yol Metodu (CPM) esaslı bir yaklaşım önermiştir. Önerilen sezgisel, Yeh ve Kao (2009) tarafından sunulan sezgiselin değiştirilmiş halidir. Yeh ve Kao (2009) tarafından önerilen algoritmada, işler hattın sonundan farklı istasyonlara atanabilirdi ama bu işler hem hattın hem de öncelik diyagramının sonundan aynı istasyonlara atanamazdı. Önerilen sezgiselde bu kısıt kaldırılmıştır. Önerilen sezgisel, ihtiyaç duyulan minimum istasyon sayısını azaltma yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda işgörenlerin verimlilik seviyesini iyileştirmiştir.

Zha ve Yu (2014), U-tipi montaj hatlarının yeniden dengelenmesi problemi için, Karınca Kolonisi Algoritması ve filtrelenmiş Işın Araması yöntemini birleştirerek yeni bir hibrit sezgisel algoritma geliştirmiştir. Tam Zamanında Üretim(TZÜ) ilkesine göre, talep miktarı değiştikçe israfı önlemek ve üretim verimliliğini arttırmak için montaj hattının yeniden dengelenmesi gerekir. Eğer, makinaların yerleri değiştirilebiliyorsa,

bu bir dengeleme problemine dönüşür. Bazı makinalar ise sabittir ve belli taşıma maliyetleri vardır. Bu çalışmada, makinaların taşınma maliyetini ve işgücü maliyetini minimize etmek amacıyla hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca, algorithmada işgörenlerin yürüme süresi de dikkate alınmıştır.

3.2.2 İşgören faktörü dikkate alınarak Montaj Hatlarının Dengelenmesi

Chakravarty (1988), iş öğeleri için öğrenme etkisini (learning effect) dikkate alan bir montaj hattı dengeleme çalışması yapmıştır. Chakravarty, montaj hatlarında öğrenme etkisi dikkate alınmazsa zamanla iş ögesi süreleri azalacağı için hat dengesinin bozulacağını vurgulamıştır. Önerilen yöntem, bilgisayarla benzetim tekniği kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar, öğrenme etkisi dikkate alındığı durumdaki toplam boş sürenin, öğrenme etkisi dikkate alınmadığı duruma göre daha az olduğunu göstermiştir.

Nakade ve Ohno (2003), çok fonksiyonlu çok sayıda işgörenin olduğu U-tipi montaj hatlarını dikkate alan bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, her işgörenin birden çok makinada iş görebildiği varsayılmıştır. İşgören atama problemi için ayrık ve atlıkarınca tipi atama olarak iki farklı yaklaşım ele alınmıştır. Ayrık atamaya göre, her bir işçi sadece belli bir makine kümesinde görev alır. Atlıkarınca tipi atamaya göre ise, tüm işgörenler tüm makinalarda aynı rota üzerinde görev alır. Yazarlar, bu iki yaklaşımı dikkate alarak çevrim süresi için bazı alt ve üst sınırlar türetmiştir. İşlem ve yürüme süresi sabit kabul edildiği zaman, atlıkarınca tipi işgören dağıtım yapıları ile ayrık dağıtıma göre daha az bir çevrim süresi ile hattın dengelenebileceği gösterilmiştir.

Corominas ve diğ. (2008), bir motosiklet montaj hattında yeniden dengeleme çalışması için “tecrübeli ve tecrübesiz” işgörenleri dikkate alan bir çalışma yapmıştır. Bu hattın 3 özelliği vardır;

- i. Şirket geçici işgören istihdam ediyor ve bu işgörenler verilen görevleri sürekli işgörenlere göre daha fazla sürede gerçekleştiriyor.
- ii. Bir tecrübesiz işgörenin yanında en az bir tecrübeli işgören bulundurulmak zorundadır.
- iii. Bazı iş grupları birbiriyle uyumlu değildir. (Temiz-kirli el işleri)

Bu problem, bir tamsayı programlama yöntemi ile modellenmiştir. Modelde, verilen bir çevrim süresi ve iş grubu için gerekli olan geçici işgören sayısını minimize etmek amaçlanmıştır. Elde edilen çözüm ile daha önce 12 sürekli, 4 geçici işgören ile dengelenen hat, bu yöntem uygulandıktan sonra 12 sürekli, 2 geçici işgören ile dengelenebilmiştir.

Toksarı ve diğ. (2008), Basit ve U-tipi montaj hatlarında öğrenme etkisini dikkate alan bir çalışma yapmıştır. Öğrenme etkisine göre, bir ürünün aynısı veya benzeri tekrar tekrar yapıldıkça o ürünün işlem süresi zamanla azalma eğilimi gösterir. Bu nedenle, kitle üretimin yapıldığı montaj hatlarında öğrenme etkisi dikkate alınmalıdır. Sayısal testler, üretim miktarı ve çevrim süresi arttıkça montaj hatlarında öğrenme etkisinin daha etkili olduğunu göstermiştir.

Zaman ve diğ. (2012), montaj hatlarında önceden belirlenmiş iş istasyonlarına işgörenlerin dengeli bir şekilde atanması için Genetik Algoritma tabanlı bir yöntem önermiştir. Gerçek hayattaki montaj hatları için, işgörenin dikkate alınmadığı çalışmaların uygulanabilir ve sürdürülebilir olmadığı vurgulanmış, insan faktörünün verimliliği arttırmak ve maliyeti azaltmak için önemli bir faktör olduğu ifade edilmiştir. Bu yöntemde, işlerin istasyonlara daha önceden atandığı varsayılmıştır. Her işgörenin her makineyi kullanabildiği varsayımı esnetilmiş, operasyon yeteneğinin makinalara bağlı olarak değişebileceği ifade edilmiştir. Bu yöntem, bir örnek üzerinde denenmiş ve sonuçlar verimlilik açısından ortalama %16 artış, çevrim süresinde ortalama %15 azalma ve ortalama toplam boş sürede %47 azalma sağlandığını göstermiştir.

Manavizadeh ve diğ. (2013), karışık modelli U-tipi montaj hatları için bir Tavlama Benzetimi algoritması geliştirmiştir. Manavizadeh ve diğ. bu çalışmada insan faktörünü dikkate almış ve işgücü maliyetini minimize etmek için işgücü etkinliğine dayanan yeni bir matematiksel model önermiştir. Bu modelde, işgörenler sürekli ve geçici olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Bu iki sınıftaki işgörenlerin hem normal hem de fazla mesai sürelerinde çalışabildikleri varsayılmıştır. Bu problemi çözmek için 3 aşamadan oluşan bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. İlk olarak, minimum sayıda istasyon kurmak amacıyla montaj hattı dengelenmiştir. Daha sonra, işgörenler niteliklerine göre iş istasyonlarına atanmıştır. Son olarak, yarı mamul stokunu dengelemek için Kanban sistemini esas alan bir uyarı sistemi tasarlanmıştır. Modeli

test etmek için, küçük ölçekli 5 problem, GAMS yazılımı kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tavlama Benzetimi algoritması kullanılarak elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Tavlama Benzetimi ile elde edilen çözümlerin daha tutarlı olduğunu göstermiştir. Önerilen algoritmanın etkinliğini test etmek için, büyük ölçekli 7 problem çözülmüştür. Bu problemlerden elde edilen sonuçlar, algoritmanın etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Krishnan ve diğ. (2013), montaj hatlarında istasyonların işlem sürelerinin işgücü yoğunluklu imalat sistemlerinde deterministik olmadığını ifade etmiş ve işlem sürelerinin değişken olduğu bir dengeleme yöntemi önermiştir. Bu amaçla geliştirilen model, daha sonra işgören atama problemiyle birleştirilmiş ve eş zamanlı bir dengeleme yöntemi sunulmuştur. Modelde, işgörenlerin işleri farklı işlem sürelerinde gerçekleştirdiği ve kalite seviyelerinin birbirlerinden farklı olduğu varsayılmıştır. Önerilen modelin amacı, istasyon sayısı belli iken istasyonlardaki iş yükünü dengelemek ve işgörenlerin işlem süreleri ve kalite seviyelerinden kaynaklanan riski minimize etmektir. Bu amaçla, 9 iş ögesi ve 6 işgörenden oluşan bir örnek problem üzerinde model test edilmiş ve Konum Ağırlıklı Sıralama Yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen modelin deterministik yöntemle göre daha etkili ve verimli olduğunu göstermiştir.

Otto ve Otto (2014), montaj hatlarında öğrenme etkisini dikkate alan bir çalışma yapmıştır. Öğrenme etkisine göre, bir iş tekrar tekrar yapıldıkça, o işin süresi tekrar sayısına bağlı olarak düzenli bir şekilde azalma gösterir. Her işin süresi, belli bir tekrar sayısına ulaşınca durağanlaşır. Öğrenme etkisini dikkate alan klasik MHD çalışmalarında, her işin öğrenme eğrisinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Otto ve Otto, bu varsayımı kaldırarak her işin öğrenme eğrisinin farklı olacağını belirtmiş ve bu problem için karmaşık tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Bu modelde, hem istasyon sayısının minimize edilmesi hem de öğrenme sürecinin kısaltılması amaçlanmıştır. Yapılan testler sonucunda, bu modelin uygulanması halinde öğrenme sürecinin %10 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir.

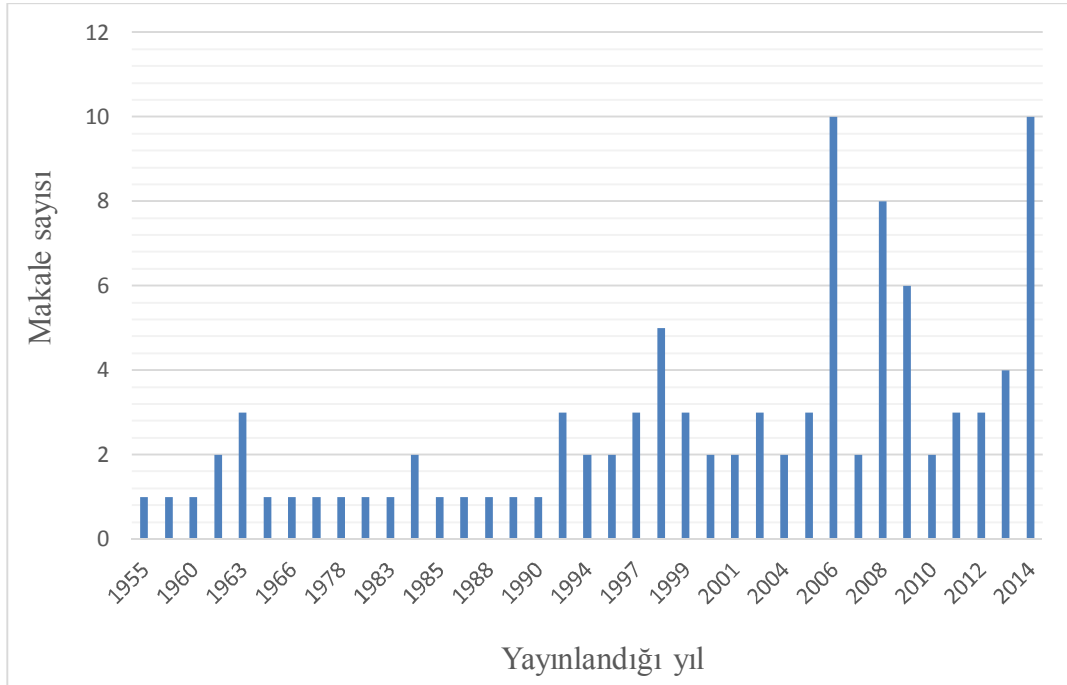
Öksüz ve Satoğlu (2014), tek modellenli U-tipi montaj hatlarında işgören performansını dikkate alan sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada, işgörenler performanslarına göre çok yetenekli, yetenekli, gelişmekte ve deneyimsiz olarak 4 sınıfa ayrılmış ve bunların performans seviyeleri sırasıyla 0.75, 1, 1.25 ve 1.5 olarak

belirlenmiştir. Performans seviyelerinin her iş ögesi için aynı olduğu ve daha önceden bilindiği varsayılmıştır. Sezgisel algoritma, 5 iş ögesi ve 3 işgörenden oluşan örnek bir problem üzerinde test edilmiş ve sonuçlar önerilen yöntem ile klasik duruma göre daha gerçekçi ve iyi bir performans elde edilebildiğini göstermiştir.

