BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MALİYET TABANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMLERİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER

HAZIRLAYAN

AHMET SARIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MALİYET TABANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMLERİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER

HAZIRLAYAN

AHMET SARIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ TUSAN DERYA

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Ahmet SARIOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 24 / 05 / 2021

Tez Adı: Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemleri İçin Yeni Matematiksel Modeller

Tez Jüri Üyeleri	**İmza**
Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi	……..
Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA, Başkent Üniversitesi	…….
Dr. Öğr. Üyesi Ayyüce Aydemir KARADAĞ, Çankaya Üniversitesi	…….

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: … / … / ……..

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORİJİNALLİK RAPORU

Tarih: 04.06.2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ahmet SARIOĞLU

Öğrencinin Numarası: 21610316

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Program: Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA

Tez Başlığı: Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemleri İçin Yeni Matematiksel Modeller

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç bölümünden oluşan toplam 57 Sayfalık kısmına ilişkin 22/05/2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9'dur. Uygulanan filtremeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

"Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını" inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:…….

ONAY

Tarih: … / … / ……..

Dr. Öğr. Üyesi Tusan Derya

TEŞEKKÜR

Bu süreçte bilgisini, tecrübesini benden esirgemeyen ve bana inanan Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA'ya teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda desteklerini hep hissettiğim aileme ve en önemlisi bu yolda elimi hiç bırakmayan sevgili eşim Sena Sütlü SARIOĞLU'na teşekkür ederim.

ÖZET

Ahmet SARIOĞLU

MALİYET TABANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMLERİ İÇİN YENİ MATEMATİKSEL MODELLER

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Sanayi işletmelerinde günümüzde yaşanan yoğun rekabet ortamında kaynakların etkin kullanımı ve düşük maliyetli üretim önemli bir konu durumundadır. Bu süreçte, yüksek hacimde, düşük maliyetli üretim yapabilmek için montaj hattı üretim sistemine geçiş zorunluluk haline gelmiştir. Montaj hattı, yüksek hacimde bir ürünün parçalarının, önceden belirli bir sırayla, sıralı istasyonlarda ve belirli bir çevrim süresi içerisinde montaj işleminin gerçekleştiği bir üretim sistemidir. Literatürde, montaj hatlarında görev süreleri, işçilerin yeteneklerinin, tecrübelerinin ve aldıkları ücretin sabit olduğu varsayılmaktadır. Gerçek hayatta tam aksine, bahsi geçen kavramların sabit olduğu bir duruma rastlamak söz konusu değildir. Bu sebepten ötürü gerçek anlamda maliyet oluşturabilmek adına görev sürelerinin ve ücretlerin farklı olduğunu kabul etmek gerekmekte ve problemlerin bu anlayışla çözüme kavuşması daha doğru olmaktadır. Tez kapsamında, daha önce literatürde tartışılmamış, maliyet tabanlı amaç problemi, eş zamanlı olarak işçi atama fonksiyonu ile montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi olarak isimlendirilmiştir. Bahsi geçen problemin çözümü için matematiksel modeller önerilmiştir. Önerilen matematiksel modelin iyi bilinen kıyaslama problemleri üzerinde performans analizi yapılmıştır. Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme ve işçi atama problem çözümleri ile montaj hattı dengeleme ve işçi atama problem çözümleri istasyon sayısı bazında karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme, İşçi Atama, Matematiksel model

ABSTRACT

Ahmet SARIOĞLU

NEW MATHEMATICAL MODELS FOR COST-ORIENTED ASSEMBLY LINE BALANCING AND WORKER ASSIGNMENT PROBLEMS

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Industrial Engineering

2021

Nowadays industrial enterprises are facing huge competition. Therefore, use of resources and producing low-cost product have become very crucial topic. In order to increae efficiency, choosing assembly line production system has become mandatory. Assembly line is a production process, where high volume of products assembled with known precedence relations of jobs, in serial workstations and under a certain cycle time. In literature, task times, worker ability, experience and wage rate are taken constant. However, in real life these variables are never same. In order to obtain real costs, it is better to assume task times for stations and wage rates of each worker discrepant and discrepancy depends on difficulty of the task. This mindset has to be applied to solve problems. In this thesis, topic is not discussed in the literature yet, cost-oriented and worker assignment approaches are considered simultaneously, in order to solve assembly line balancing problem. Name of the problem is cost-oriented assembly line balancing and worker assignment. Mixed integer programming method is used to solve problem. At the end cost-oriented approach and worker assignment approach are compared in terms of station quantity

KEYWORDS: Cost-oriented assembly line balancing, Worker assignment, Mathematical models

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR……i

ÖZET……..ii

ABSTRACT……... iii

İÇİNDEKİLER……..iv

TABLOLAR LİSTESİ…….. vi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ……vii

SİMGELER VE KISALTMALAR……..viii

1.GİRİŞ……...1

2.MONTAJ HATTI DENGELEME ……...4

2.1 Üretim Sistemleri ve Sınıflandırılması…….. 4

2.2 Montaj Hatlarıyla İlgili Genel Kavramlar……8

2.3 Montaj Hattı Dengeleme…….11

2.4 Montaj Hattı Dengelemede Temel Prensipler…….. 12

2.5 Montaj Hattı Dengelemenin Amaçları…….. 13

2.6 Montaj Hattı Dengelemeyi Etkileyen Temel Faktörler……... 14

2.7 Montaj Hattının Sınıflandırılması……. 15

2.7.1 Model sayısına göre…… 15

2.7.2 Kontrol yapısına göre…….…….... 17

2.7.3 Otomasyon seviyesine göre…… 18

2.7.4 Yerleşim şekline göre……. 19

3. MALİYET TABANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA……22

3.1 Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme……... 22

3.2 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme…….. 23

3.3 Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama…….. 25

3.4 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi……. 26

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI……28

4.1 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme…… 30

4.2 Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama…….. 34

5. M-MHD, MHDİA ve M-MHDİA PROBLEMLERİ İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER……. 39

5.1 M-MHD Problemi için Matematiksel Model……..39

5.2 MHDİA Problemi için Matematiksel Model…….. 42

5.3 M-MHDİA Problemi için Matematiksel Model……. 45

6. SAYISAL ANALİZLER……...48

7. SONUÇ……...54

KAYNAKLAR……...55

EKLER……... 63

EK 1.1: M-MHİDA Problemi Çözümleri – Heskia……..63

EK 1.2: M-MHİDA Problemi Çözümleri – Roszieg…….67

EK 1.3: M-MHİDA Problemi Çözümleri – Sawyer……. 71

EK 1.4: M-MHİDA Problemi Çözümleri – Kilbridge……. 75

EK 1.5: M-MHİDA Problemi Çözümleri – Hahn…… 79

EK 2.1: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Heskia…….. 83

EK 2.2: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Roszieg……. 85

EK 2.3: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Sawyer……. 87

EK 2.4: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Kilbridge……..89

EK 2.5: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Hahn…….91

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.7. Montaj hatlarının sınıflandırılması…… 15

Tablo 5.1.1. M-MHD problemi karar modelinde kullanılan notasyonlar…… 40

Tablo 5.1.2. M-MHD problemi karar modelinde kullanılan parametreler……...40

Tablo 5.1.3. M-MHD problemi karar modelinde kullanılan değişkenler…….40

Tablo 5.2.1. MHDİA problemi karar modelinde kullanılan parametreler……... 43

Tablo 5.2.2. MHDİA problemi karar modelinde kullanılan değişkenler……. 43

Tablo 5.3.1. M-MHDİA problemi karar modelinde kullanılan parametreler…….. 45

Tablo 5.3.2. M-MHDİA problemi karar modelinde kullanılan değişkenler…… 45

Tablo 6.1. M-MHDİA problem setleri çözüm özeti……. 50

Tablo 6.2. M-MHDİA ve MHDİA istasyon sayıları kıyas tablosu……... 51

Tablo 6.3. M-MHDİA ve MHDİA işçi sayısına göre kıyas tablosu……. 52

Tablo 6.4. M-MHDİA ve MHDİA görev süresi hesap yöntemine göre kıyas tablosu……52

Tablo 6.5. M-MHDİA ve MHDİA uyuşmazlık oranına göre kıyas tablosu……. 53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.	Üretim Süreci …….	5
Şekil 2.	Üretim Sistemleri ……	6
Şekil 3.	Öncelik Diyagramı …….	9
Şekil 4.	Öncelik Matrisi ……	10
Şekil 5.	Montaj Hatları ……	16
Şekil 6.	Tek Modelli Hatlar ……	16
Şekil 7.	Çok Modelli Hatlar ……	16
Şekil 8.	Karışık Modelli Hatlar ……	17
Şekil 9.	Düz Montaj Hattı ……	19
Şekil 10.	U-tipi Montaj Hattı……	20
Şekil 11.	Paralel Montaj Hattı ……	21
Şekil 12.	Montaj Hattı Dizayn Modelleri ……	33
Şekil 13.	Görev Atama Matrisi……	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

c	Çevrim süresi
k	istasyon numarası (indeksi), $k = 1, \ldots, \overline{K}$, $\overline{K}$: en fazla istasyon sayısı
i, r, s	görev numarası (indeksi), $i = 1, \ldots, n$, n: toplam görev sayısı
P_s	s görevinin öncül görevler kümesi
$r \in P_s$	bir öncelik ilişkisi; r görevi s görevinden önce tamamlanmak zorundadır
t_i	i görevinin tamamlama zamanı
t_{iw}	i operasyonunun w operatörü tarafından tamamlanma süresi
w_i	i görevinin birim zaman için maliyet oranı
ws_k	k istasyonunun maliyet oranı
x_{ik}	1, eğer i görevi k istasyonuna atanmış ise; 0, aksi halde
x_{ikw}	i operasyonunun k istasyonunda w operatör tarafından yapılması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
y_{kw}	k istasyonuna w operatörü atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
z_k	1, eğer k istasyonu kullanılmış ise; 0, aksi halde
B-MHD	Basit Montaj Hattı Dengeleme
G-MHD	Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme
MHD	Montaj Hattı Dengeleme
MHDİA	Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama
M-MHD	Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme
M-MHDİA	Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama
M-MHDİAP	Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi

1.GİRİŞ

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte yoğun rekabet koşulları yaşanmaktadır. Dünya genelinde yapılan neredeyse tüm işlerde yüksek kâr marjları artık hayal olmuştur. Bir tarafta satış rakamları düşerken, diğer tarafta maliyetler her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple kâr etmek artık hiç kolay değildir. Değişen bu koşullara uyum sağlamak mecburiyetinde kalan işletmeler, kaynaklarını etkin kullanmak zorundadırlar.

Bu durumun önüne geçebilmek için üreticiler olabildiğince maliyetlerini düşürmek, kaliteyi koruyup, kaynaklarını verimli kullanmak ve üretim verimliliğini arttırmak adına yeni sistemler kullanmaktadırlar. Kimsenin artık boşa harcayacak ne nakdi ne zamanı vardır. Bunun için endüstriyel işletmeler akış tipi üretim sistemlerine yönelmişlerdir. Akış tipi sistemlerde yüksek hacimlerde ve düşük maliyetlerde üretim yapılabilmesi için montaj hatlarının çok önemli yeri vardır.