3.3 Literatürün Analizi

3.3.1 Yıllara göre MHDP çalışmaları

Montaj Hattı Dengeleme Problemi ilk kez 1955 yılında Salveson tarafından çalışılmış ve günümüze kadar bu konuda araştırmacılar çok sayıda çalışma yapmıştır. Literatür çalışmasında incelenen makalelerin yıllara göre dağılımı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



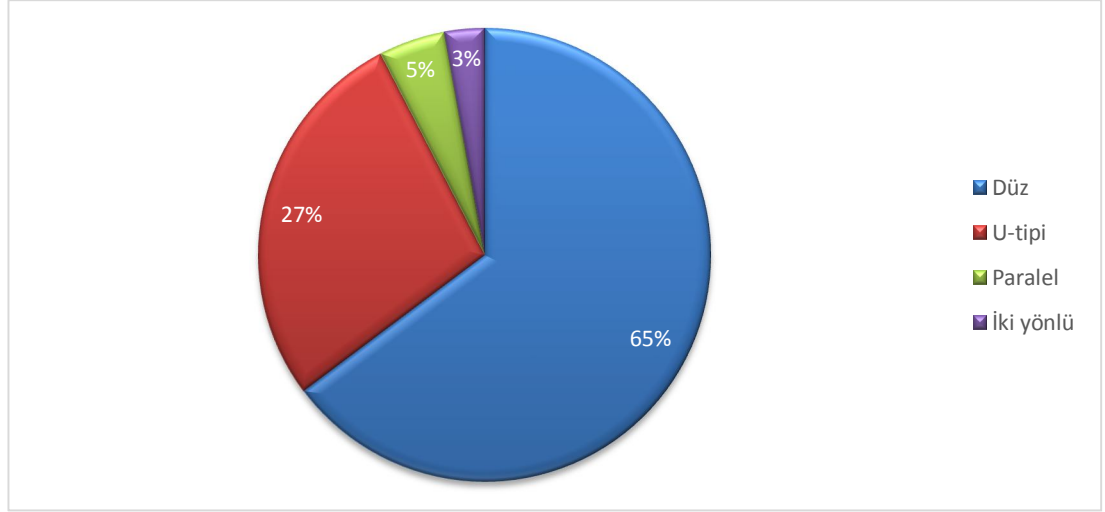
Şekil 3.1 : Yıllara göre MHDP çalışmaları.

Son yıllarda, MHDP için farklı bakış açılarıyla ve çözüm öneriyle çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Literatürdeki çoğu çalışma gerçek hayat problemleri için yetersiz kaldığı için son yıllarda araştırmacılar daha gerçekçi ve uygulanabilir çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır.

3.3.2. Hattın yerleşim tipine göre MHDP çalışmaları

Montaj hatları genel olarak Düz/I-tipi, U-tipi, Paralel ve İki yönlü olmak üzere 4 farklı şekilde tasarlanır. S-tipi, dairesel, rastsal hatlar gibi nadir olarak kullanılan hatlar da

olmasına rağmen literatürde bu dört yerleşim tipi ele alınmaktadır. Şekil 3.2’de literatürde incelenen çalışmaların hattın yerleşim tipine göre çalışılma oranları verilmiştir.



Şekil 3.2 : Hattın yerleşim tipine göre MHDP çalışmaları.

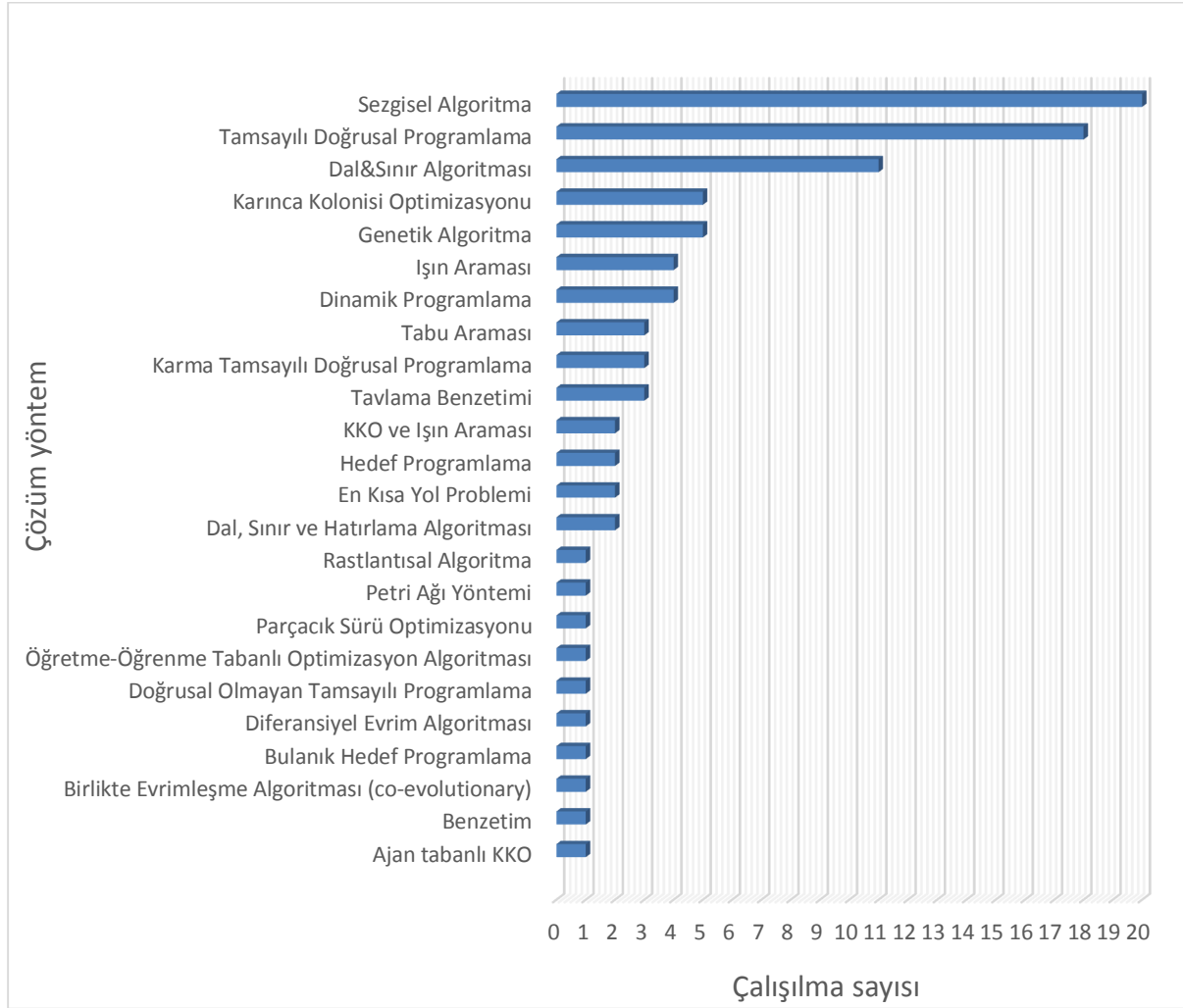
Şekil 3.2’de görüldüğü gibi literatürde en çok çalışılan hat tipi düz hatlardır. Bunun nedenlerinde biri U-tipi hatların literatüre 1994 yılından itibaren girmiş olmasıdır (Miltenburg ve Wijngaard, 1994). Diğer bir neden ise, diğer hat şekilleri için montaj hattı dengeleme çalışmalarının zorluk seviyesinin düz hatlara göre daha fazla olmasıdır. Çünkü, bu tür hatlarda ek kısıtların da dikkate alınması gerekmektedir.

Tam Zamanında Üretim (TZÜ) ilkesinin kabul görmeye başlamasıyla üretimde U-tipi hatlara geçiş başlamış ve hızla artmıştır. Bu nedenle bu yıllardan itibaren yapılan çalışmalar U-tipi hatlar üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca, paralel ve iki yönlü montaj hatları için son yıllarda çalışmalar yapılmaktadır.

3.3.3 Çözüm yöntemine göre MHDP çalışmaları

Montaj Hattı Denge Problemi için bugüne kadar araştırmacılar tarafından pek çok yöntem önerilmiştir. Literatürde MHD Problemi için en çok başvurulan yöntem sezgisel algoritmalarıdır. Bu yöntemi matematiksel modeller takip etmektedir. Matematiksel modeller optimum çözümün elde edilebildiği yöntemlerdir, fakat problemin boyutu arttıkça modelin çözüm süresi artmakta ve çözüm bulmak zorlaşmaktadır. Bu nedenle, büyük boyutlu problemler için optimum çözümü garanti

etmeyen sezgisel algoritmalar önerilmektedir. Şekil 3.3'te MHDP çalışmalarında önerilen çözüm yöntemlerinin çalışılma sayısına göre dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Çözüm yöntemine göre MHDP çalışmaları.

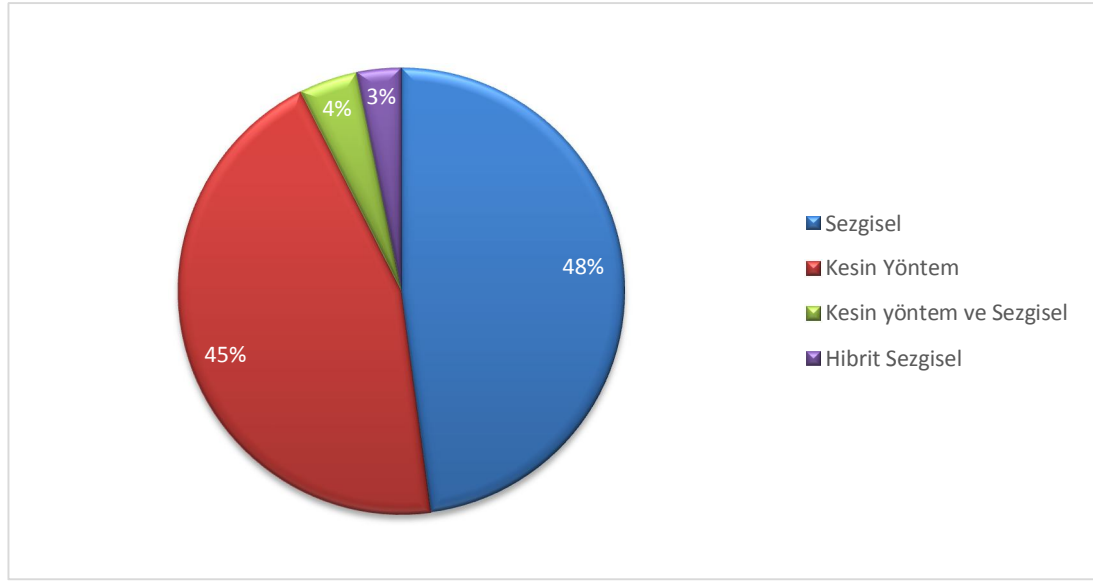
Şekil 3.3'te görüldüğü gibi önerilen çözüm yöntemlerinin çoğunluğunu Sezgisel Algoritma, Tamsayılı Doğrusal Programlama ve Dal&Sınır Algoritması oluşturmaktadır. Son yıllarda, meta-sezgisel algoritma olarak adlandırılan Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO), Genetik Algoritma, Işın Araması, Tavlama Benzetimi, Tabu Araması gibi yöntemlerin önerildiği çalışmalara da sıkça rastlanmaktadır. Bununla birlikte, daha iyi bir çözüm elde edebilmek için iki sezgisel algoritmanın bir arada kullanıldığı (hibrit sezgisel) yöntemlere de rastlanmaktadır.