Dünya tarihinde ilk montaj hattı Henry Ford tarafından 1913 yılında otomobil üretiminde denenmiştir. Bu buluşu sayesinde bir arabayı üretme süresini on iki saatten iki buçuk saate kadar düşürmüştür. Daha sonra kendi yarattığı montaj hattına mekanik bant ekleyerek parçaların akışını sağlamıştır [1].

Montaj hatları günümüzde giderek artan ihtiyaçlarımızın karşılanması için geliştirilmiş üretim sistemlerinden bir tanesidir. Bu sistemlerin varoluşsal amacı talep miktarı yüksek olan ürünlerin en kaliteli, en ucuz, en kısa, başka bir deyişle en verimli şekilde üretilmesidir.

Montaj hatlarında bir ürünün montajı, o ürünün montaj parçalarının bir tezgâh, hat veya istasyon üzerinde belirli düzeyde işçilik uygulanarak yapılmaktadır. Belirli bir hat boyunca sıralanmış işçi grupları bu işlemleri gerçekleştirmektedirler. Montaj hatlarının en belirgin özelliği parçaların, işlem önceliklerini koruyarak, bir istasyondan diğer istasyona geçmesidir. Bu taşıma genelde konveyör bantlar aracılığıyla manuel veya otomatik şekilde yapılmaktadır.

Montaj hattı dengeleme uzun yıllardan beri üreticilerin ve operasyon yöneticilerinin ilgi odağı olmuştur. Klasik MHD problemi ilk olarak 1955'te Salveson tarafından ortaya konmuştur. O günden bugüne birçok çözüm teknikleri geliştirilmiştir [2] . Montaj hatları genellikle bant üzerinde oluşturulmuş çalışma istasyonlarından oluşmaktadır. İşler ise hat üzerinde bir istasyondan diğer istasyona doğru sırasıyla yapılmaktadır. Her istasyonda, çevrim süresini geçmemek kaydıyla görevler tamamlanmaktadır. Montaj işlerini, montaj sürecindeki

kısıtlara uyarak, bir veya daha fazla amacı en iyi hale getirecek şekilde hangi sıralı istasyonda yapılacağının kararını verme problemine de montaj hattı dengeleme problem denmektedir [3] .

Sanayi de yaşanan yoğun rekabet koşulları sebebiyle ürünlerin birim maliyetini düşürmek üreticilerin başlıca hedefi olmuştur. Kapasiteyi tam kullanamama ve verimsiz iş yapmanın maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple montaj hatlarının dengelenmesi yalnız başına yeterli olmaz. Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme kavramı bu sebeple gün yüzüne çıkmıştır. Genellikle, montaj hatlarında işçiler yoğun olarak çalışmaktadır. Bu sebeple amaç, işçilik maliyetlerini en küçüklemektir. Montaj hatlarının maliyet altyapılı bir yaklaşımla birlikte dengelenmesine maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme denilmektedir [4].

Gerçek hayatta montaj hatlarının vazgeçilmez unsuru işçilerdir. Her ne kadar teknoloji ilerlese de insan gücüne olan ihtiyaç uzunca bir süre devam edecektir. Özellikle montajın son bölümlerinde insan kaynağı önemli bir rol oynamaktadır. Gerçek hayatta işçiler birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Hepsinin yeteneği ve becerisi farklılık gösterir. Aldıkları ücret de aynı şekilde tecrübesine, becerisine ve yaptığı işin önemine göre değişkenlik göstermektedir. Bu kısıtları göze alarak işçilerin montaj hatlarında işlere ve istasyonlara atanmasına montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi denmektedir.

Literatürde geçmişten günümüze maliyet tabanlı ve işçi atama problemleri ile ilgili ayrı ayrı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu tezde amaç ilk kez maliyetler göz önünde bulundurularak montaj hattı üzerinde dengeleme problemi çözülecektir. Bu yöntemin adı ise Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama (M-MHDİA) olarak tanımlanmaktadır.

Bu tezde maliyet tabanlı amaç fonksiyonu ile birlikte montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi ele alınacaktır. M-MHDİA problemi, montaj maliyetlerini en küçükleyecek, montaj sürecindeki kısıtları karşılayacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına mümkün atamasını yaparken aynı zamanda uygun işçilerin istasyonlara atanmasını da kapsamaktadır. Bu çalışmada, maliyet tabanlı montaj hattı işçi atama ve dengeleme için matematiksel model önerilecektir. Ayrıca, önerilen modelden çıkan sonuçlar, istasyon odaklı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama (MHDİA) problemi sonuçları ile kıyaslanacaktır.

Bu tez yedi (7) ana başlıktan oluşmaktadır. İlk bölümde giriş bölümü bulunmaktadır. Genel hatlarıyla montaj hatları ve gereksinimi üzerine durulmuştur. İkinci bölümde montaj hatları ve üretim sistemleri incelenmiş olup, montaj hatlarının üretimdeki yeri üzerine, sınıflandırılması ve kullanım şekilleriyle ilgili detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde problem tanımı yapılmıştır. Öncelikle, montaj hattı dengelemenin tanımı yapılmış

daha sonra tezin konusu olan maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme ve işçi atamanın tanımı yapılmıştır. Dördüncü bölümde literatür araştırması yapılmıştır. Basit montaj hattı dengeleme, montaj hattı dengeleme ve işçi atama, maliyet tabanlı montaj attı dengeleme ile ilgili literatürde geçen çalışmalar özetlenmiştir. Beşinci bölümde tez kapsamında kullanılmış olan matematiksel modeller detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Altıncı bölümde önerilen matematiksel modelin çözümleri üzerinde analizler yapılmıştır ve yedinci bölümde sonuçların genel bir değerlendirmesine yer verilmiştir.

2.MONTAJ HATTI DENGELEME

2.1 Üretim Sistemleri ve Sınıflandırılması

Bir canlının yaşayabilmesi için, vücudundaki damarlarda her an taze kan bulunması gerekir. Bir ülke ekonomisi için üretim, canlılarda yaşamı sağlayan kan gibidir. İnsan gücü ve kaynakların doğru zaman ve yerde kullanılması ile gerçekleştirilen talebi karşılayan üretim, ekonominin sağlıklı bir şekilde sürdürülebilir olması için ön şarttır [5].

Üretim tanım olarak, ekonomistler ve mühendisler tarafından ayrı şekilde tanımlanmaktadır. Ekonomistler üretimin bir fayda veya yarar getirmesi gerektiğini düşünmektedirler. Üretim, mühendisler tarafından ise, bir fiziksel varlık üzerinde onun değerini arttıran bir değişiklik yapmak veya hammadde ve yarı mamulleri mamule dönüştürmek olarak tanımlanır [6]

Üretimin amacı bir mamul veya hizmet yaratıp, ekonomideki talebe cevap vermek veya yeni iş olanakları sunmaktır. Modern üretim çok sayıda girdiden oluşan bir bileşendir. Başlıca girdiler aşağıdaki gibidir.

- Toprak (Ham madde kaynakları)
- İşçilik (İnsan gücü)
- Sermaye (Makine, fabrika vb.)
- Yönetim

Toprak (Ham madde kaynakları); Toprak üretimin temel faktörüdür. Dünyadaki maden yatakları, ormanlar, su, enerji kaynaklarını içermektedir. Bu kaynaklar üretime fayda sağlayacak hale dönüştürülemezse eğer üretim faktörü olamazlar.

İşçilik (İnsan gücü); Üretimde ham maddeyi mamule dönüştürmek veya bir hizmet ortaya koyabilmek için insan gücüne ihtiyaç son derece yüksektir. İşçilik, insanların yeteneği, eğitimi seviyesi ve maliyetine göre üçe ayrılır. Günümüzde her ne kadar otomasyon üretime dahil olmuş olsa da otomatik sistemleri de insanların kontrol ettiğini unutmamak gerekir. Sonuç olarak, işçilikte toprak gibi üretimin temel faktörüdür.

Sermaye (Para, makine, fabrika vb.); Günümüz dünyasında sermayesiz hiçbir iş yapılamadığı gibi üretiminde yapılması imkansızdır. Sermaye insan tarafından ortaya konulmaktadır. İlk çağlarda insanoğlu üretim yapabilmek için el aletleri yapmışlardır.

Görüldüğü üzere üretim yapabilmek için doğal varlıklardan kendilerine sermaye yaratmışlardır. Sermaye denilince akla sadece para getirmek doğru değildir. Sermaye, biriktirilmiş emeğin para, alet, makine, fabrika ve teknoloji şekline dönüşmesi ile oluşan bir üretim faktörü olarak tanımlanmalıdır [5].

Yönetim; Literatürde yönetim üretim faktörü olarak tanımlanmasa da günümüzde gelinen üretim seviyesinde üretim yönetimi çok büyük önem arz etmektedir. Üretim faktörlerinin yönetimi, koordinasyonu ve kontrolü her ne kadar işçilik faktörünün içerisinde gibi gözükse de artık sadece ürün veya hizmet ortaya çıkarmakla üretim yapılamamaktadır. Düzgün yönetilemeyen toprak, işçi ve sermayeden mal veya hizmet üretimi beklenemez. Bu sebeple yönetimde bir üretim faktörü olarak görülmelidir.

Sistem belli bir amaca hizmet eden ve aralarında alt-üst ilişkisi bulunan bir araya gelmiş elemanlardan oluşur. Bir üretim sistemi beş temel elemandan oluşur;

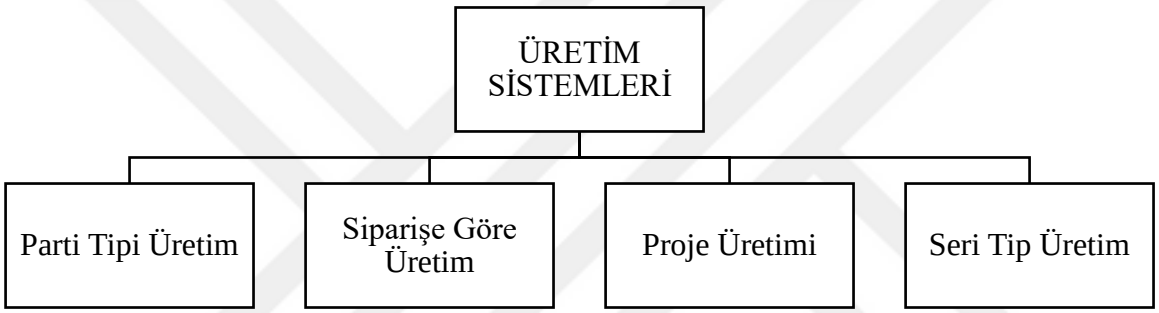
- Girdiler
- Üretim Prosesi
- Çıktılar
- Geri Besleme
- Çevre

Şekil 1. Üretim Süreci

Üretim ilk başladığı tarihten bugüne kadar birçok evreden geçmiştir ve aynı zamanda da büyük dönüşümlere uğramıştır. Bu süreçte elde edilen tecrübeler sonucu üretim sistemlerini sınıflandırmak söz konusu olmuştur. Üretim sistemleri aşağıda belirtildiği gibi sınıflara ayrılmıştır.

- Üretim Yöntemlerine Göre
- Mamul Tiplerine Göre
- Üretim Miktarına ve Akışına Göre

Fabrikalarda üretilen bitmiş ürün miktarı ile bu ürünün ham halinden başlayarak mamul haline gelen süreçteki akışı arasında bir ilişki mevcuttur. Ham maddenin mamul hale gelirken kullanılan makineler, montaj hatları, insan gücü, o ürünün fabrika içindeki akışı kendi içerisinde farklılık gösterebilir. Bu sebeple üretim miktarı ve akışına göre üretim sistemlerini genel olarak dört başlıkta inceleyebiliriz.



Şekil 2. Üretim Sistemleri

Parti Tipi Üretim: Bir ürünün sürekli talebi karşılamak amacıyla parti halinde yüksek miktarlarda yapılan üretim şeklidir. Bir parti ürünün üretiminin bitmesiyle birlikte aynı makine, tezgâh ve işçi gücüyle başka ürünün parti halinde üretilmesi mümkündür. Ancak parti tipi üretimde bir partinin üretimi tamamlanmadan başka bir partinin üretimine başlayamaz. Parti tipi üretim endüstride en sık rastlanan üretim tipidir. Ürün çeşitliliğinin düşük olması, işlem tekrarlarının sık olması sebebiyle üretim maliyetleri oldukça düşüktür. Parti tipi üretimine örnek olarak konfeksiyon, ev eşyası, gıda ve otomobil üretimi gösterilebilir.

Siparişe Göre Üretim: Bir mamulün özellik, kalite ve miktar bakımından özel olarak bir kullanıcı için üretilmesidir. Bu tip üretimde üretim zamanları, kullanılacak ekipmanlar, işçiler her zaman değişkenlik göstermektedir. Ürün gamı geniş olduğu için özel tezgahlar kullanılmaktadır. Fabrika yerleşimi gelen her siparişte değişiklik gösterebilir. Siparişe göre üretimin birkaç dezavantajı vardır ve bu sebeple tercih edilmeyen bir üretim sistemidir. Makine ve insan gücünden yararlanma oranları oldukça düşüktür. Her bir siparişe göre ayrı bir üretim

planlaması ve yerleşim yapılması gerekmektedir. Belirli bir düzen bulunmadığından düşük kalite ürünler bu sisteme örnek verilebilir.

Proje Üretimi: Bir ürünün sadece bir kez üretilmesi için üretim girdilerinin bir araya geldiği sistemlerdir. Proje üretiminde bir akış söz konusu olmadığı için, üretimi yapmak için gereken kaynaklar üretimin gerçekleştiği yere getirilmektedir. Bu tip üretimde birim fiyatlar çok yüksektir. Planlama ve faaliyetlerin koordineli bir şekilde uygulanması çok zor ve karmaşıktır. Bu üretimine örnek olarak gemi üretimi, uzay mekikleri üretimi ve uçak üretimi örnek olarak gösterilebilir.

Seri Üretim: Bu üretim sisteminde üretilen miktar yüksek ancak çeşitlilik oldukça azdır. Ürüne olan talebin sürekliliği esastır. Sürekli üretimin diğer üretim sistemlerinden farklı kılan ana özelliği akış olmasıdır. Sisteme giren hammadde belirli işlemlerden bir hat üzerinden sırayla gerçekleştirilerek mamul olur. Fabrikalarda sürekli üretim sistemlerde bütün kurgu o ürünün üretilmesi üzerine yapılmıştır. Fabrika yerleşimi, makine ve ekipman, operatörler, işçiler bu ürüne özel olarak dizayn edilir ve seçilir. Parti tipi ve Proje üretiminin aksine kapasite kullanımı sürekli üretimde oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca sürekli üretim olduğu için birim maliyet oldukça düşüktür.

Seri üretim ikiye ayrılır. Sürekli seri üretimde makine ve tesisler sadece bir tip ürünü üretmek için kurgulanmışlardır. Aynı mekân da başka bir ürünü üretmek olanaksız olup veya maliyetleri çok yüksek olmaktadır. Üretimde bulunan hammaddeler kendiliğinden bir akış içerisindedir. Bu üretim şekline örnek olarak çimento, şeker, petrol rafinerisi, motor, beyaz eşya fabrikaları örnek gösterilebilir.

Kesikli seri üretim daha çok akışa sahip kütle üretimi olarak adlandırılmaktadır. Üretilen ürünlerin üretim süreleri ve miktarları sürekli seri üretime kıyasla çok daha uzun ve fazladır. Ancak başka bir ürün üretme esnekliği sağlar. Kesikli seri üretim kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Transfer hatlarında ürünler otomatik malzeme taşıma sistemleriyle birlikte bir hattan diğer hatta taşınarak işlem görür. Bu sistemlerde farklı ürünlerin partiler halinde üretilmesi de söz konusu olabilir. Diğer sistem ise montaj hatları olup bu tezin kalan kısmında bu konu üzerine daha detaylı bir şekilde durulacaktır.

2.2 Montaj Hatlarıyla İlgili Genel Kavramlar

Montaj hatlarının tasarlanmasında ve talep değişikliklerine göre üretim hızının tekrar ayarlanmasında ortaya çıkan en önemli problem Montaj Hattı Dengeleme problemidir. Montaj hattında yerine getirilecek görevlerin aralarındaki öncelik ilişkileri ihlal edilmeden, belirlenmiş bir çevrim süresi içerisinde ve belirli bir performans ölçütü en iyi olacak şekilde istasyonlara atanması problemidir [84]

Montaj hattı dengelemesi ve hatlarıyla ilgili bu çalışmada karşımıza çıkacak terim kavramlar aşağıda açıklanmıştır [84].

Montaj: Bir ürünü mamul haline getirmek için, işçi gücü veya robotlar yardımıyla birleştirme yapılan işleme denir.

Görev: Bir montaj hattında tamamlanması gereken işlerin, işin özelliğine göre bölünebilecek en küçük parçasıdır.

Görev zamanı: Bir görevin tamamlanabilmesi için gereken zamandır.

Toplam görev zamanı: Tüm istasyonlardaki görevlerin tamamlanabilmesi için gereken zamandır.

İş istasyon: Bütün görevlerin gerçekleştirileceği yerlere verilen ad istasyondur.

İstasyon zamanı: Atanan bütün görevlerin görev zamanlarının toplamına denir.

İstasyon boş zamanı: Çevrim süresi ile hatta açılan bir istasyonun istasyon zamanı arasındaki farktır.

Çevrim süresi: Montaj hattındaki bir istasyona atanan görevlerin tamamlanabilmesi için ayrılan süreye denir. Çevrim süresi bir montaj hattını oluşturan bütün istasyonlar için eşittir. Hattan ardı ardına tamamlanmış iki ürün arasındaki geçen zamanı ifade eder.

Toplam boş zaman: Montaj hattı üzerindeki bütün istasyonların toplamdaki boş zamanlarına eşittir.

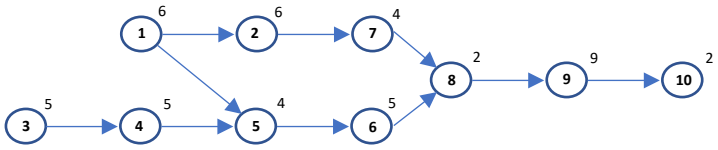
Denge Gecikmesi: Toplam boş zamanın, ürünün hat boyunca harcadığı zamana oranıdır. Hattın etkinliğini belirler.

Hattın verimliliği: Görev süreleri toplamının, ürünün bütün hat boyunca harcadığı zamana oranıdır.

Tam dengelenmiş hatlarda, bütün istasyonlar dolu, toplam boş zaman sıfırdır. Bu sebeple hattın verimliliği 100, denge gecikmesi 0‘dır.

Düzgünlük indeksi: Dengeleme performansının bir ölçüsü olarak kullanılır. Tam dengelenmiş hatlarda düzgünlük indeksi sıfırdır. İstasyon zamanının en büyük istasyon zamanından farklarının kareleri toplamının karekökü̈dür.

Öncelik Diyagramı: Ürünlerin üretim şekli birbirinden farklılık gösterir. Ancak genellikle hepsi teknik sebeplerden dolayı bir sırayı takip etmektedir. Bu sebeple, bir montaj hattındaki görevler arasında öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Öncelik diyagramı görevlerin ilişkilerini şekil olarak ifade eder.



Şekil 3. Öncelik Diyagramı

Örneğin 5 numaralı göreve başlayabilmek için, 1 ve 4 numaralı görevlerin tamamlanması gerekmektedir. Aksi halde 5 numaralı göreve başlanamaz. Başka bir örnek verecek olursak, 8 numaralı görevin başlayabilmesi için 6 ve 7 numaralı görevlerin bitmesi gerekmektedir. Görevler arasındaki bu ilişkiye öncelik ilişkisi denir.

Öncelik Matrisi: Bir montaj işleminde bulunan görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin ifade edildiği, boyutu montaj işlemindeki görev sayısına eşit olan ve aij elemanlarından meydana gelen ikili bir kare matristir. Eğer öncelik diyagramındaki j görevi i görevini takip ediyorsa yani ardılı ise, öncelik matrisinin aij elemanı 1 değerini, aksi durumda 0 değerini alır**.**

		Görev									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Görev	1	--	1	0	0	1	1	1	1	1	1
	2		--	0	0	0	0	1	0	1	1
	3			--	1	1	1	1	1	1	1
	4				--	1	1	1	1	1	1
	5					--	1	1	1	1	1
	6						--	1	1	1	1
	7							--	1	1	1
	8								--	0	1
	9									--	1
	10										--

Şekil 4. Öncelik Matrisi

En küçük istasyon sayısı: Çevrim süresinin üzerine çıkmayacak şekilde, görevlerin istasyonlara atanması sırasında ihtiyaç duyulan en az istasyon sayısıdır.

İstasyon tıkanması: Bir ürün bir istasyonda hazır hale geldikten sonra öncelik ilişkisi kurallarına göre bir sonraki istasyona geçecektir. Ancak, herhangi bir sebepten bu durum gerçekleşmiyorsa, sırasına geçemeyen ürün, işlem gördüğü istasyonda beklemek zorunda kalacaktır. Bir sonraki istasyona geçene kadar, mevcut istasyonda işlem yapılamaz hale gelmesine istasyon tıkanması denir.

İstasyon açlığı: Bir istasyona görevi gerçekleştirebilmek için bir ürün gelmeyip boş kalıyorsa bu duruma istasyon açlığı denir.