Literatürde MHDP için farklı çözüm yaklaşımları geliştirilmeye devam edilmektedir. MHDP için son yıllarda önerilen yeni yaklaşımlara Parçacık Sürü Optimizasyonu,

Bulanık Hedef Programlama, Birlikte Evrimleşme Algoritması (co-evolutionary), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması ve Petri Ağı Yöntemi örnek verilebilir.

3.3.4 Önerilen yöntemin türüne göre MHDP çalışmaları

Literatürde incelenen makaleler sezgisel, kesin yöntem, kesin yöntem ve sezgisel, hibrit sezgisel olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır. Bu yöntemlerin çalışılma oranları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Önerilen yöntemin türüne göre MHDP çalışmaları.

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi Sezgisel ve Kesin yöntemler MHDP'de en çok önerilen yöntemlerdir. Tamsayılı Doğrusal Programlama, Dal&Sınır Algoritması ve Dinamik Programlama gibi yöntemler kesin çözümün elde edilebildiği yöntemlerdir. Büyük boyutlu problem için daha çok sezgisel algoritmalar önerilmektedir. Küçük boyutlu problemler için optimum çözümü garantileyen kesin bir yöntem ve bu yöntem temel alınarak büyük boyutlu problemler için geliştirilen sezgisel algoritmaların bir arada sunulduğu çalışmalar da bulunmaktadır. Ayrıca, literatürde hibrit sezgisel olarak adlandırılan KKO ve Işın Araması gibi iki sezgiselin birlikte kullanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır.

4. İNSAN FAKTÖRÜ DİKKATE ALINARAK U-TİPİ MHD

Manuel montaj hatlarında insan (işgücü) faktörü büyük bir öneme sahiptir. Özellikle, bir işgörenin birden fazla istasyonda görev alabildiği U-tipi montaj hatlarında işgücünün önemi artmaktadır. Ayrıca, işgören sayısını arttırıp veya azaltarak üretim hızının belirlenebildiği bu hatlarda, işgücü faktörü göz önünde bulundurulması gereken bir unsurdur.

Manuel veya yarı otomatik bir montaj hattında dengeleme yapılırken insan faktörü göz önünde bulundurulmalıdır. Buna rağmen, literatürde insan faktörü dikkate alınarak yapılan montaj hattı dengeleme çalışması oldukça azdır. Bunlardan bazıları;

- Öğrenme etkisi (learning effect) (Costa ve Miralles, 2009; Toksarı ve diğ, 2008; 2010),
- Operatörlerin fiziksel gücü ve karşılaştıkları riskler (Choi, 2009; Otto ve Scholl, 2011; Xu ve diğ, 2012),
- Yorgunluk (Digisei ve diğ, 2009),
- İşgörenlerin yeteneği (Miralles ve diğ, 2007, 2008; Wong ve diğ, 2006) gibi faktörlerdir.

İnsan faktörünün dikkate alındığı çalışmaların çoğunda, işgücü yoğunluklu montaj hatlarında işlem sürelerinin değişken olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle işlem sürelerinin stokastik kabul edildiği yöntemler önerilmiştir. Bu yaklaşımda her ne kadar gerçekliğe yaklaşılsa da işgörenlerin performansı dikkate alınmamaktadır.

İnsan faktörü ile alakalı bir diğer faktör ise öğrenme etkisidir. Öğrenme etkisine göre, bir iş tekrar tekrar yapıldıkça, o işin süresi tekrar sayısına bağlı olarak düzenli bir şekilde azalma gösterir. Her işin süresi, belli bir tekrar sayısına ulaşıncaya kadar duraklanır. (Chakravarty, 1988). Öğrenme etkisi dikkate alınarak yapılan montaj hattı dengeleme çalışmalarında iki farklı yaklaşım vardır. İlk yaklaşıma göre, her işin öğrenme eğrisi aynı kabul edilmiştir (Chakravarty, 1988). Diğer yaklaşımda ise, her işin öğrenme

eğrisinin birbirinden farklı olduğu kabul edilmiş ve çözüm yöntemleri önerilmiştir (Otto ve Otto 2014).

Corominas ve diğ. (2008), bir motosiklet montaj hattında yeniden dengeleme çalışması için işgörenleri “tecrübeli ve tecrübesiz” olarak iki sınıfa ayırmış ve bu problem için tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir.

Literatürde, Montaj Hattı Dengeleme Problemi için doğrudan işgören performansının dikkate alındığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

4.1 İşgören Performansı Dikkate Alınarak Montaj Hattı Dengeleme

İşgören performansı manuel montaj hatlarında dikkate alınması gereken önemli bir insan faktörüdür. Bunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- İşgörenlerin her bir işi gerçekleştirme süresi birbirinden farklıdır (İşgören performansı).
- Aynı işin farklı işgörenler tarafından gerçekleştirilme süreleri birbirinden farklıdır (İşgörenler arasındaki performans farklılığı).
- Her işgören her işi gerçekleştiremeyebilir.
- Bir işgören bir işi tekrar tekrar gerçekleştirdikçe, işgörenin o işi gerçekleştirme süresi zamanla azalmakta ve belli bir süreden sonra durağanlaşmaktadır. (Öğrenme etkisi).

İşgörenlerin performansı yaş, cinsiyet, kişisel zekâ ve beceri, fiziksel özellikler, deneyim gibi faktörler nedeniyle birbirinden farklılık göstermektedir. Deneyimli bir işgören deneyimsiz bir işgörene göre bazı işleri daha hızlı yapabilmekte, diğer bir yandan deneyimsiz işgören bir işi deneyimli işgörenden daha hızlı yapabilmektedir. Bu ve buna benzer durumların bir sonucu olarak işgörenlerin performansı her işe göre değişebilmektedir.

Dezavantajlı kişilerin çalıştığı veya işgörenlerden bazılarının dezavantajlı kişilerden oluştuğu bir montaj hattında, performans faktörü farklı bir önem arz etmektedir. Bu hatlarda, dezavantajlı işgörenler bazı işleri yapamamakta ve performans farklılıkları daha fazla gözlenmektedir. Ayrıca, montaj hatlarında deneyimsiz işgörenlerin gerçekleştiremediği veya özel yetenek gerektiren işler de vardır. Böyle durumlarda,

her işgörenin her işi gerçekleştiremediği kısıtlı dengeleme probleminde dikkate alınmalıdır.

İşgörenlerin performansı dikkate alınmadan dengelenen bir montaj hattında zamanla bu denge bozulacak ve bazı sorunlar ortaya çıkacaktır. Bu sorunlara aşağıdaki durumlar örnek verilebilir:

- İstasyon boş sürelerinin artması.
- İstasyonun toplam işlem süresinin çevrim süresini aşması.
- İşgörenlerde iş tatminsizliği.
- Kapasite kullanım oranının azalması.
- İşgörenlerden yararlanma seviyesinin düşmesi.
- İstasyonlarda beklemeden kaynaklanan yarı mamul stoklarında artış.
- Ürünlerin kalite düzeyinde farklılık.
- Taleplere zamanında karşılık verememek ve müşteri memnuniyetsizliği
- Maliyetlerde artış.

4.2 Matematiksel Model

İşgören performansı dikkate alınarak U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Urban'ın (1998) U-tipi montaj hatları için önerdiği Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli temel alınarak yeni bir Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli geliştirilmiştir. Bu modelde, literatürde olmayan bazı kısıtlar eklenmiş ve bazı kısıtlarda işgören performansı dikkate alınarak değişiklikler yapılmıştır.

İşgören performansı dikkate alınarak U-tipi MHDP modelindeki varsayımlar şunlardır:

Genel varsayımlar:

- İş öğeleri süreleri deterministiktir.
- Tüm girdi parametreleri belirlidir.
- Tek bir ürünün yığın üretimi vardır.
- Hattın tasarımı U-tipi şeklindedir.
- Çevrim süresi sabit tempolu (paced) bir hat vardır.
- Bir iş ögesi birden fazla iş istasyonu arasında paylaştırılamaz.
- İş öğeleri arasındaki işlem sırası öncelik ilişkilerine bağlıdır.

- İş öğeleri hattın başından ve sonundan istasyonlara atanabilirler.
- Tüm istasyonlara makinalar ve işgörenler tahsis edilmiştir.
- Makine ve ekipman arızaları ihmal edilmiştir.
- İşgörenlerin yürüme mesafesi ihmal edilmiştir.
- Her iş ögesi yapılmalıdır.
- Her istasyon her iş ögesi için uygun donanıma sahiptir.

İşgören varsayımları:

- İşgörenlerin her bir işi gerçekleştirme süresi birbirinden farklıdır.
- Aynı işin farklı işgörenler tarafından gerçekleştirilme süreleri birbirinden farklıdır.
- Her işgören her işi gerçekleştiremeyebilir.
- Bir iş ögesi yalnızca bir işgören tarafından gerçekleştirilir.
- Bir işgören yalnızca bir istasyona atanabilir.
- Bir istasyona birden fazla işgören atanamaz.
- En az, istasyon sayısı kadar işgören mevcuttur.
- İşgörenlerin performans katsayıları önceden bilinmektedir.
- Performans katsayısı ile iş ögesi süresi çarpılarak söz konusu işgörenin o iş ögesini gerçekleştirme süresi bulunur.

Önerilen modelde kullanılan notasyonlar aşağıdaki gibidir:

- i : İş ögesi indisi.
- j : İstasyon indisi.
- t_i : i iş ögesinin standart işlem süresi.
- n : Toplam görev sayısı.
- m_{max} : Gerekli olan en fazla istasyon sayısı.
- C : Çevrim süresi (cycle time).
- w : İşgören indisi.
- P_{iw} : w. işgörenin i. iş için performans katsayısı.
- W_j : j. iş istasyonuna atanabilecek iş ögelerinin kümesi.

$||W_j||$: W_j kümesinin eleman sayısı.

$L(r,s)$: Öncelik ilişkilerini gösteren düzenlenmiş iş çiftlerinin kümesi (r işlemi s işleminden hemen önce gelmektedir).

Karar değişkenleri:

A_{jw} : j . iş istasyonuna w . işgörenin atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

x_{ij} : Orijinal öncelik diyagramında i . işin j . istasyona atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

y_{ij} : Hayali öncelik diyagramında i . işin j . istasyona atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

z_j : j . iş istasyonunun kurulması durumunda 1, diğer durumlarda 0.

4.2.1 Amaç fonksiyonu

İşgören performansı dikkate alınarak geliştirilen modelde, istasyon sayısının minimizasyonu ve işgören atamasının optimizasyonun eşzamanlı olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, minimum istasyon sayısı ile hat dengelenecek şekilde işgörenlerin atanması sağlanmaktadır.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^{m_{\max}} z_j \quad (4.1)$$

4.2.2 Kısıtlar

Atama kısıtı:

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, n] \quad (4.2)$$

Atama kısıtı, her bir iş ögesinin ya orijinal ya da hayali diyagramda sadece bir istasyona atanmasını sağlar.

Cevrim süresi kısıtı:

$$\sum_{i=1}^n t_i p_{iw} (x_{ij} + y_{ij}) A_{jw} \leq C \quad [j = 1, 2, \dots, n] \quad (4.3)$$

Çevrim süresi kısıtı, işgören performansı dikkate alınarak her bir istasyona atanan iş öğelerinin işlem sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmamasını sağlar. Urban'ın (1998) modelindeki çevrim süresi kısıtı işgörenlerin performansı dikkate alınarak modifiye edilmiştir. P_{iw} değişkeni ile işgörenlerin performans katsayıları modele eklenmiştir. A_{jw} ikili değişkeni ile j. istasyona w. işgörenin atanması durumunda bu kısıtın geçerli olması sağlanmıştır, aksi durumda eşitliğin sol tarafı 0 (sıfır) olacağı için bu kısıt daima sağlanacaktır.

Öncelik kısıtı:

U-tipi montaj hatlarında, iş öğeleri hattın hem başından hem de sonundan ilgili istasyonlara atanabildiği için iki farklı öncelik kısıtı kullanılmaktadır (Urban, 1998).

Orijinal diyagram için;

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (m_{\max} - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.4a)$$

Hayali diyagram için;

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} (m_{\max} - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.4b)$$

Öncelik kısıtı ile iş öğeleri arasındaki işlem sırasının yani öncelik ilişkilerinin dikkate alınması sağlanır.

İş istasyonu kısıtı:

İş istasyonu kısıtı, her iş istasyonu için, o iş istasyonuna atanabilecek iş öğeleri dikkate alınarak atama yapılmasını sağlar. Bu kısıt, Decro (1989) tarafından klasik MHDP için geliştirilen, Gökçen ve Ağpak'ın (2006) U-tipi hatlar için modifiye ettiği iş istasyonu kısıtıdır.

$$\sum_{i \in W_j} (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| \cdot Z_j \leq 0 \quad [j = 1, 2, \dots, n] \quad (4.5)$$

İşgören-İstasyon kısıtları:

Literatürde bulunmayan aşağıdaki üç kısıt işgören ve istasyonlar arasındaki atama ilişkilerini düzenlemek için modele eklenmiştir.

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} A_{jw} \leq 1 \quad [w = 1, 2, \dots, m_{\max}] \quad (4.6a)$$

$$\sum_{w=1}^{m_{\max}} A_{jw} \leq 1 \quad [j = 1, 2, \dots, m_{\max}] \quad (4.6b)$$

$$Z_j - \sum_{w=1}^{m_{\max}} A_{jw} = 0 \quad [j = 1, 2, \dots, m_{\max}] \quad (4.6c)$$

Kısıt 4.6a, her istasyona yalnızca bir işgörenin atanmasını sağlar. Kısıt 4.6b, her işgörenin yalnızca bir istasyonuna atanmasını garantiler. Kısıt 4.6c ise bir istasyona işgören atandığında o istasyonun kurulması gerektiğini ifade eder.

0-1 Kısıtları:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{orijinal diyagramda i. işin j. istasyona atanması durumunda,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

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

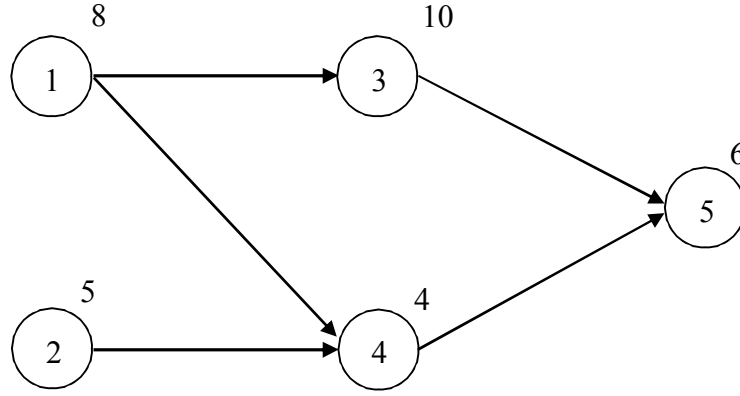
$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{j. istasyondan yararlanılması durumunda,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$A_{jw} = \begin{cases} 1, & \text{w. işgörenin j. istasyona atanması durumunda,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

5. UYGULAMA ÇALIŞMASI

5.1 Test Problemi-1

Modelin geçerliliğini ve uygulanabilirliğini test etmek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. 5 iş ögesi ve 5 işgörenden oluşan tek modelli bir U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için model uygulanmış ve test edilmiştir. Çevrim süresi 10 dk/ürün olarak alınmıştır. İş ögelerinin işlem süreleri ve öncelik ilişkileri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : 5 iş ögesi için öncelik diyagramı.

İşgörenlerin her bir iş ögesi için performans katsayıları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Test1-İşgörenlerin katsayıları değerleri.

$i \backslash w$	1	2	3	4	5
1	0.7	1.1	0.85	1.3	1.25
2	0.75	1.2	0.75	1.4	1.0
3	0.6	1.0	1.0	1.25	0.9
4	0.5	1.25	0.9	1.45	0.75
5	0.65	1.05	0.7	1000	0.85

Çizelge 5.1’de i iş ögesini, w ise işgöreni temsil etmektedir. Performans katsayıları, işgörenlerin her bir iş için işlem hızlarını ifade etmektedir. Bir işi standart işlem süresinde gerçekleştiren işgörenin, o iş için performans katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla, herhangi bir iş için 1’den küçük bir performans katsayısına sahip olan işgörenin o işi standart işlem süresinden daha önce bitirdiği varsayılmaktadır. Örneğin; 1. işgörenin 2. iş ögesi için performans katsayısı 0.75’tir. Bu, 1. işgörenin 2. işi standart işlem süresinden %25 daha hızlı gerçekleştirdiği anlamına gelmektedir.

Her işgörenin her iş için performans katsayısı birbirinden farklı olduğu için, hangi işgörenin hangi istasyona atacağı kararı dengeleme problemini zorlaştırmaktadır. Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi, 1. işgörenin performans katsayısı tüm işler için 1’in altındadır. Bu durumda, 1. işgörenin kalifiye bir işgören olduğu söylenebilir. Benzer şekilde, 4. işgörenin tecrübesiz veya dezavantajlı bir işgören olduğu söylenebilir. 4. işgörenin 5. iş ögesi için performans katsayısı 1000 olarak gösterilmiştir. Bunun nedeni, 4. işgörenin 5. iş ögesini gerçekleştirebilecek yetenek veya özelliğe sahip olmamasıdır. Böylelikle, matematiksel modelde 5. iş 4. işgörene atanamayacaktır.

Çizelge 5.1’e bakılarak her bir iş ögesinin hangi işgören tarafından en hızlı gerçekleştirileceği görülebilir. Fakat, montaj hatlarında genellikle bir istasyona birden fazla iş ögesi atandığı için, dengeleme çalışması yapılırken olası tüm atamaların dikkate alınması gerekmektedir.

5.1.1 Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli

5 iş ögesi ve 5 işgörenden oluşan tek modelli U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^5 Z_j \quad (4.7)$$

Atama kısıtı:

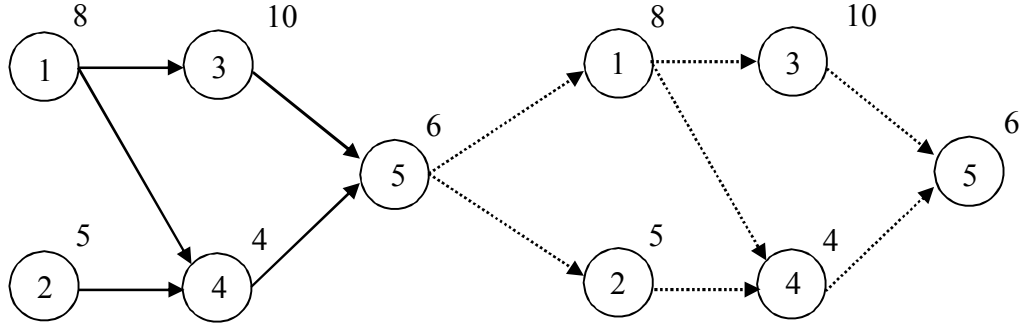
$$\sum_{j=1}^5 (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.8)$$

Cevrim süresi kısıtı:

$$\sum_{i=1}^5 t_i P_{iw} (x_{ij} + y_{ij}) A_{jw} \leq 10 \quad \left(\begin{array}{l} [j = 1, 2, \dots, 5] \\ [w = 1, 2, \dots, 5] \end{array} \right) \quad (4.9)$$

Öncelik kısıtı:

U-tipi montaj hatlarında iş öğeleri, düz montaj hatlarından farklı olarak hattın hem başından hem de sonundan istasyonlara atanabilmektedir. Örneğin; U-tipi bir montaj hattında ilk ve son iş öğeleri aynı istasyona atanabilir. Bu nedenle, öncelik kısıtları belirlenirken, orijinal öncelik diyagramına hayali öncelik diyagramı da eklenmeli ve öncelik kısıtları birleştirilmiş öncelik diyagramı dikkate alınarak belirlenmelidir. Şekil 5.2’de 5 iş öğeli problem için birleştirilmiş öncelik diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.2 : Birleştirilmiş (orijinal ve hayali) öncelik diyagramı.

Orijinal diyagram için;

$$\sum_{j=1}^5 (5 - j + 1) (x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.10a)$$

$$L(r, s) = \{(1, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 5), (4, 5)\}$$

Hayali diyagram için;

$$\sum_{j=1}^5 (5 - j + 1) (y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.10b)$$

$$L(s, r) = \{(5, 4), (5, 3), (4, 2), (4, 1), (3, 1)\}$$

İş istasyonu kısıtı:

$$\sum_{i \in W_j} (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| \cdot Z_j \leq 0 \quad [j = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.11)$$

$$\|W_1\| = 5, \quad \|W_2\| = 5, \quad \|W_3\| = 5, \quad \|W_4\| = 5, \quad \|W_5\| = 5$$

İşgören kısıtı:

$$\sum_{j=1}^5 A_{jw} \leq 1 \quad [w = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.12a)$$

$$\sum_{w=1}^5 A_{jw} \leq 1 \quad [j = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.12b)$$

$$Z_j - \sum_{w=1}^5 A_{jw} = 0 \quad [j = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.12c)$$

0-1 kısıtları:

$$x_{ij}, y_{ij}, Z_j, A_{jw} = 0 \text{ veya } 1$$

5.1.2 Sonuçlar

5 iş ögesi ve 5 işgörenden oluşan tek modelli U-tipi MHDP için Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli oluşturulmuştur.

Bu model GAMS (General Algebraic Modeling System) modelleme sisteminin BARON (Branch-And-Reduce Optimization Navigator) çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve optimum çözüm elde edilmiştir.

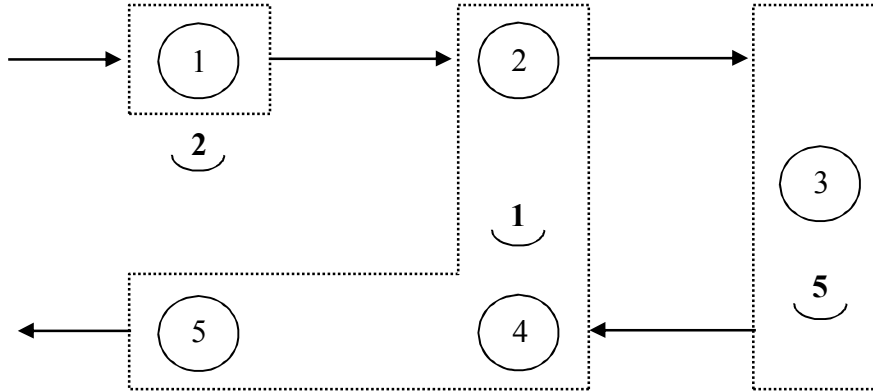
Optimum çözüm, i7-4500U CPU 1.8 Ghz işlemcili kişisel bir bilgisayarda 15.7 sn'de elde edilmiştir.

Atama sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Test1:İş ögesi-işgören-istasyon atamaları.