Gecikmesiz hatlar: Her bir istasyondaki işler tamamlansın veya tamamlanmasın verilen süre bittikten sonra, sıradaki istasyona teslim edilir.

Gecikmeli hatlar: Her bir istasyondaki işler, tamamlanma süresi değişkenlik göstermesine rağmen tamamlandıktan sonra sıradaki istasyona geçmesi durumudur.

MHD hakkında kullanılan başlıca terimler yukarıda bahsedilmiştir.

2.3 Montaj Hattı Dengeleme

Günümüzde fabrikalarda üretim sistemleri oluşturmak büyük bir önem kazanmıştır. Bu oluşumun takipçileri endüstri mühendisleridir. Özellikle uluslararası piyasalarda boy göstermek isteyen firmalar için bu sistemler şart olmuştur.

Küresel daralmadan ötürü düzenli olarak iş alabilmek ve bununla beraber üretim yapabilmek neredeyse hayal olmuştur. Düzensiz iş, montaj hatlarını doğrudan etkiler. Dengeleme işlemi bu tür durumlarda büyük önem arz etmektedir. Üretim hızını esnek bir şekilde kontrol edebilmek için istasyonlardaki iş miktarını dengelemek gerekir. İstasyonlardaki iş yükleri eşit olarak dağıtılabildiğinde, bu durum işveren açısından pozitif etki yaratacaktır.

Üreticiler genellikle yüksek miktarda üretim yapabilmek için montaj hatlarını kullanırlar [7]. Seri tip üretimlerde kurulan sistemlerde montaj hatlarının önemi oldukça fazladır. Malzemelerin, akış hattı boyunca işgücü veya mevcut donanımdan yararlanılarak transfer edildiği ve parça üzerindeki işlemlerin, aralarındaki öncelik ilişkileri ve çevrim süresi gibi kısıtlar göz önüne alınarak birleştirilmesiyle oluşturulan istasyonların yine bir hat boyunca sıralanmasıyla oluşan sisteme montaj hattı denir [8].

Montaj hatları genellikle bant üzerinde oluşturulmuş çalışma istasyonlarından oluşmaktadır. Görevler ise hat üzerinde bir istasyondan diğer istasyona doğru sırasıyla yapılmaktadır. Her istasyonda, çevrim süresini geçmemek kaydıyla görevler tamamlanmaktadır. Montaj işlerini hangi istasyonda yapacağının kararını verme problemine de montaj hattı dengeleme problem denmektedir [3].

MHD problemi bir ürünü üretmek için toplam iş yükünün dengeli bir şekilde hat boyunca istasyonlara dağıtılmasıdır. Montaj hattı dengeleme problemleri iki sebeple ortaya çıkmaktadır. Birinci olarak sistemde eğer montaj hattına ihtiyaç duyulursa, ikincisi ise mevcut montaj hattının yeniden yapılandırılması gerekirse problemler baş göstermektedir. Basit montaj hattı dengeleme problemi yarım asırdır araştırmacıların ilgisini çekmiştir ve üzerinde birçok çalışma yapılmıştır.

Bir ürünün montaj hattında üretiminin yapılabilmesi için toplam işin görevlere bölünmesi gerekmektedir. Görevleri yerine getirebilmek için görev süresi, gerekli ekipmanlar veya eğitimli operatörlere /işçilere ihtiyaç vardır. Ayrıca görevlerin öncelik sıralarını göz ardı etmemek gerekmektedir.

Bu saydığımız unsurlar öncelik diyagram metoduyla özetlenebilir ve görselleştirilebilir. Her görev için bir düğüm ve bu düğümler görev zamanlarını göstermektedir. Düğümler arasındaki oklar ise öncelik ilişkisini göstermektedir. Şekil 3.de öncelik ilişkilerini gösteren diyagramı görüyoruz. Bu diyagramda 10 tane görev var ve minimum 2 maksimum 9 görev zamanları her okta belirtilmiştir. Öncelik kısıtları olarak örneğin görev beş (5), bir (1) ve dört (4) numaralı görevler tamamlanmadan üç (3) tamamlanamaz. Öbür taraftan bakacak olursak, görev beş (5) tamamlanmadan altı (6), sekiz (8), dokuz (9), on (10) numaralı işler başlayamaz [3].

Montaj hatları yüksek kapasiteli üretimin olduğu yerlerde ön plana çıkmaktadır. Bir veya birden fazla ürünün üretildiği bir montaj hattı oluşturulduğunda buradaki birinci problem hattın dengelenme problemi olacaktır. Hattın dengelenme problemiyle yapılmak istenen şey, üretimin verimini arttırmaktır. Çevrim süresini aşmayacak şekilde, uygun iş gücünün doğru istasyonlara minimum maliyetle, öncelik ilişkilerini değiştirmeden atanması üzerine kurgulanmaktadır.

Montaj hatlarının dengelenmesi bir üretimin en temel konularından bir tanesidir. Montaj hatları tasarlandığında işlerin istasyonlardaki işlem süresi farklılık gösterir. Amaç istasyonlar arasındaki bu süre farklılıklarını mümkün olduğunca en aza indirmektir. Böylece montaj hatlarındaki verimlilik artacaktır. Verimliliğin artmasıyla maliyetler aynı oranda düşüş gösterecektir. Böylelikle yukarıda da belirttiğim gibi montaj hattı dengeleme problemleri üretimin vazgeçilmez konularından bir tanesidir.

Montaj hatlarının en büyük gider kalemlerinden bir tanesi işçiliktir. Her ne kadar Endüstri 4.0 ‘ın fabrikalardaki etkisi artsa da operatörler, montaj işçileri işletmelerin olmazsa olmazlarıdır. Bu sebeptendir ki yüksek miktarda işçilik gerektiren ürünlerde işgücünün maksimum düzeyde kullanılabilmesi çok önemlidir. Aksi takdirde verimlilik düşer ve ürün başına maliyet artar.

2.4 Montaj Hattı Dengelemede Temel Prensipler

Montaj hatlarının düzenlenmesi için aşağıdaki prensiplerin en iyi uyumuna göre yapılır [9].

İşgücü Prensibi: Montaj hattında hangi miktarda işgücüne gerek duyulduğu, işgücünün nerelerde bulunması gerektiğine dair cevaplar aranır.

İş Akışı Prensibi: İşlemler belli bir iş akışını sağlamalıdır. Sürekliliği sağlamak açısından bu durum önemlidir.

En küçük hareket uzaklığı prensibi: Montaj hattı üzerindeki mesafelerin oluşturacağı maliyet, darboğaz ve depolama açısından en küçük uzaklık olmalıdır.

Sabit Yol Prensibi: İşlemler son aşamaya kadar aynı yol üzerinde ilerlemelidir.

İşlemlerin Eş Zamanlı Sürdürülmesi Prensibi: Montaj işlemleri ilk istasyondan son istasyona kadar eş zamanlı yapılır.

Parçaların değişe bilirliği prensibi: Montaj işlemi sırasında bazı parçalar işlemleri etkilemeden değiştirilebilmelidir.

Birim İşlem Prensibi: Ürün üzerindeki her işlem, en küçük işlem birimlerine ayrılmıştır.

En Küçük İşlem Süresi: Montaj işlemi en kısa sürede tamamlanmalıdır. İşlem süreleri sabit olduğuna göre kayıp zaman üzerinde en küçükleme yapılır.

2.5 Montaj Hattı Dengelemenin Amaçları

Otomobil, ev eşyaları gibi pek çok sektörde ürünler taşınarak veya bir konveyör sistemi üzerinde belirtilen işlem sıralarıyla montajlanır. Bu işlemler tezgahlar veya insan gücüyle yapılmaktadır

Hat dengelemenin sonucunda ortaya çıkması beklenilen durum, üretimin duraksamadan devamlılığı, aynı anda işçilerin tezgahlara atanıp, işçilere uygun işler verilmesi ile yüksek miktarda kapasite kullanımı gerçekleşmesi, verimliliğin artıp maliyetin düşük olmasıdır. Bu durumlar sağlandığında boşta geçen zaman minimize edilir ve işlem süreleri arasındaki fark azaltılır.

Yukarıda da belirtildiği gibi montaj hatlarında ya insan gücüne ya tezgahlara (otomatik) ya da aynı anda her iki bileşene de ihtiyaç duyulabilir. Bir ürünün hammaddeden sonraki en büyük maliyetli girdisi işçiliktir. Bu sebeple yola çıktığımızda dengeleme yaparken kapasite kullanımından en iyi şekilde yararlanmak gerekir. Çünkü boşta kalan her işçi ve her tezgâh işverenin hanesine eksi yazacaktır.

Aşağıda bir montaj hattı dengelenirken hangi amaçlara ulaşılmak istendiği belirtilmiştir [10];

- Düzenli bir malzeme akışını sağlamak
- İnsan gücü kullanımını en üst düzeye ulaştırmak
- Makine kapasitelerini en üst düzeyde kullanmak

- İşlemler için en az süreyi kullanmak
- İşlemler için en az miktarda kaynak kullanmak
- Boş zamanları veya dengeleme kayıplarını en küçüklemek
- Denge kayıplarını iş istasyonları arasında düzgün şekilde dağıtmak
- Hat dengeleme maliyetini en küçüklemek

Bütün bu amaçların hepsini bir seferde gerçekleştirmek imkansızdır. Bu yüzden işlemin adı dengeleme olarak konmuştur. Dengelemedeki ana amaç, bu çelişkilerin göz önüne alınarak en büyük faydayı sağlayacak çözüme ulaşılmasıdır. Bütün bu uygulamalar yapılırken montaj maliyetlerini minimumda tutmak esastır. Bu yüzden de işgücünün doğru ve tam kapasitede kullanmak gerekmektedir.

2.6 Montaj Hattı Dengelemesini Etkileyen Temel Faktörler

MHD dengeleme problemin de dengeleme yapılırken hattı etkileyen iki ana neden vardır. Bunlar;

- Birincil Kısıtlar: Her MHD probleminde olmak zorunda olanlar
- İkincil Kısıtlar: Montaj Hatlarında gereksinim durumuna göre olması gereken kısıtlardır.

Birincil kısıtlar iki tanedir. Çevrim süresi istasyona atanan görevlerin belirlenen zaman içinde tamamlanması gereken en fazla süredir. Bir ürün bu sürenin üzerinde istasyonda bekletilemez, diğer hatta geçmesi beklenir. Öncelik ilişkisi ise bir sonraki işin başlayabilmesi için montaj hattın belirlenen öncül iştir.

İkincil kısıtlar belirtildiği gibi gereksinim durumuna göre var olan kısıtlardır.

Konum kısıtı, büyük hacimli ürünlerin hepsi montaj hattında üretilemeyip, hattın dışında veya bir başka istasyonda montajının yapıldığı durumlarda meydana gelmektedir.

Sabit donanım kısıtı, montaj esnasında kullanılan bazı ekipmanlar kendi hacimleri büyük olduğunda bir yerde sabit kalma durumudur.