$\begin{matrix} i \\ \backslash \\ w \end{matrix}$	1	2	3	4	5
1		+			
2	+				
3					+
4	+				
5	+				
j	2	1	-	-	3

Optimum çözüm sonucunda montaj hattının yerleşimi Şekil 5.3'teki gibi olacaktır.



Şekil 5.3 : Test1-Montaj hattının yerleşimi.

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.3'te görüldüğü gibi montaj hattı 3 istasyon kurularak dengelenmiştir. 1. iş 1. istasyonda 2. işgören tarafından gerçekleştirilmekte, 2,4 ve 5. işler 2. istasyonda 1. işgören tarafından gerçekleştirilmekte ve 3. iş 3. istasyonda 5. işgören tarafından gerçekleştirilmektedir. 1. istasyonun işlem süresi 8.8 dk, 2. istasyonun işlem süresi 9.65 dk, 3. istasyonun işlem süresi 9 dk bulunmuştur. İstasyonlardaki toplam boş süre ise 2.55 dk'dır.

Urban'ın (1998) gerekli olan minimum istasyon sayısını bulmak için önerdiği formülasyon, bu probleme işgörenlerin performans faktörü de dâhil edildiği için geçerli olmamaktadır. Bu formülasyona göre bu problem için teorik olarak en az;

$[\sum_i^n t_i / C]^+ = [33/10]^+ = 4$ istasyon kurulması gerekirken, işgören performansı dikkate alındığında 3 istasyonla hat dengelenmiştir.

Bu problem için bazı performans göstergeleri aşağıdaki gibidir:

Denge Kaybı: Denge kaybı, her istasyonda birim üretim için ayrılan toplam süreyle gerekli süre arasındaki farkın (istasyonların toplam süresi), ayrılan toplam süreye oranıdır. Buna göre denge kaybı;

$$D (\%) = (n \cdot C - \sum T_i / n \cdot C) = \{(3 \cdot 10 - 27.45) / 3 \cdot 10\} \cdot 100 = \% 8.5 \text{’dir.}$$

Düzgünlük İndeksi: Düzgünlük indeksi, montaj hattındaki iş istasyonlarının işlem sürelerinin düzgünlüğünü gösterir. Düzgünlük indeksinin küçük olması, hat üzerinde iyi bir dengenin sağlanmış olduğunu gösterir.

$$Dİ (\%) = \left[\sqrt{\sum (T_{enb} - T_i)^2 / (n \cdot C)} \right] \cdot 100 = \left(\frac{\sqrt{1.145}}{30} \right) \cdot 100 = \% 3.56$$

Hat Etkinliği: Hat etkinliği, montaj hattındaki kapasitenin ne kadarlık bir kısmının kullanıldığını gösteren bir performans ölçütüdür.

$T_i = i$. iş istasyonunun işlem süresi olmak üzere; ($T_1 = 8.8$, $T_2 = 9.65$, $T_3 = 9$)

$$HE (\%) = \frac{\sum T_i}{n \cdot C} \cdot 100 = \frac{27.45}{30} \cdot 100 = \% 91.5$$

Hat etkinliğinin ideal değeri %100’dür, fakat bu durum işletmeler tarafından pek istenen bir durum değildir. Montaj hattındaki beklenmedik gecikmelere karşı esnekliğin sağlanması için bu değerin bir miktar düşük olması yeğlenir.

5.1.3 İşgören performansı dikkate alınmadan MHD

5 iş ögesinden oluşan ve 10 dk/ürün’lük bir çevrim süresine sahip olan tek modelli U-tipi MHD Problemi için, işgörenlerin performansı dikkate alınmadan dengeleme çalışması yapılmıştır. Bu problem, Urban’ın (1998) Tamsayı Programlama Modeli temel alınarak GAMS modelleme sistemin CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve optimum çözüm elde edilmiştir. Optimum çözüm, i7-4500U CPU 1.8 Ghz işlemcili kişisel bir bilgisayarda 0.44 sn’de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, işgören performansının dikkate alındığı durum ile karşılaştırılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

Tamsayılı Programlama Modeli;

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^5 Z_j \quad (4.13)$$

Atama kısıtı:

$$\sum_{j=1}^5 (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.14)$$

Çevrim süresi kısıtı:

$$\sum_{i=1}^5 t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq 10 \quad ([j = 1, 2, \dots, 5]) \quad (4.15)$$

Öncelik kısıtı:

Orijinal diyagram için;

$$\sum_{j=1}^5 (5 - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.16a)$$

$$L(r, s) = \{(1, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 5), (4, 5)\}$$

Hayali diyagram için;

$$\sum_{j=1}^5 (5 - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.16b)$$

$$L(s, r) = \{(5, 4), (5, 3), (4, 2), (4, 1), (3, 1)\}$$

İş istasyonu kısıtı:

$$\sum_{i \in W_j} (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| \cdot Z_j \leq 0 \quad [j = 1, 2, \dots, 5] \quad (4.17)$$

$$\|W_1\| = 5, \quad \|W_2\| = 5, \quad \|W_3\| = 5, \quad \|W_4\| = 5, \quad \|W_5\| = 5$$

0-1 kısıtları:

$$x_{ij}, y_{ij}, Z_j = 0 \text{ veya } 1$$

5.1.4 Sonuçlar ve Karşılaştırma

Bu problem için montaj hattı 4 istasyon ile dengelenmiştir. Optimum atama sonuçları Çizelge 5.3'teki gibidir.

Çizelge 5.3 : Test1-İş ögesi-istasyon atama sonuçları.

İstasyon	İş ögesi	İstasyon süresi	Boş süre
1	5	6	4
2	1	8	2
3	2 ve 4	9	1
4	3	10	0

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi dengeleme sonucunda istasyonlardaki toplam boş süre (âtıl süre) 7 dk bulunmuştur. Bu değer çevrim süresine (10 dk) yakın bir değer olduğu için çok fazladır.

İşgören performansının dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 5.4.'te gösterilmiştir.

Durum1: İşgören performansının dikkate alındığı U-tipi MHDP,

Durum2: Klasik U-tipi MHDP olmak üzere;

Çizelge 5.4 : Test1-Durum1 ve Durum2 performans göstergeleri.

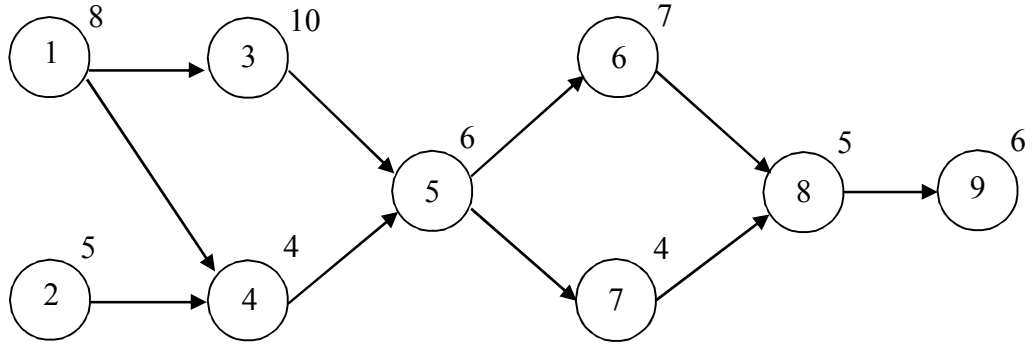
	İstasyon sayısı	Âtıl süre	Denge kaybı (%)	Düzgünlük indeksi	Hat etkinliği(%)
Durum1	3	2.55	8.5	2.4	91.5
Durum2	4	7	17.5	11.4	82.5

Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi, işgören performansının dikkate alındığı durumda montaj hattı 3 istasyonla dengelenirken, klasik durumda bu sayı 4'e çıkmaktadır. Ayrıca, işgören performansı dikkate alındığında klasik duruma göre hat etkinliğinde

% 9 artış gerçekleşmiştir. Tüm performans göstergelerinde işgören performansının dikkate alındığı durum, bu problem için daha iyi sonuçlar vermiştir.

5.2 Test Problemi-2

Modelin geçerliliğini ve uygulanabilirliğini test etmek amacıyla ikinci bir deneysel çalışma yapılmıştır. 9 iş ögesi ve 9 işgörenden oluşan bir U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için model uygulanmış ve test edilmiştir. İş ögelerinin işlem süreleri ve öncelik ilişkileri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : 9 iş ögesi için öncelik diyagramı.

İşgörenlerin her bir iş ögesi için performans katsayıları Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Test2-İşgörenlerin performans katsayıları.

$\begin{matrix} w \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,7	1,1	0,85	1,3	1,25	1,2	0,95	0,8	1,1
2	0,75	1,2	0,75	1,4	1	0,9	0,85	0,9	1,3
3	0,6	1	1	1,25	0,9	1,1	0,75	0,95	1,25
4	0,5	1,25	0,9	1,45	0,75	0,85	1,1	0,75	1,15
5	0,65	1,05	0,7	1000	0,85	1	1,05	1	0,95
6	0,8	0,95	0,85	1	0,9	1,1	0,95	0,8	1,2
7	1	1,3	1,2	1,5	1,1	1,25	1,35	1,15	1,4
8	0,9	1,15	1,25	1,25	1,2	0,95	1,2	0,85	1,35
9	0,85	1,2	1,3	1,35	1,05	1,15	1,1	0,9	1,3

Çizelge 5.5'te i iş ögesini, w ise işgöreni temsil etmektedir. Performans katsayıları, işgörenlerin her bir iş için işlem hızlarını ifade etmektedir. Bir işi standart işlem süresinde gerçekleştiren işgörenin, o iş için performans katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla, herhangi bir iş için 1'den küçük bir performans katsayısına sahip olan işgörenin o işi standart işlem süresinden daha önce bitirdiği varsayılmaktadır. Örneğin; 1. işgörenin 2. iş ögesi için performans katsayısı 0.75'tir. Bu, 1. işgörenin 2. işi standart işlem süresinden %25 daha hızlı gerçekleştirdiği anlamına gelmektedir.

Her işgörenin her iş için performans katsayısı birbirinden farklı olduğu için, hangi işgörenin hangi istasyona atanacağı kararı işgören sayısı arttıkça hat dengeleme problemini daha da zorlaştırmaktadır. Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi, 1. işgörenin performans katsayısı tüm işler için 1'in altındadır. Bu durumdan yola çıkılarak 1. işgörenin kalifiye bir işgören olduğu söylenebilir. Benzer şekilde, 4. işgörenin tecrübesiz veya dezavantajlı bir işgören olduğu söylenebilir. 4. işgörenin 5. iş ögesi için performans katsayısı 1000 olarak gösterilmiştir. Bunun nedeni, 4. işgörenin 5. iş ögesini gerçekleştirebilecek yetenek veya özelliğe sahip olmamasıdır. Böylelikle, matematiksel modelde 5. iş 4. işgörene atanamayacaktır. Performans katsayıları iş ögeleri için incelenirse, 7 nolu iş ögesinin zor veya uğraş gerektiren bir iş olduğu, 6 nolu iş ögesinin de diğer işlere göre daha kolay gerçekleştirilebildiği söylenebilir.

Çizelge 5.5'e bakılarak her bir iş ögesinin hangi işgören tarafından en hızlı gerçekleştirileceği görülebilir. Fakat, montaj hatlarında genellikle bir istasyona birden fazla iş ögesi atandığı için, dengeleme çalışması yapılırken olası tüm atamaların dikkate alınması gerekmektedir.