İstasyon yükü kısıtı, gecikme öngörülen istasyonlar olduğu zaman, bazı istasyonlarda çevrim süresinden önce işin bitirilmesi istenmedir. Böylece toplam çevrim süresi aşılmaz.

Aynı iş istasyonuna atanması istenen görevler, ürünün montajı sırasında ortak ekipman kullanma durumu bulunduğunda sırasıyla atanmaktadır.

Aynı iş istasyonuna atanmaması gereken görevler, çalışan işçilerin yükünü hafifletmek adına şartları ağır olan işlerin farklı istasyonlara atanması durumudur.

2.7 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

Montaj Hatlarının sınıfları bir den fazla şekilden oluşmaktadır. Öncelikle model sayısına göre montaj hatları üç ana modelden oluşur. Bunlar, tek modelli, karışık modelli ve çok modelli hatlardır. Montaj hatlarının kontrol yapısına göre ise gecikmeli ve gecikmesiz hatlar vardır. Aynı şekilde otomasyon seviyesine göre montaj hatları gecikmeli ve gecikmesiz hatlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Son olarak ta yerleşim şekillerine göre montaj hatları düz, U tipi ve Paralel hatlar olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir.

Aşağıdaki tabloda montaj hatlarının sınıflandırılması özetlenmiştir.

Tablo 2.7. Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

Sıra	Sınıflandırma	Hat Çeşitleri		
1	Model Sayısına Göre	Tek Modelli Hatlar	Karışık Modelli Hatlar	Çok Modelli Hatlar
2	Kontrol Yapısına Göre	Gecikmeli Hatlar	Gecikmesiz Hatlar	
3	Otomasyon Seviyesine Göre	Manuel Hatlar	Otomatik Hatlar	
4	Yerleşim Şekline Göre	Düz Hatlar	U tipi Hatlar	Paralel Hatlar

2.7.1 Model sayısına göre

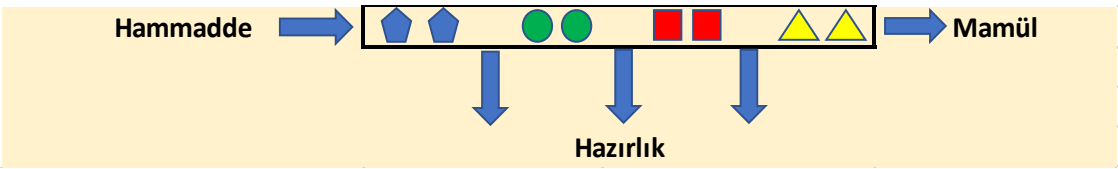
Üretim hatlarında bir veya birden fazla ürünün üretilmesine göre yukarıdaki çizelgede görüldüğü montaj hatları üç kategoriye ayrılmaktadır. Eğer yalnızca bir model üretim hattında üretilmekteyse bu tip montaj hatlarına tek modelli montaj hattı adı verilmektedir. Bir tip ürünün üretimi tamamlanıp aynı hatta farklı tip ürünün üretimi başlayacaksa, bu tip montaj hatlarına çok modelli montaj hattı denmektedir. Son olarak eğer, bir montaj hattında aynı anda bir den fazla tip ürün üretiliyorsa, bu tip montaj hatlarına da karışık modelli montaj hatları denmektedir.

Şekil 5. Montaj Hatları

Tek modelli hatlar: Günümüzde rekabet koşullarının artmasıyla birlikte tek tip ürün üreten bir fabrika neredeyse yok denecek kadar azdır. Tek modelli hatlar, yalnızca bir tip ürünün yüksek miktar ve hacimlerde üretildiği hatlardır. Aşağıdaki şekil tek modelli montaj hattının akış örneğini göstermektedir.

Şekil 6. Tek Modelli Hatlar

Çok modelli hatlar: Bu tip hatlarda bir den fazla ürünün partiler halinde, ürünler birbirine karışmayacak şekilde üretim yapılır. Çok modelli hatlarda dengeleme yapılırken parti şeklinde üretim yapıldığı için hazırlık zamanı ve maliyetlerinin önemi büyüktür. Burada harcanan zamanın ve maliyetlerin hesaplanması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde çok modelli bir hat örneği gösterilmektedir.



Şekil 7. Çok Modelli Hatlar

Karışık modelli hatlar: Hat üzerinde bir den farklı ürünün aynı anda üretildiği montaj hatlarıdır. Günümüzde müşteri ve pazarın talebini karşılamak için karışık montaj hatları önemli bir yer tutmaktadır. Fabrikalar Bir den farklı ürünü üretme becerisine sahip olduğu için oldukça esnektir. Bunun yanında ortaya çıkabilecek birkaç olumsuzlukta söz konusudur. Her ürünün

üretim şekli, ihtiyaç duyduğu kaynak ve operatör farklı olduğundan fire ve boş geçirilen zamanlar fazla olabilmektedir. Bu sebeple karışık modelli hatlarda dengeleme yapmak oldukça zordur.

Karışık modelli hatların kullanıldığı sektörler beyaz eşya, otomotiv ve gıda sektörleri örnek olarak gösterilebilir. Aşağıda bu modelleri özetleyen akış şekli bulunmaktadır.

Şekil 8. Karışık Modelli Hatlar

2.7.2 Kontrol yapısına göre

Montaj hatları kontrol yapısına göre gecikmeli ve gecikmesiz hatlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Montaj hattı tasarımı yaparken, gecikmeli veya gecikmesiz bir hat üzerinde karar verilmelidir. Gecikmesiz hatlarda, her istasyona ürünleri üretmek için eşit zaman verilir. Çevrim süresi sonunda sistem yeni istasyona geçildiğini öngörür.

Gecikmesiz hatlarda, belirlenen çevrim süresi verilerek, tüm istasyonların çevrim süresi kısıtına uyacak şekilde görev sürelerini ayarlaması beklenmektedir. Konveyörler ya da hareketli bantlar türevi ekipmanlarda, parçalar bir istasyondan diğer bir istasyona hareket eder. İstasyonlara eşit süreler verildiği için operatörlerin görev süreleri eşittir. Bu konuda literatür de pek çok çalışmaya rastlanmaktadır [3].

İnsan faktöründen dolayı problemler genellikle stokastik işlem zamanlı tasarlanır. Dengenin sağlanabilmesi için gecikmeli hatlar tasarlamak her zaman daha doğrudur. Çünkü görevlerin zamanında tamamlanamama olasılığı göz önüne alınmalıdır.

Gecikmeli hatlarda, iş istasyonlarının sürelerinin çevrim süresini aşmasına izin verilmektedir. Bu durum iş istasyonlarının önünde ara stok oluşması anlamına gelmektedir. Tampon, takip eden istasyonda bir önceki işlem devam ederken iş parçasının tutulduğu yer olarak adlandırılmaktadır. Tampon kapasiteleri kısıtlı olduğundan, eğer takip eden tampon tam doluysa istasyon tıkanır. Başka bir olumsuz durum ise istasyon açlığı olarak adlandırılır. İstasyon işlem yapmaya hazır olduğunda işleme alacak parça bulunamazsa, istasyon boş bekler. Bu iki durumu engellemek için, genelde ideal tampon stok seviyesi belirlenmektedir [11].

2.7.3 Otomasyon seviyesine göre

Montaj hatları günümüzde otomasyon seviyesine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar manuel ve otomatik hatlardır.

Günümüz dünyasında Avrupa'nın önderliğinde Endüstri 4.0 üretim şekline doğru ülkeler adım adım ilerlemektedirler. Otomasyon ve robotların montaj hatlarında kullanım sayısının artışı kimi fabrikalarda işe yararken, hali hazırda manuel çalışmaya devam eden sanayilerde mevcuttur. Bu sanayi ve sektörlerde ürünlerin özelliklerinden ötürü işgücüne dayalı montaj hattı kullanılmaktadır. Eğer makineleşme için yapılacak olan yatırım maliyeti, iş gücü maliyetinden yüksekse, manuel hatlar tercih edilmektedir. Manuel montaj hatları özellikle kırılgan ve hassas parça üreten firmalar tarafından tercih edilmektedir.

Manuel hatlarda dengeleme çalışmasına gidilmeden önce dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibidir.

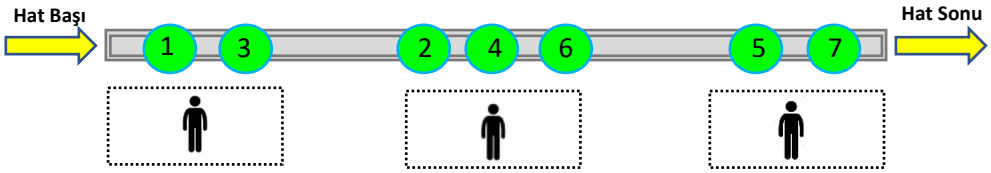
- Görev zamanlarının işçi performanslarını dikkate alarak stokastik olması gerekmektedir.
- İşçiyi etkileyen çevresel faktörler, stres, motivasyon, fiziksel koşullar performansı etkileyebileceği için göz önünde bulundurulmalıdır.
- Görev zamanları belirlenirken çalışan işçilerin deneyimleri düşünülmelidir. Deneyim arttıkça görev zamanı azalmaktadır.
- Hatların yerleşim şekli büyük önem taşımaktadır. Özellikle U tipi hatlarda istasyonlar arası yardımlaşma mümkündür. Bir operatör başka bir istasyondan sorumlu olabilmektedir. Bu tip yerleşimler manuel hatlarda sıklıkla görülmektedir.

Otomatik hatlarda hat boyunca oluşturulmuş istasyonlar, istasyonlardaki görevler ve istasyonlar arası transfer otomatik olarak yapılmaktadır. İstasyon arası transfer iki yolla yapılmaktadır. Mekanik olmayan hatlarda bu işlem elle yapılır. Ancak bu sistem de işçi sağlığı üzerinde ciddi problemler yaşatabileceği için, mekanik hatlar tercih edilmektedir. Mekanik hatlar otomatik hatlardır ve günümüzde birçok ürünün üretiminde ve transferinde otomasyon yer almaktadır. İş gücü maliyetini düşürebilmenin yegâne yolu otomasyon kullanmaktır. Bu durumun sağladığı montaj hattı dengelemede en büyük avantaj görev zamanlarındaki değişkenliğin neredeyse hiç olmamasıdır. Ayrıca, manuel hatlarda yaşanan gecikmeler ve boş bekleme süreleri, otomatik hatlarda çok az oluşmaktadır.