5.2.1 Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli

9 iş ögesi ve 9 işgörenden oluşan tek modelli U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^9 Z_j \quad (4.7)$$

Atama kısıtı:

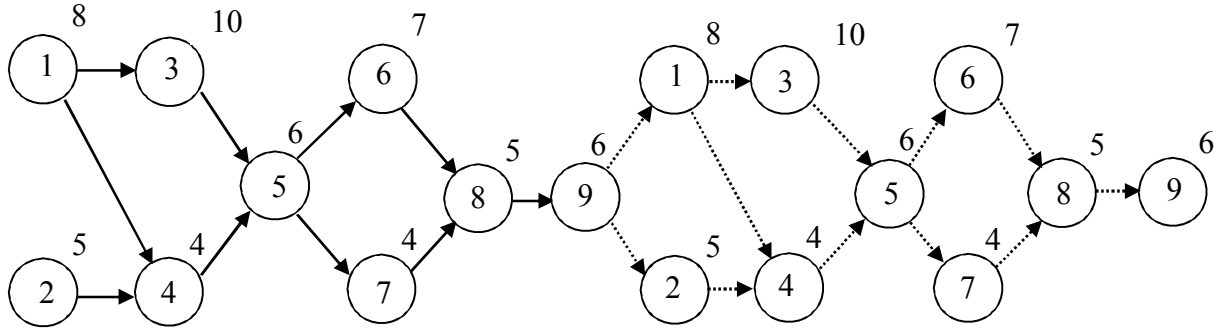
$$\sum_{j=1}^9 (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.8)$$

Çevrim süresi kısıtı:

$$\sum_{i=1}^9 t_i P_{iw} (x_{ij} + y_{ij}) A_{jw} \leq C \quad \left(\begin{array}{l} [j = 1, 2, \dots, 9] \\ [w = 1, 2, \dots, 9] \end{array} \right) \quad (4.9)$$

Öncelik kısıtı:

U-tipi montaj hatlarında iş öğeleri, düz montaj hatlarından farklı olarak hattın hem başından hem de sonundan istasyonlara atanabilmektedir. Örneğin; U-tipi bir montaj hattında ilk ve son iş öğeleri aynı istasyona atanabilir. Bu nedenle, öncelik kısıtları belirlenirken, orijinal öncelik diyagramına hayali öncelik diyagramı da eklenmeli ve öncelik kısıtları birleştirilmiş öncelik diyagramı dikkate alınarak belirlenmelidir. Şekil 5.5'te 9 iş öğeli problem için birleştirilmiş öncelik diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.5 : Birleştirilmiş (orijinal ve hayali) öncelik diyagramı.

Orijinal diyagram için;

$$\sum_{j=1}^9 (9 - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.10a)$$

$$L(r, s) = \{(1, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 5), (4, 5), (5, 6), (5, 7), (6, 8), (7, 8), (8, 9)\}$$

Hayali diyagram için;

$$\sum_{j=1}^9 (9 - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.10b)$$

$$L(s,r) = \{(9,8), (8,7), (8,6), (7,5), (6,5), (5,4), (5,3), (4,2), (4,1), (3,1)\}$$

İş istasyonu kısıtı:

$$\sum_{i \in W_j} (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| \cdot Z_j \leq 0 \quad [j = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.11)$$

$$\|W_1, W_2, \dots, W_9\| = 9,$$

İşgören kısıtı:

$$\sum_{j=1}^9 A_{jw} \leq 1 \quad [w = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.12a)$$

$$\sum_{w=1}^9 A_{jw} \leq 1 \quad [j = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.12b)$$

$$Z_j - \sum_{w=1}^9 A_{jw} = 0 \quad [j = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.12c)$$

0-1 kısıtları:

$$x_{ij}, y_{ij}, Z_j, A_{jw} = 0 \text{ veya } 1$$

5.2.2 Sonuçlar

9 iş ögesi ve 9 işgörenden oluşan tek modellenli U-tipi MHDP için Doğrusal Olmayan Tamsayı Programlama Modeli oluşturulmuştur.

Daha sonra, bu model GAMS (General Algebraic Modeling System) modelleme sisteminin BARON (Branch-And-Reduce Optimization Navigator) çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve optimum çözüm elde edilmiştir.

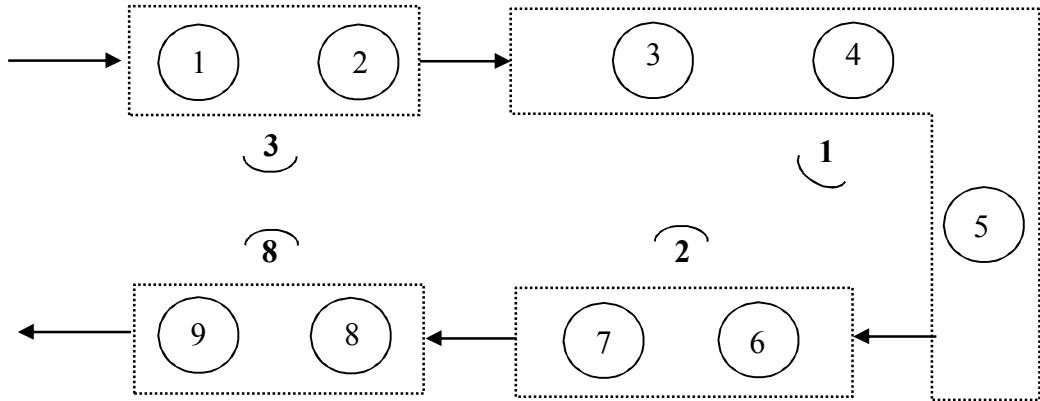
Optimum çözüm, i7-4500U CPU 1.8 Ghz işlemcili kişisel bir bilgisayarda 16.4 dk'da elde edilmiştir.

Atama sonuçları Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 : Test2-İş ögesi-işgören-istasyon atamaları.

$\begin{matrix} i \\ \backslash \\ w \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1			+						
2			+						
3	+								
4	+								
5	+								
6		+							
7		+							
8								+	
9								+	
j	2	3	1	-	-	-	-	4	-

Optimum çözüm sonucunda montaj hattının yerleşimi Şekil 5.6'daki gibi olacaktır.



Şekil 5.6 : Test2-Montaj hattının yerleşimi.

Çizelge 5.6 ve Şekil 5.6'da görüldüğü gibi montaj hattı 4 istasyon kurularak dengelenmiştir. 1. ve 2. iş 1. istasyonda 3. işgören tarafından, 3, 4 ve 5. işler 2. istasyonda 1. işgören tarafından, 6. ve 7. iş 3. istasyonda 2. işgören tarafından, 8. ve 9. iş 4. istasyonda 8. işgören tarafından gerçekleştirilmektedir. 1. istasyonun işlem süresi

9.65 dk, 2. istasyonun işlem süresi 10.55 dk, 3. istasyonun işlem süresi 11.9 dk, 4. istasyonun işlem süresi ise 11.85 dk bulunmuştur. İstasyonlardaki toplam boş süre ise 4.05 dk'dır.

Urban'ın (1998) gerekli olan minimum istasyon sayısını bulmak için önerdiği formülasyon, bu probleme işgörenlerin performans faktörü de dâhil edildiği için geçerli olmamaktadır. Bu formülasyona göre bu problem için teorik olarak en az; $[\sum_i^n t_i / C]^+ = [55/12]^+ = 5$ istasyon kurulması gerekirken, işgören performansı dikkate alındığında 4 istasyonla hat dengelenmiştir.

Bu problem için bazı performans göstergeleri aşağıdaki gibidir:

Denge Kaybı: Denge kaybı, her istasyonda birim üretim için ayrılan toplam süreyle gerekli süre arasındaki farkın (istasyonların toplam süresi), ayrılan toplam süreye oranıdır. Buna göre denge kaybı;

$$D (\%) = \{(n \cdot C - \sum T_i) / n \cdot C\} \cdot 100 = \{(4 \cdot 12 - 43.95) / 4 \cdot 12\} \cdot 100 = \% 8.43 \text{ 'dir.}$$

Düzensizlik İndeksi: Düzensizlik indeksi, montaj hattındaki iş istasyonlarının işlem sürelerinin düzensizliğini gösterir. Düzensizlik indeksinin küçük olması, hat üzerinde iyi bir dengenin sağlanmış olduğunu gösterir.

$$DI (\%) = \left[\sqrt{\sum (T_{enb} - T_i)^2 / (n \cdot C)} \right] \cdot 100 = \% 5.46$$

Hat Etkinliği: Hat etkinliği, montaj hattındaki kapasitenin ne kadarlık bir kısmının kullanıldığını gösteren bir performans ölçütüdür.

T_i = i. iş istasyonunun işlem süresi olmak üzere;

$$T_1 = 9.65, \quad T_2 = 10.55, \quad T_3 = 11.9, \quad T_4 = 11.85$$

$$HE (\%) = \frac{\sum T_i}{n \cdot C} \cdot 100 = \frac{43.95}{48} \cdot 100 = \% 91.5$$

Hat etkinliğinin ideal değeri %100'dür, fakat bu durum işletmeler tarafından pek istenen bir durum değildir. Montaj hattındaki beklenmedik gecikmelere karşı esnekliğin sağlanması için bu değerin bir miktar düşük olması yeğlenir.

5.2.3 İşgören performansı dikkate alınmadan MHD

9 iş ögesinden oluşan ve 12 dk/ürün'lük bir çevrim süresine sahip olan tek modelli U-tipi MHD Problemi için, işgörenlerin performansı dikkate alınmadan dengeleme çalışması yapılmıştır. Bu problem, Urban'ın (1998) Tamsayılı Programlama Modeli temel alınarak GAMS modelleme sistemin CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve optimum çözüm elde edilmiştir. Optimum çözüm, i7-4500U CPU 1.8 Ghz işlemcili kişisel bir bilgisayarda 3.36 dk'da elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, işgören performansının dikkate alındığı durum ile karşılaştırılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

Tamsayılı Programlama Modeli;

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^9 Z_j \quad (4.13)$$

Atama kısıtı:

$$\sum_{j=1}^9 (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, 9] \quad (4.14)$$

Çevrim süresi kısıtı:

$$\sum_{i=1}^9 t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad ([j = 1, 2, \dots, 9]) \quad (4.15)$$

Öncelik kısıtı:

Orijinal diyagram için;

$$\sum_{j=1}^9 (9 - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in L \quad (4.16a)$$

$$L(r, s) = \{(1, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 5), (4, 5), (5, 6), (5, 7), (6, 8), (7, 8), (8, 9)\}$$

Hayali diyagram için;

$$\sum_{j=1}^9 (9 - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r,s) \in L \quad (4.16b)$$

$$L(s,r) = \{(9,8), (8,7), (8,6), (7,5), (6,5), (5,4), (5,3), (4,2), (4,1), (3,1)\}$$

İş istasyonu kısıtı:

$$\sum_{i \in W_j} (x_{ij} + y_{ij}) - \|W_j\| \cdot Z_j \leq 0 \quad [j = 1,2, \dots, 9] \quad (4.17)$$

$$\|W_1\| = 5, \quad \|W_2\| = 5, \quad \|W_3\| = 5, \quad \|W_4\| = 5, \quad \|W_5\| = 5$$

0-1 kısıtları:

$$x_{ij}, y_{ij}, Z_j = 0 \text{ veya } 1$$

5.2.4 Sonuçlar ve Karşılaştırma

Bu problem için montaj hattı 5 istasyon ile dengelenmiştir. Optimum atama sonuçları Çizelge 5.7'deki gibidir.

Çizelge 5.7 : Test2-İş ögesi-istasyon atama sonuçları.

İstasyon	İş ögesi	İstasyon süresi	Boş süre
1	2 ve 9	11	1
2	1 ve 4	12	0
3	3	10	2
4	5 ve 7	10	2
5	6 ve 8	12	0

Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi dengeleme sonucunda istasyonlardaki toplam boş süre (âtlıl süre) 5 dk bulunmuştur.