2.7.4 Yerleşim şekline göre

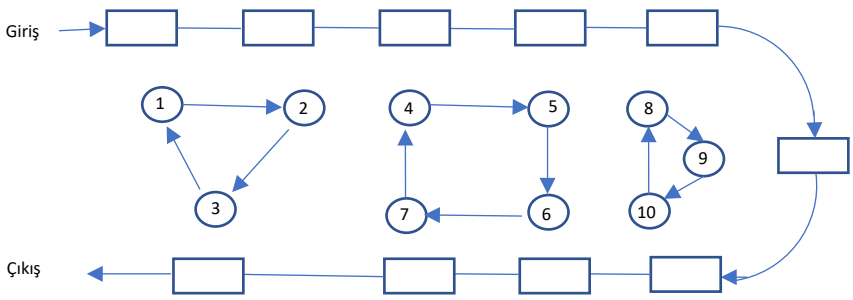
Üretim sektöründe o kadar çeşitli ürün vardır ki, buna göre fabrikalarda kurulacak olan istasyon sayısı ve çalıştırılacak işçi sayısı farklılık gösterir. Bunun dışında üretimin yapılacağı yer, makine ekipman maliyeti ve istasyonların konumlandırma şekilleri montaj hatlarında büyük önem taşımaktadır. Montaj hatları üretim de bir den fazla şekilde yerleşime sahiptir. En temel olanları düz, U tipi ve paralel montaj hatlarıdır.

Düz Montaj Hatları: Montaj hatlarının temelinde yatan ilk ve en klasik yerleşim şeklidir. İstasyonlar ardı ardına sıralanıp, ilk istasyonda başlayan montaj sırasıyla tüm istasyonlardan geçerek son istasyondan mamul şeklinde hattı terk eder. Bu tip hatlarda iş akışı basit ve hızlıdır. Yerleşim ve konumlandırma anlamında kolay olması, servis kolaylığının olması ve bant sistemlerine uygun olmasından dolayı düşük maliyetli üretim yapılabilmesi diğer avantajlı yanıdır. En büyük dezavantajı ise düz montaj hatları üretim alanında çok yer kaplaması ve işçiler arası iletişimin yetersiz kalması gösterilebilir.



Şekil 9. Düz Montaj Hattı

U- tipi Montaj Hatları: Geleneksel düz hat yerleşimlerinin aksine Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından ilk kez U-tipi montaj hattından bahsedilmiştir [12]. Bu tip yerleşim de hattın başlangıç noktası ile bitiş noktası aynı taraftadır. Bu uygulama ilk kez Toyota fabrikasında uygulanıp devreye alınmıştır. Toyota fabrikasında üretim çeşitliliğinin artması atölye içerisindeki iş yükü dağılımını derinden etkilemiştir. Düzenli bir akış yakalanamadığı için, esneklik yaratmak şart olmuştur. İşçilerin istasyonlarda daha verimli kullanılması için U-tipi montaj hattı düzenine geçilmiştir.

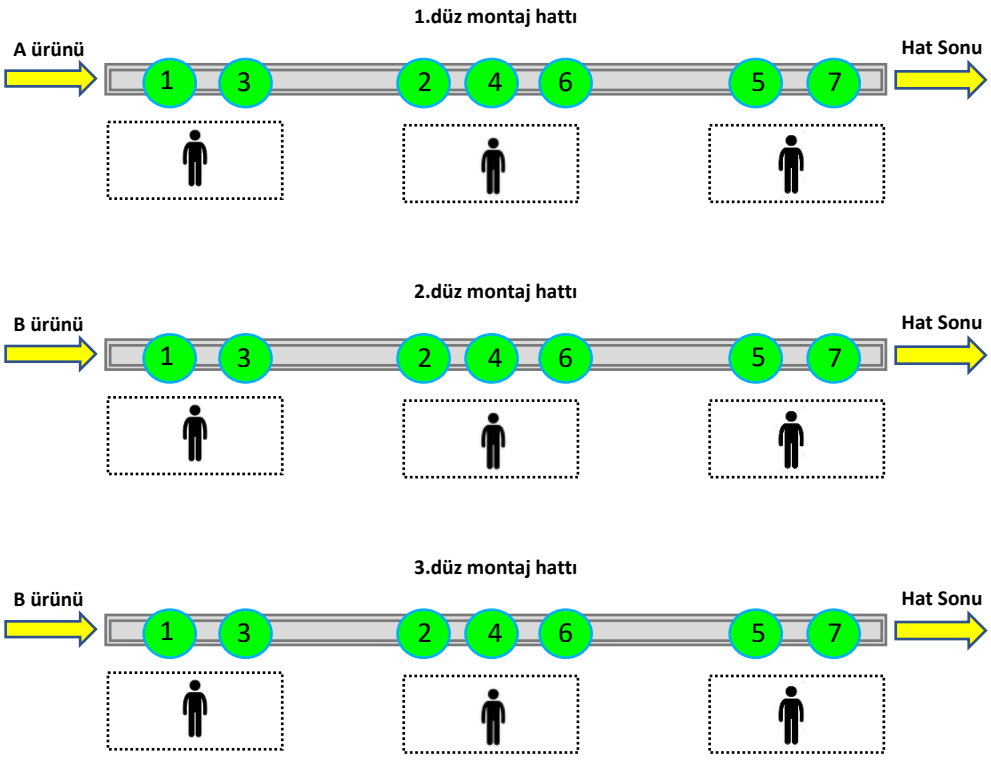


Şekil 10. U-tipi Montaj Hattı

U-tipi montaj hatlarının geleneksel montaj hatlarıyla kıyaslandığında birçok avantajı bulunmaktadır [12];

- U-tipi montaj hattında çalışan işçiler arasındaki iletişim düz montaj hatlarındaki iletişim seviyesine göre daha yüksektir. Bu durum ortaya çıkabilecek problemler de işçilerin daha çabuk çözüm bulabilmesini kolaylaştırır.
- U-tipi hatlarda çalışan işçiler düz hatlarda çalışan işçilere göre çok daha niteliklidir. Bir den fazla hatta dönüşümlü görev aldıkları için üretim hakkında genel çerçeveye daha hakimlerdir. Bu durum işçilerin daha bilinçli çalışmasını sağlamaktadır.
- U-tipi hatlarda talepte meydana gelen artış ve değişikliklerde uyum sağlama ve tepki verme süresi düz hatlara göre daha çabuk gerçekleşir. Bu durum üretimde esnekliği sağladığından müşteri isteklerine kolayca yanıt verilebilir.
- Düz hatlarda üretim hacmini arttırmak için doğru orantı kurarak istasyon sayısı ve işçi sayısını arttırmak gerekmektedir. Ancak U-tipi montaj hatlarında aynı işçi ve istasyon sayısıyla üretim hacmini arttırmak mümkün olmaktadır.

Paralel Montaj Hatları: Yerleşime göre bahsi geçen son sistem paralel montaj hatlarıdır. Sanayi de düz montaj hattına sahip olan firmalar üretim hacmini ve çeşitliliğini arttırmak için bu hatların sayısını arttırarak bir den fazla montaj hattıyla çalışmalarını sürdürmektedir. Bu hatlar birbirine paralel olarak yerleştirilmektedir. Bu hatlarda ister aynı ürünü ister bağımsız iki ürünü üretmek mümkündür.



Şekil 11. Paralel Montaj Hattı

Paralel montaj hatlarının yukarıda bahsetmiş olduğum düz montaj hatlarıyla kıyaslandığında belirli avantajları vardır.

- Aynı ürün veya benzer ürünlerin paralel hatlarda üretilebilmesi esneklik kazandırır.
- Ortak kaynak kullanımına izin vererek verimliliği arttırır.
- Her bir montaj hattının çevrim süresi birbirinden farklıdır.
- U-tipi kadar iyi olmasa da işçilerin iletişim kurmaları daha kolaydır.

3. MALİYET TABANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA

3.1 Basit ve Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Basit Montaj Hattı Dengeleme (B-MHD) problemleri görevlerin istasyonlara belirli kısıtlar altında atanmasıyla ilgilenmektedir. Bu kısıtlar, öncelik ilişkileri, çevrim süresi ve atama kısıtları ile alakalıdır. Ancak günümüz koşullarında, sadece basit montaj hattı dengeleme yapmak veya yapabilmek yeterli değildir. Örneğin, literatürde görev süreleri sabit ve yapan işçiden bağımsız iken, gerçek hayatta işçinin yeteneği ve tecrübesine göre görev süreleri değişkenlik gösterir.

Salveson (1955) yılında MHD hakkındaki ilk araştırmayı yayınlamıştır. Bu başlangıçtan sonra bu alanda çalışmaların arttığı gözlemlenmiştir. Daha esnek üretim sistemleri, örneğin paralel montaj hatları, çok ve karışık montaj hatları üzerinde durulmuştur.

Genel olarak B-MHD problemlerin ana karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Sadece bir ürünün toplu halde üretilmesi
- Belirli üretim süreçleri
- İlerleme hızı ve çevrim süreleri sabit
- Öncelik ilişkileri dışında herhangi bir kısıtlama olmayışı.
- Seri üretim dizilimi
- Bütün istasyonlar eşit ekipmana ve işçiye sahip.
- Amaç fonksiyonu toplam görev süresi içerisindeki verimliliği arttırmak [15].

Montaj hatları toplam bekleme süreleri en küçüklendiği zaman dengelenmiş olur. İstasyon sayılarını sabit çevrim süresi içerisinde en aza indirmek gerekmektedir. Eğer görev tamamlama süreleri her istasyona eşit bir şekilde dağıtılmış ise, o zaman mükemmel bir dengeleme yapılmış olur. Genellikle, mükemmel dengelemeyi yakalamak çok zordur. Aşağıda MHD problemlerinde verilen kısıtları bulabilirsiniz [15];

- Bütün parametreler belirli olmalı.
- Bir görev yalnız tek bir istasyona atanabilir.

- Görevler rastgele bir sırayla değil öncelik ilişkilerine uyarak işleme konulur.
- Montaj Hattındaki bütün görevler işlemden geçmek zorundadır.
- Bütün istasyonlar kendi ekipmanlarına sahiptir ve her görevi yapabilirler.
- Görev zamanları işlem göreceği istasyondan bağımsızdır ve sabittir.
- Görevler herhangi bir istasyonda işlem görebilir.
- Montaj hattı seri dizilime sahiptir ve ne bir besleme sistemi ne bir paralel hat bu hatta alt bir hat oluşturamaz.
- Montaj sistemi sadece özel tek bir ürün için dizayn edilmiştir. Başa bir ürün üretilemez.
- Çevrim süresi sabittir. Amaç, istasyon sayısını en küçüklemektir.
- Başka bir opsiyon, istasyon sayısı sabit, amaç çevrim süresi en küçüklemektir.

Yukarıda belirtilen kısıtlar veya diğer unsurlar model de kullanılırsa, problem Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Problemi olur (G-MHD). G-MHD problemleri B-MHD problemlerinin daha kapsamlı halidir. Başka bir deyişle, B-MHD içinde olmayan etkenler, örneğin, çok / karışık modeller, alan kısıtları, gecikmeli hatlardaki kısıtlar, paralel istasyonlar, pozisyon kısıtları, kısmı montaj veya besleme, u-tipi hatlar, robotlu ve iki taraflı hatlar, maliyet kısıtları, kaynak seçimi vb. etkenler G-MHD problem yapısını oluşturur. Bu yüzden G-MHD problemleri daha gerçekçidir. [16].

3.2 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Dünya genelinde piyasalarda yaşanan durağanlık, özellikle üreticileri olumsuz yönde etkilemektedir. Pazarların daralması ile beraber küçük işletmeler için hayatta kalabilmek bile zorlaşmıştır. Bu nedenle, devamlılığı sağlayabilmek adına, dışarı atılan her harcamayı kontrol altına almak gerekmektedir. İşletme sahipleri artık yatırımlarını daha özenle seçerek yapmaktadır. Üretim yaparken, birim ürün başına düşen maliyeti hesaplama gereksinimi geçmişe göre daha büyük önem kazanmıştır. Geleneksel montaj hattına sahip olan işletmeler, kapasiteyi arttırma, kayıp hesaplama ve verimlilik hesaplaması yaparken artık ortaya çıkan maliyetleri hesaplama zorunluluğu içerisindedirler.

Yatırım maliyetinin yüksek olduğu bu üretim sisteminde kapasiteyi karşılayamama ve verimsiz çalışmanın maliyeti oldukça fazladır. Bu koşullar altında, geleneksel montaj hattı dengeleme yaklaşımları yerine, maliyet tabanlı bir amaç kullanılabilir. Montaj hatlarının

maliyet tabanlı bir amaçla dengelenmesine maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme denilmektedir. (M-MHD). Gerekli görevlerin, verilen kısıtlara uyarak, üretim maliyetini en küçükleyecek şekilde, sıralı iş istasyonlarına atanması M-MHD problemi olarak adlandırılmaktadır. M-MHD probleminin amacı, birim ürün başına düşen toplam üretim maliyetini en küçüklemektir [4] [17].

Bir montaj hattında üretilen birime dair işçilik, sermaye, kaynak maliyetleri vb. unsurlar toplam maliyeti oluşturmaktadır. Bugüne kadar işçilerin ücret oranları ve kullanılan araç gereçler ve sarf malzemeleri zaman tabanlı montaj hattı dengelemelerinde hiç dikkate alınmamıştır. Ancak maliyet tabanlı MHD problemlerinde yukarıda saymış olduğum tüm maliyetler göz önüne alınmalıdır.

Bir montaj hattında hammadde den sonra en büyük maliyet girdisi iş gücüdür. Özellikle son montaj aşamasında emek yoğunluğu fazla olan üretimlerde (otomasyon olmadığı) üretim maliyetinin büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu sebeple dengeleme yaparken işçi ücretlerinin maliyetinin hesaba katılması gerekmektedir.

Gelişmiş sanayi ülkelerinde işçiler arasında ücret politikaları farklılık göstermektedir. Yani ücretlerin her işçiye göre sabit alınması doğru değildir. Bir işçi yeteneğine, çalıştığı bölüme ve tecrübesine göre farklı ücretler alır [18]. Montaj hattında bir görevi oluşturan farklı görev değerli olabilir. Eğer herhangi bir görev münferit olarak alınırsa, onun görev değerini, birim zaman için bir maliyet oranıyla doğrudan ilişkilendirmek mümkün olabilecektir. Bu değere görevin ücret oranı denilmektedir [6].

Montaj hattındaki görevler zorluklarına göre değişkenlik gösterdiğinden, tanımlanan en zor görevin ücret oranı en yüksek olacaktır. Bir istasyonda çalışan işçinin ücret oranı o istasyona atanan görevlerin en büyük ücret oranının değerine bağlıdır [19]. İşçilere çalıştığı tam gün üzerinden ödeme yapılmaktadır. Yemek molaları, tuvalet molaları ve boş geçirdiği zamanlar dahildir. Teknik olarak, işçinin ücret oranıyla çevrim süresi çarparak ödeme yapılır. Toplam işgücü maliyeti ise aynı şekilde montaj hattında çalışan her işçiye ödenen toplam ücrettir [20].

Bir diğer maliyet unsurları makineleşme ve ürün taşıma tesisi yatırımlarıdır. Taşıma tesisin maliyeti direkt olarak montaj hattının uzunluğuna, yani istasyon sayısına bağlıdır. İstasyon sayısı arttıkça makine yatırımı da artacağından veya kısalırsa azalacağından, maliyet etkenleri arasında önemli bir yeri vardır. Görevlerin istasyonlara atanmasıyla belirtilen maliyet unsurlarının bir ilişkisi yoktur.

Son olarak hammadde maliyeti ise, görevlerin istasyonlara atanmasına bağlı değildir [6] [21].

3.3 Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama

MHD çalışmaları literatürde oldukça geniş kapsamlı yer tutmaktadır. Yapılmış olan çalışmalar teorik anlamda oldukça gelişmiş ve günümüz koşullarında da her endüstri bu çalışmalardan faydalanmaktadır. Ancak çalışmaların büyük bir kısmı gerçek hayata uygunluk konusunda noksanlık göstermektedir. Bu nedenle MHD araştırmaları pratikte uygulanabilir olmalıdır.

Geleneksel montaj hattı dengeleme problemlerinde işlem zamanları işçiye göre değişim göstermez. Ancak pratikte bu böyle değildir. İşlem zamanları her işçiden işçiye değişiklik göstermektedir. Bunun en büyük sebebi ise tecrübe, yetenek farklarının etkisidir. Hangi işçinin hangi işi yapacağının kararını dengeleme probleminin kendisidir. Literatürde bunun adına montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi denilmektedir.

MHDİA problemi ilk olarak Miralles ve arkadaşları (2007) tarafından öne sürülmüştür. Burada çevrim süresini azaltarak verimliliği arttırmak hedeflenmiştir. Bu problemde öngörülen kısıtlar aşağıdaki gibidir [22].

- Görev süreleri ve öncelik ilişkileri deterministiktir.
- Montaj hattında bir ürün bulunmaktadır.
- Seri imalat düzeni bulunmaktadır. Bekleme yoktur.
- İşçilerin görev tamamlama zamanları değişkendir.
- İşçiler hızlı veya yavaş olabilir ancak her işçinin verimliliği üst düzeydedir.
- Her işçi bir istasyona atanmıştır.
- Her görev bir istasyonda yapılmaktadır ve o istasyonda verilen görevi yapabilen işçi vardır.

Temel varsayım ve semboller oluşturulduktan sonra işçilerin görevlerde, her görev için belirlenmiş süreler içerisinde, verimliliği arttırmak için atanması hedeflenmektedir. Çevrim süresi, bir işin bir istasyonda tamamlanabilmesi için geçen süredir. Yani verimliliği arttırmak için çevrim süresini en aza indirmek gerekmektedir. Bu sebeple MHDİA problemlerinde işçilerin işi tamamlama süreleri en aza indirilmelidir.

3.4 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama

Teknolojinin her geçen gün daha ileriye gitmesiyle beraber, uluslararası ticarette rekabet ortamı gittikçe kızışmaktadır. İşletmeler, yerel ve yabancı rakipleriyle kıyasıya bir mücadele içine girmişlerdir. Gelinen bu noktada, sadece rekabet edebilmekten ziyade hayatta kalma mücadelesine dönüşen bir durum söz konusudur. Bu sebeple, işletmeler artan taleplere karşın, pazar paylarını arttırmak ve hayatta kalabilmek adına daha hızlı, daha düşük maliyetli üretim yapabilmek için yeni sistemler geliştirmek zorundadırlar.

Yüksek taleplere cevap verebilmek için işletmeler sistem kurmak durumundadır. Montaj hatları seri üretim sistemlerinden olup yüksek miktarda üretim yapabilmenin yollarından bir tanesidir. Dün montaj hattı kurmak yeterliyken, bugün sadece kurulum yapmak yetmemektedir. Kurulan bu hattın verimli çalışması ve maksimum kapasiteyi minimum maliyetlerle ulaşmak esas olmuştur.

Montaj hatlarının verimliliğindeki artış, üretim kapasitesini arttıracağı ve maliyetleri en aza indireceği için, montaj hattı dengeleme problemleri günümüzün en popüler ve fayda sağlayan konusu haline gelmiştir. 2000'li yılların başından günümüze MHD problemlerine maliyet tabanlı yaklaşım eklenerek kurulan hatlarda yapılan kaynak yatırımı ve ürün maliyetlerinin hesapları ortaya çıkmaktadır. Böylece maliyet hesapları montaj hatlarının verimliliğinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum ortaya M-MHD problemlerini çıkarmıştır. Daha sonra, literatürde montaj hattında çalışan işçilerin yeteneklerinin, çalıştığı istasyondaki görev zorluğunun ve buna dayanarak aldıkları ücretlerin birbirinden farklı olduğu göz önüne alınmaya başlanmıştır. Bu yeni kısıtları göz önüne alarak işçi atamaları gerçekleşmeye başlanmıştır ve bu durum MHDİA problemleri olarak literatürde kendine yer bulmuştur. Böylece teoride kalan düşünceler, gerçek dünyaya adapte edilmiş, rekabet ortamında işletmelere ışık tutmuştur.

M-MHD ve MHDİA problemleri bugüne kadar hiç birlikte düşünülmemiştir. İşçilerin aldığı ücretler üzerinden maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemi daha önce çözülmemiştir. M-MHDİA problemlerinde aşağıdaki kısıtlar verilmektedir.

- Amaç fonksiyonu toplam maliyetin en küçüklenmesidir.
- Bütün görevler yalnız bir işçiyle yapılmaktadır.
- Her görev bir istasyona atanmaktadır.

- Bir istasyona işçi atandıktan sonra, o işçinin yapabileceği birden fazla görev var ise o görevlerde işçinin var olduğu istasyona atanmaktadır.
- Montaj hattı üzerinde açılan veya kullanılan her bir istasyon dolu olmak durumundadır.
- İstasyona atanan görevlerin en büyük ücret oranı o istasyonun maliyet oranıdır.

Bahsi geçen kısıtların yanında görevler arasındaki öncelik ilişkisi ve tamamlanma sürelerinin çevrim süresini geçmemesi önem arz etmektedir. M-MHDİA problemlerinde birim işçilik, birim yatırım maliyeti ve istasyon maliyetlerinin toplamının en küçük değeri vermesi için bölüm 5'de matematiksel model önerilecektir.

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tezimde çalışmış olduğum Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama (M-MHDİA) ile ilgili literatürde bu konuyu kapsayan bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu sebeple Basit Montaj Hattı Dengeleme problemleri ile birlikte ayrı ayrı Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama problemlerini barındıran kaynaklar incelenmiştir.

Montaj Hattı Dengeleme problemlerinin ilk yayınlanan çalışmasını Salveson 1955 yılında yapmıştır. Bu çalışmada istasyon sayılarının en küçüklenmesi hedeflenmiştir. [23]. O tarihten günümüze birçok çalışma yapılmıştır. Genel hatlarıyla MHD problemleri en basit şekilleriyle incelenmiştir. Literatürde bu konu hakkında bulabileceğiniz bazı çalışmalar için bahsetmiş olduğum kaynaklara bakılabilir [3],[15], [14], [18].