İşgören performansının dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Durum1: İşgören performansının dikkate alındığı U-tipi MHDP,

Durum2: Klasik U-tipi MHDP olmak üzere;

Çizelge 5.8 : Durum1 ve Durum2 performans göstergeleri.

	İstasyon sayısı	Âtıl süre	Denge kaybı (%)	Düzensizlik indeksi	Hat etkinliği(%)
Durum1	4	4.05	8.43	5.46	91.57
Durum2	5	5	8.34	5.0	91.66

Çizelge 5.8’de görüldüğü gibi, işgören performansının dikkate alındığı durumda montaj hattı 4 istasyonla dengelenirken, klasik durumda bu sayı 5’e çıkmaktadır. Âtıl sürelerde durum1 durum2’ye göre daha iyi bir sonuç vermiştir, diğer performans ölçütlerinde ise hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Artan rekabet koşullarında, kaynakların etkin bir şekilde kullanımı büyük önem taşımaktadır. İşletmelerin üretim kapasitesini etkin bir şekilde kullanabilmeleri montaj hattının iyi bir şekilde dengelemesine bağlıdır. Optimum olarak dengelenen bir hat ile maksimum verim elde edilebilir.

Literatürde, Montaj Hattı Dengeleme Problemi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, birçok kolaylaştırıcı varsayım barındıran Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi üzerine olmuştur. MHD Probleminin matematiksel olarak NP-zor problemler sınıfında olması, bu durumun en önemli sebebidir. Çünkü, montaj hattındaki ek kısıtlar problemin zorluk seviyesini arttırmakta ve bu durum optimum çözüm bulmayı daha da zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmaların çoğunun gerçek hayatta uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır. Son yıllarda, bu eksikliği gidermek amacıyla Genel Montaj Hattı Dengeleme çalışmalarında Basit Montaj Hattı Dengeleme çalışmasına kıyasla daha fazla artış gözlenmektedir.

Literatürde, montaj hatlarında işgören atama (worker assignment) problemi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, iş ögelerinin istasyonlara daha önceden atandığı ve sabit olduğu varsayımı vardır. Ayrıca, bu çalışmalarda her işgörenin her işi gerçekleştirebildiği ve iş ögesi sürelerinin işgörenlerin performansından bağımsız olduğu varsayılarak çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu çalışmanın özgün yönü, literatürde işgören performansı dikkate alınarak istasyon sayısının ve işgören atamasının eş zamanlı olarak optimize edildiği ilk çalışma olmasıdır. Çalışmanın bir diğer özgün yanı, önerilen model ile dezavantajlı işgörenlerin de dikkate alınmasıdır. Bu amaçla modelde, dezavantajlı işgörenlerin yapamadığı işlerde ilgili işgörenin performansı çok büyük bir değer olarak belirlenmiş ve bu işgörene atama yapılmaması sağlanmıştır. Böylelikle, sadece dezavantajlı işgörenlerin olduğu veya karma durumlarda da modelin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

İşgören performansının dikkate alındığı bu çalışmada, tek modelli U-tipi MHDP için Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli geliştirilmiştir. Amaç, belirli bir çevrim süresi için, istasyon sayısını ve işgören atamasını eş zamanlı olarak optimize etmektir. Önerilen model, öncelikle 5 iş ögesi ve 5 işgörenden oluşan, daha sonra 9 iş ögesi ve 9 işgörenden oluşan bir U-tipi MHD Problemi için test edilmiştir. Literatürde işgören performansı ile ilgili örnek problem olmadığı için performans katsayıları rassal olarak belirlenmiştir. Örnek problemlerdeki işgören performans katsayılarının ortalaması sırasıyla 1,03 ve 1,04'tür. 4. işgörenin 5. iş ögesi için performans katsayısı 1000 olarak alındığı için ortalamaya dâhil edilmemiştir. İkinci örnek problem birinci örneğin genişletilmiş halidir. Her iki problemde de 4 nolu işgörenin dezavantajlı olduğu varsayılmıştır. Bu problemler, GAMS modelleme sisteminde kodlanmış ve BARON çözücüsü kullanılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir. Aynı yazılım kullanılarak işgören performansının dikkate alınmadığı durum için de problemler çözülmüş ve optimum sonuçlar elde edilmiştir. İşgören performansının dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda elde edilen optimum çözümler karşılaştırılmıştır. İlk problemde, işgören performansının dikkate alındığı durumda montaj hattı 3 istasyon ile dengelenirken, klasik durumda bu sayı 4'e çıkmıştır. İstasyonların boş sürelerinin toplamı ise sırasıyla 2.55 dk ve 7 dk olarak bulunmuştur. Ayrıca, işgören performansı dikkate alındığında klasik duruma göre hat etkinliğinde % 9 artış gerçekleşmiştir. Denge kaybı ve düzgünlük indeksi faktörlerinde de işgören performansının dikkate alındığı durumda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. İkinci problemde ise, işgören performansının dikkate alındığı durumda montaj hattı 4 istasyon ile dengelenirken, klasik durumda bu sayı 5'e çıkmıştır. İstasyonların boş sürelerinin toplamı ise sırasıyla 4.05 dk ve 5 dk olarak bulunmuştur. Diğer performans ölçütlerinde ise hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir.

6.2 Öneriler

Bir montaj hattının ilk kurulumu ya da yeniden tasarlanması yüksek miktarda yatırım gerektirdiğinden, hattın yerleşim planını karar vericiler için büyük öneme sahiptir. Artan rekabet koşullarında, işgörenlerin, iş alanlarının, donanım ve malzemelerin etkin ve verimli kullanılabilmesi işletmeler için büyük önem taşımaktadır. İşgören ve makinelerden etkin bir şekilde faydalanılarak, üretim hızını ve verimliliği arttırmak dolayısıyla maliyetleri azaltmak mümkündür.

Yalın Üretim ve Tam Zamanında Üretim ilkesinin uygulanmasıyla, tek parça akışının sağlandığı U-tipi hatlara geçiş hızlanmıştır. U-tipi yerleşim ile çevrim süresinin azaltılması ve üretimde esnekliğin sağlanması mümkün olmaktadır. Montaj Hattı Dengeleme çalışmalarının çoğunluğunda problemin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla birçok varsayım yapılmaktadır. Bu nedenle, literatürdeki birçok çalışmanın gerçek hayata uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır. Son yıllarda, bu eksikliğin giderilebilmesi amacıyla pratikte kullanılabilir çözüm önerileri geliştirmeye yönelik yapılan çalışmaların sayısı artmaktadır. Fakat, bu çalışmaların sayısı halen yetersiz seviyededir. Araştırmacılar, işletmelerin faydalanabileceği gerçekçi çözüm önerileri geliştirilmelidirler. Çünkü, gelişen ve değişen üretim koşullarına uyum sağlanması, ancak esnek ve etkin üretim sistemleri tasarlayarak gerçekleştirilebilir.

İnsan faktörünün dikkate alınmadığı bir üretim sistemin etkin bir şekilde sürdürülebilmesi mümkün değildir. İşletmelerin elindeki en önemli kaynak olan işgücünü etkin bir şekilde kullanması gerekmektedir. Bir montaj hattının işgörenler dikkate alınmadan dengelenmesi, ilerleyen zamanlarda istasyonlarda boş sürelerin artmasına veya ürünlerin istenen miktarda üretilmemesine neden olacaktır. Ayrıca, bu durum işgörenlerden etkin bir şekilde yararlanılamamasına dolayısıyla da üretim kapasitesinin verimli bir şekilde kullanılamamasına neden olmaktadır.

İnsan faktörünün dikkate alındığı bazı çalışmalarda, iş ögesi sürelerinin işgören faktörü nedeniyle stokastik olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmalarda, her ne kadar gerçekliğe yaklaşılsa da, işgören faktörü tam olarak göz önünde bulundurulmamaktadır.

6.3 Gelecekteki Çalışmalar

Bu çalışma, Montaj Hattı Dengeleme Problemi'nde her işgörenin her işi gerçekleştirebildiği ve işgörenlerin işleri aynı sürelerde gerçekleştirdiği varsayımının kaldırıldığı literatürdeki ilk çalışmadır. Bu çalışmada, tek modellen U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi için gerçek hayata uygulanabilir bir matematiksel model önerilmiştir. Geliştirilen Doğrusal Olmayan Tamsayılı Programlama Modeli, önce 5 iş ögesi ve 5 işgörenden oluşan, daha sonra da 9 iş ögesi ve 9 işgörenden oluşan örnek bir problem için test edilmiştir. Sonuçlar, işgören performansı dikkate alındığında klasik duruma kıyasla montaj hattının daha etkin ve verimli bir şekilde dengelendiğini

göstermiştir. Önerilen model ile istasyon sayısının ve işgören atamasının eş zamanlı olarak optimize edilmesinin yanı sıra, gerçekçi bir çözüm yöntemi sunmak amaçlanmıştır. Bu nedenle, amaç sadece istasyon ve işgören sayısını minimize etmek değil aynı zamanda bunların etkin ve verimli kullanılmasını sağlamaktır.

Matematiksel model, büyük boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kaldığı için gelecek çalışmalarda sezgisel bir algoritmanın geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, işgörenler arasındaki işgücü yükünü dengelemek amacıyla, işlerin enerji seviyeleri dikkate alınarak ek bir kısıt modele dâhil edilebilir. Montaj hatlarında bazı iş öğelerinin aynı istasyona atanamadığı durumlar da vardır. Böyle durumlarda, bazı iş öğelerinin aynı istasyona atanamaması kısıtı modele dâhil edilebilir.

Bu çalışmada, tek modellen U-tipi montaj hatları için matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model, ilerleyen çalışmalarda karma modellen montaj hatları için de geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Aase, G. R., Schniederjans, M. J. ve 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. ve Schniederjans, M.J.,** (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research* 156, 698–711.
- Agrawal, P.K.** (1985). The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 23, 403–421.
- Akagi, F., Osaki, H. ve Kikuchi, S.** (1983). A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. *International Journal of Production Research* 21, 755–770.
- Amen, M.** (2000). An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics* 64, 187–195.
- Amen, M.** (2006). Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research* 168, 747–770.
- Anderson, E.J. ve Ferris, M.C.** (1994). Genetic algorithms for combinatorial optimization: The assembly line balancing problem. *ORSA Journal on Computing* 6, 161–173.
- Arcus, A.L.** (1966). COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 259–277.
- Avikal, S., Jain, R., Mishra, P. K. ve Yadav, H. C.** (2013). A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labor productivity. *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 895-901.
- Battaïa, O. ve Dolgui, A.** (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277.
- Bautista, J. ve Pereira, J.** (2008): A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 194, 787-794.
- Baybars, I.** (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32, 900-932.
- Baykasoğlu, A., ve Dereli, T.** (2009). Simple And U-Type Assembly Line Balancing By Using An Ant Colony Based Algorithm. *Mathematical and Computational Applications*, 14(1), 1-12.

- Becker, C., ve Scholl, A.** (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715.
- Blum, C.** (2008). Beam-ACO for Simple Assembly Line Balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 20(4), 618-627.
- Borba, L. ve Ritt, M.** (2014). A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. *Computers & Operations Research*, 45, 87-96.
- Boysen, N., Fliedner, M. ve Scholl, A.** (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693.
- Boysen, N., Fliedner, M. ve Scholl, A.** (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509-528.
- Bukchin, J. ve Masin, M.,** (2004). Multi-objective design of team oriented assembly systems. *European Journal of Operational Research* 156, 326–352.
- Carraway, R. L.** (1989). A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science*, 35(4), 459-471.
- Chakravarty, A.** (1988). Line balancing with task learning effect. *IIE Transactions*, 20, 186-193.
- Cheng, C. H., Miltenburg, J. ve Motwani, J.** (2000). The effect of straight and U-shaped line on quality. *IEEE Transaction on Engineering Management*, 47(3), 321-334.
- Chiang, W. C.,** 1998. The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research* 77, 209–227.
- Chiang, W. C. ve Urban, T. L.** (2006). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1767-1781.
- Choi, G.** (2009). A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 395-400.
- Corominas, A., Pastor, R. ve Plans, J.** (2008). Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*, 36(6), 1126-1132.
- Costa A. M. ve Miralles C.** (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers. *International Journal of Production Economics*, 120, 625-632.
- Dar-El, E.M. ve Rabinovitch, M.** (1988). Optimal planning and scheduling of assembly lines. *International Journal of Production Research* 26, 1433–1450.
- Digisei S., Kock A., Mummolo G. ve Rooda J.** (2009). The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 368-377.

- Erel, E., Sabuncuoğlu, İ. ve Aksu, B. A.** (2001). Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 39(13), 3003-3015.
- Erel, E., Sabuncuoğlu, İ. ve Şekerci, H.** (2005). Stochastic assembly line balancing using beam search. *International Journal of Production Research*, 43(7), 1411-1426.
- Fleszar, K. ve Hindi, K.** (2003). An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 145, 606–620.
- Ghosh, S. ve 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, 637–670.
- Gökçen, H. ve Ağpak, K.** (2006). A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 577-585.
- Gökçen, H., Ağpak, K., ve Benzer, R.** (2006). Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 600-609.
- Gökçen, H., Ağpak, K., Gencer, C. ve Kızılkaya, E.** (2005). A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 29(4), 373-380.
- Gökçen, H. ve Erel, E.** (1997). A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics* 48, 177–185.
- Held, M., Karp, R.M. ve Shareshian, R.** (1963). Assembly line balancing–Dynamic programming with precedence constraints. *Operations Research* 11, 442–459.
- Helgeson, W.B. ve Birnie, D.P.** (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering* 12, 394–398.
- Hoffmann, T.R.** (1963). Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science* 9, 551–562.
- Jackson, J. R.** (1956). A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*, 2, 261-272.
- Johnson, J.** (1988). Optimally balancing large assembly lines with FABLE. *Management Science* 34, 240–253.
- Johnson, R.V.** (1991). Balancing assembly lines for teams and work groups. *International Journal of Production Research* 29, 1205–1214.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S. ve Demirel, N.** (2014). An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(11), 997-1007.

- Kara, Y. ve Tekin, M.** (2009). A mixed integer linear programming formulation for optimal balancing of mixed-model U-lines. *International Journal of Production Research*, 47(15), 4201-4233.
- Kilbridge, M.D. ve Wester, L.** (1961). The balance delay problem. *Management Science* 8, 69-84.
- Kılınçcı, O. ve Bayhan, G.** (2006). A Petri net approach for simple assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (11), 1165–1173.
- Kim, Y.K., Kim, S.J. ve Kim, J.Y.,** 2000. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning and Control* 11, 754–764.
- Klein, M.** (1963). On assembly line balancing. *Operations Research*, 11, 274-281.
- Klein, R. ve Scholl, A.** (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing-A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research* 91, 367-385.
- Krishnan, K. K., Mirzaei, S. ve Pachaimuthu, S. M. S.** (2013). Heuristic for Combined Line Balancing and Worker Allocation in High Variability Production Lines. *Journal of Supply Chain and Operations Management*, 11, 1.
- Küçükkoç, İ. ve Zhang, D. Z.** (2014). Simultaneous balancing and sequencing of mixed-model parallel two-sided assembly lines. *International Journal of Production Research*, 1-23.
- Lapierre, S. D., Ruiz, A. ve Soriano, P.** (2006). Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 826-837.
- Manavizadeh, N., Hosseini, N. S., Rabbani, M. ve Jolai, F.** (2013). A Simulated Annealing algorithm for a mixed model assembly U-line balancing type-I problem considering human efficiency and Just-In-Time approach. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 669-685.
- Miltenburg, J.** (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research* 109, 1–23.
- Miltenburg, J.** (2001). U-shaped production lines: A review of theory and practice. *Int. J. Production Economics*, 70, 201-214.
- Miltenburg, J.** (2006). Optimal balancing large assembly lines: Updating Johnson's 1988 FABLE algorithm. *INFOR Journal for Canadian Operational Research Society*, 44.
- Miltenburg, J. ve Wijngaard, J.** (1994). The U-line line balancing problem. *Management Science*, 40, 1378-1388.
- Miralles, C., Garcia, S. J., Andres, C. ve Cardos, M.** (2007). Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110(1-2), 187-197.

- Miralles, C., Garcia, S. J., Andres, C. ve Cardos, M.** (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3), 352-367.
- Moodie, C. L. ve Young, H. H.** (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering* 16, 23-29.
- Morrison, D. R., Sewell, E. C. ve Jacobson, S. H.** (2014). An application of the branch, bound, and remember algorithm to a new simple assembly line balancing dataset. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 403-409.
- Nakade, K. ve Ohno, K.** (1999). An optimal worker allocation problem for a U-shaped. *Int. J. Production Economics*, 60-61, 653-658.
- Nakade, K. ve Ohno, K.** (2003). Separate and carousel type allocations of workers in a U-shaped production line. *European Journal of Operational Research*, 145, 403-424.
- Nearchou, A.** (2007). Balancing large assembly lines by a new heuristic based on differential evolution method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34 (9), 1016-1029.
- Nearchou, A.** (2011). Maximizing production rate and workload smoothing in assembly lines using particle swarm optimization. *International Journal of Production Economics* 129 (2), 242-250.
- Nevins, A.J.** (1972): Assembly line balancing using best bud search. *Management Science* 18, 529-539.
- Nourie, F.J. ve Venta, E.R.** (1991). Finding optimal line balances with OptPack. *Operations Research Letters* 10, 165-171.
- Nourie, F.J. ve Venta, E.R.** (1996). Microcomputer performance of OptPack on Hoffmann's data sets: Comparison with Eureka and FABLE. *Management Science* 42, 304-306.
- Otto, C. ve Otto, A.** (2014). Extending assembly line balancing problem by incorporating learning effects. *International Journal of Production Research*, 52(24), 7193-7208.
- Otto, A. ve Scholl, A.** (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 277-286.
- Öksüz, M. K. ve Satoğlu, Ş. I.** (2014). Balancing U-shaped Assembly Lines by Considering Human Factors. *Proceedings of the Global Conference on Engineering and Technology Management*, Istanbul, Turkey, 23-26 Haziran.
- Özcan, U. ve Toklu, B.** (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering* 57(1), 217-227.

- Pastor, R. ve Ferrer, L.** (2009). An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 47(11), 2943-2959.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G. ve Khumawala, B.M.** (1978). A heuristic network procedure for the assembly line balancing problem. *Naval Research Logistics Quarterly* 25, 299–307.
- Rabbani, M., Kazemi, S. M. ve Manavizadeh, N.** (2012). Mixed model U-line balancing type-1 problem: A new approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 131-138.
- Rachamadugu, R. ve Talbot, B.** (1991). Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research* 29, 619–633.
- Raouf, A. ve Tsui, C.** (1982). A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers and Industrial Engineering* 6, 131–148.
- Sabuncuoğlu, İ., Erel, E. ve Tanyer, M.** (2000): Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing* 11, 295-310.
- Sabuncuoğlu, İ., Erel, E. ve Alp, A.** (2009). Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 287-300.
- Salveson, M.E.** (1955). The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering* 6 (3), 18–25.
- Satoğlu, Ş. I., Durmuşoğlu, M. B. ve Ertay, T.** (2010). A mathematical model and a heuristic approach for design of the hybrid manufacturing systems to facilitate one-piece flow. *International Journal of Production Research*. 48:17, 5195-5220.
- Scholl, A. ve Becker, C.** (2005). A note on “An exact method for cost-oriented assembly line balancing”. *International Journal of Production Economics*, 97(3), 343-352.
- Scholl, A. ve Becker, C.** (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 666-693.
- Scholl, A., Flidner, M. ve Boysen, N.** (2010). ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 688-701.
- Scholl, A. ve Klein, R.** (1997). SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing* 9, 319–334.
- Scholl, A. ve Klein, R.** (1999a). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37(4), 721-736.
- Scholl, A. ve Klein, R.** (1999b). Balancing assembly lines effectively-A computational comparison. *European Journal of Operational Research* 114, 50-58.

- Scholl, A. ve Voß, S.** (1996). Simple Assembly Line Balancing–Heuristic Approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 217-244.
- Sewell, E. C. ve Jacobson, S. H.** (2012). A branch, bound, and remember algorithm for the simple assembly line balancing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(3), 433-442.
- Shewchuk, J. P.** (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3485-3502.
- Shtub, A.,** (1984). The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 22, 235–245.
- Shtub, A. ve Dar-El, E.M.** (1990). An assembly chart oriented assembly line balancing approach. *International Journal of Production Research* 6, 1137–1151.
- Sirovetnukul, R. ve Chutima, P.** (2010). The Impact of Walking Time on U-Shaped Assembly Line Worker Allocation Problems. *Engineering Journal*, 14(2), 53-78.
- Sparling, D. ve Miltenburg, J.** (1998). The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 36(2), 485-501.
- Talbot, F.B. ve Patterson, J.H.** (1984). An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. *Management Science* 30, 85–99.
- Tanyaş M. ve Baskak, M.,** (2006). Üretim Plânlama ve Kontrol, İrfan Yayıncılık, İstanbul.
- Thomopoulos, N.T.** (1970). Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science* 16, 593– 603.
- Toksarı, M. D., İşleyen, S. K., Güner, E. ve Baykoc, Ö. F.** (2008). Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. *Applied Mathematical Modelling*, 32(12), 2954-2961.
- Toksarı, M. D., İşleyen, S. K., Güner, E. ve Baykoç, Ö. F.** (2010). Assembly line balancing problem with deterioration tasks and learning effect. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1223-1228.
- Tuncel, G. ve Topaloğlu, S.** (2013). Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 602-609.
- Urban, T.** (1998). Note: Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science*, 44(5), 738-741.
- Vilà, M. ve Pereira, J.** (2014). A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research*, 44, 105-114.

- Vilarinho, P. M. ve Simaria, A. S.** (2006). ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 44(2), 291-303.
- Wei, N. C. ve Chao, I. M.** (2011). A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 824-830.
- Wilson, J.M.** (1986). Formulation of a problem involving assembly lines with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 24, 59–63.
- Wong W., Mok P. ve Leung S.** (2006). Developing a genetic optimization approach to balance an apparel assembly line. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 1009-1015.
- Wu, E. F., Jin, Y., Bao, J. S. ve Hu, X. F.** (2007). A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10), 1009-1015.
- Xu W., Ko J., Cochran D. J. ve Jung M. C.** (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 431-441.
- Zaman, T., Paul, S. K. ve Azeem, A.** (2012). Sustainable operator assignment in an assembly line using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5077-5084.
- Zha, J. ve Yu, J. J.** (2014). A hybrid ant colony algorithm for U-line balancing and rebalancing in just-in-time production environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 93-102.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mehmet Kürşat Öksüz
Doğum Yeri ve Tarihi : Adıyaman - 31.12.1987
E-Posta : mkursatoksuz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Boşgelmez G., Öksüz M. K. ve Alduğan K.** (2012). The importance of Strategic Management and Intellectual Capital in Sustainable Development: Example of Süleyman Demirel University. *3rd International Symposium on Sustainable Development (ISSD 2012)*, s. 134-141, Sarajevo, Bosna-Hersek, 31.05-01.06.
- **Öksüz, M. K. ve Satoğlu, Ş. I.** (2014). Balancing U-shaped Assembly Lines by Considering Human Factors. *Proceedings of the Global Conference on Engineering and Technology Management*, Istanbul, Turkey, 23–26 Haziran.