İlker Baybars 1986 yılında yayınlamış olduğu çalışmada B-MHD problem üzerinde 0-1 ve tam sayılı programlama yöntemlerini kullanarak ulaştığı sonuçları tartışmıştır. Kullanılan bütün modeller deterministiktir ve sadece basit MHD problemleri üzerinde çalışılmıştır. Scholl ve Becker 2006 yılında B-MHD problemleri üzerine bir araştırma yapmışlardır ve geçmiş çalışmalara atıflarda bulunarak B-MHD problemlerinin genel karakteristik özelliklerinden bahsetmişlerdir [15], [18]

Kim ve ark. araştırmalarında iş yükünü istasyonlara eşit bir şekilde dağıtmayı hedeflemişlerdir. MHD problemleri NP-Hard olduğu için büyük ölçekli problemleri çözmede sezgisel yöntemlere başvurmuşlardır. Daha önce kullanılan genetik algoritmaların üzerine sezgisel metodları ekleyerek çözülmesi zor olan problemlerde en üst kalitede çözüm almayı hedeflemişlerdir. Bu konu ile ilgili kapsamlı bilgilere bahsettiğim kaynaklardan ulaşabilirsiniz [24]

Subbash C. Sarin ve ark stokastik B-MHD probleminde verilen çevrim süresi içinde işçi maliyetini ve iş tamamlanamama maliyetini dal-sınır algoritması kullanarak yaklaşık sonuç elde etmek istemişlerdir. Burada işçilerin hepsinin aynı parayı aldığı varsayılmıştır. Sadece B-MHD problemlerinde, Henry Ford dan bu yana, endüstrilerdeki farklı koşullarında oluşması sebebiyle MHD problemlerinin birden fazla çeşidi ve değişik özellikleri olan türleri türemiştir [25]

MHD problemleri bilindiği üzere bir den fazla çeşide sahiptir. Hadi Gökçen MHD problemleri ile karışık modelli düz hatlı, U-tipi montaj hattı ve paralel montaj hatlarıyla alakalı

hedef programlama ve en kısa yol yöntemlerini kullanarak optimal çözümlere ulaşmayı başarmıştır. Çeşitli MHD problemlerine bahsetmiş olduğum kaynaklardan ulaşılabilir [26], [27], [25], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40] .

Çil ve ark. yaptıkları çalışmada robotların çalıştığı hatlarda çevrim süresini kısaltmayı, istasyon sayılarını azaltmayı ve robot maliyetleri dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımı sonuçlandırmak için hedef algoritması seçilmiştir ve yapılan öneriler karşılaştırılmıştır [41].

Montaj hatları içerisinde bazı görevler birbirinin aynısı olabilmektedir. Örneğin kaynak yapmak veya cıvata sıkma işlemleri. Bu görevleri ayrı ayrı işleme aldığınız zaman verimliliği arttırma konusunda zorluklar çıkmaktadır. Sikora ve ark. yapmış oldukları çalışmada birbirinin aynısı veya tekrarlayan görevlerin birlikte çözüme kavuşabilmesi için tam sayılı bir algoritma ile çözüme kavuşturmuşlardır [42].

Dolgui ve Gafarov yaptıkları çalışmada B-MHD probleminde çevrim süresini sabit alıp, istasyon sayısını en küçüklemek istemişlerdir. Alışılmadık iki teknik üzerinden sonuçlara ulaşmışlardır [43].

Son zamanlarda belirsiz görev süreli montaj hattı dengeleme problemleri literatürde dikkat çekmeye başladı. Belirsiz görev süresi istasyonlarda aşırı yük oluşturmaktadır. Li ve ark. yapmış oldukları çalışmada belirsizlik teorisini kullanmışlardır. Yeni teoremler türetip, bunları optimal sonuç bulmak için kullanmışlardır. Önerilen Tip-1 U tipi MHD problemini çözmek için dal-sınır algoritmasından yararlanmışlardır [44].

MHD problemlerindeki amaç iş yükünü eşit bir şekilde istasyonlara pay etmektir. Literatürde yapılan dengelemelerin kalitesini ölçen birbirinden farklı çözümler ve önerile mevcuttur. Ancak MHD problemleri NP-Hard olduğu için kesin çözüm metodu çok az kullanılmıştır. Lingitz ve ark. yaptıkları çalışmada yeni kesin çözüm metodu algoritması kullanıp, iş yükünü istasyonlara dengeli bir şekilde atanmasını sağlayıp, K-MHD problemini B-MHD kolaylığına getirmişlerdir [45].

Çil ve Kızılay, yapmış oldukları çalışmada Çok adamlı MHD dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Çok adamlı montaj hatlarının en büyük avantajı, büyük ebatlarda ürünler üretilebilmekte, bir istasyonda birden fazla işçi çalışabilmekte ve çevrim süresini bu sebeplerle kısaltılabilmektedir. Ancak problem büyüklüğü de buna göre artış gösterdiği için literatürde çözüme kavuşması zor olan problem tipleri arasına girmiştir. Bu çalışmada kısıt programlama metodu kullanarak, en küçükten en büyüğe bütün problemleri, çevrim süresini en

küçükleyerek (işçi sayısını ikinci plana atarak) çözüme ulaşmayı hedeflemişlerdir. Bunu yaparken küçük ölçekli problemleri karma-tam-sayılı model ile çözüp, önerdikleri metot hem küçük hem büyük çaplı problemleri çözmeyi amaçlamışlardır [46].

4.1 Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi (M-MHD)

Maliyet Tabanlı montaj hattı dengeleme problemleri sezgisel yöntemler kullanılarak çözüme ulaştırılmaya çalışılmıştır.

M-MHD problemleri NP-hard problem tipine örnek olduğu için Garey ve Johnson (1979 pp. 124,226] tarafından tek boyutlu "bin-packing" problemi sezgisel algoritmalarla optimal çözüme ulaşmıştır. Aynı yöntemi M-MHD problem çözümü için kullanmışlardır [19].

Rosenberg ve Ziegler, bu konuda işçi maliyetinin, atandığı istasyondaki en pahalı göreve göre belirlemiştir. M-MHD problemlerine dört ayrı sezgisel algoritma ile yukarıdaki kaynaklarda bahsetmiş olduğum çözümlerle ortaya çıkan sonuçların kalite düzeylerini karşılaştırmışlardır. İncelemiş oldukları M-MHD probleminde;

- Her bir görev iş istasyonuna atanmıştır.
- Hiçbir öncelik ilişkisi kuralı ihlal edilmemiştir.
- Çevrim süresi üretim maliyeti en küçüklenmiştir.

Matthias Amen, geçmiş çalışmalara göre farklı perspektifte M-MHD problemlerine yaklaşmıştır. Literatürde amaç montaj hattındaki istasyon sayılarını sabit bir çevrim süresi içerisinde en küçüklemektir. Başka bir deyişle, bekleme zamanlarını bütün istasyonlar içerisinde en küçüklemektir. Bu nedenle buna zaman tabanlı montaj hattı dengeleme denmektedir. Kendi araştırmasındaki farklılık parça bazında toplam maliyeti en küçüklemeyi hedeflemiştir ve bunun adına maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme demiştir. Eski araştırmaların aksine, işçi maliyetinin detaylarına inmiştir. Her görevin zorluk derecesi değişken olduğuna göre, ödenen işçi maaşlarının veya diğer maliyetlerin de görevin zorluğuyla doğru orantılı olduğunu varsaymıştır.

- Toplam işçilik maliyeti / parça başına = (her bir istasyon için ödenen toplam maaş) x çevrim süresi

Matthias Amen 2001 yılı çalışması daha önceki çalışmalarının devamı niteliğindedir. Daha önce önermiş olduğu sezgisel algoritmaların üzerinde çözüm süresi ve kalitesine göre

karşılaştırmalı çalışmalar yapmıştır (Amen 2001). Daha sonra 2004 yılında yayımlanan çalışmasında maksimum istasyon doluluğuna göre hesaplanan problemlerin çözümüne ulaşmanın zorluğundan bahsetmiştir. Yeni önerisi iki istasyon kuralı olmuştur. M-MHD problemlerinin çözümü için karma tam sayılı programlama modeli geliştirmiştir [6] ve en sonunda bahsi geçen metodları 2000a, 2000b ve 2001 çalışmaları ile özetlemiştir [17].

Scholl ve Becker 2004'te yaptığı çalışmada, Amen'in 2000b de yapmış olduğu çalışmada bahsettiği kurallardan birinin yanlış olduğunu söylemişlerdir. Bunun üzerine bu hatayı düzeltip, daha kolay bir öneri sunmuşlardır. Teorik olarak, M-MHD problemleri çözümü için tam sayılı karar modeli geliştirmişlerdir [3].

Kottas ve Lau, maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. İşçilik ve tamamlanamayan görev maliyetlerinin minimuma inmesi için yeni stokastik sezgisel model önermişlerdir. Çalışmanın sonucunda deterministik ele alınan problemlere göre daha verimli çözümler bulunmuştur [47]. Daha sonraki yıllarda sabit hıza sahip montaj hatlarının işletme giderlerinin minimize etmek üzere stokastik sezgisel modelle çözüme ulaşmışlardır [48].

Silverman ve Carter, seri hatlarda stokastik görev sürelerinin toplam işletme maliyetine olan etkisini, hat durduğunda ve bir istasyonun görevini tamamlayabilmesi için daha fazla zaman kullanması duruma altında değerlendirmiştir. Buna ek olarak, maliyet verimliliğini kullandığı stokastik metod ile, iki tane determinitsik metod ile karşılaştırmıştır [49].

Ahad Foroughı ve Hadi Gökçen 2014 yılında maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme problemini ilk kez ele almışlardır. Bu sebeple, bir şans kısıtlı matematiksel model önermişlerdir. Sonuçlar, aynı problemin zaman tabanlı yaklaşımla elde edilmiş olan en iyi çözümleriyle istasyon ve toplam işgücü maliyeti açısından karşılaştırılmıştır [50].

Waldemar Grzecha, yapmış olduğu çalışmalarda özellikle zaman tabanlı ve maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemleri üzerinde durmuştur. 2007 yılında zaman ve maliyet tabanlı tek Modelli bir hat dengeleme problemi üzerinde literatürde geçen Z-MHD ve M-MHD için kullanılan sezgisel algoritmaları kullanarak ortaya çıkan sonuçları karşılaştırmıştır. En sonunda yeni bir yaklaşım metodu önermiştir [51].

Grzechca, 2011 yılında, M-MHD problemleri üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Bu makalesinde Scholl ve Becker'in algoritmasından yararlanarak, Zaman Tabanlı ve Maliyet Tabanlı MHD çözümlerini karşılaştırmıştır [52]

Grzechca 2015 yılında two sided MHD üzerinde çalışmıştır. Sezgisel algortimalar kullanarak maliyeti en küçükleyecek optimal çözüme ulaşmayı hedeflemiştir [53].

Padron ve ark. Birlikte yapmış olduğu çalışmada, sezgisel ve kesin çözüm yöntemlerini birleştirerek M-MHD problemini görev yeri ve bölgesel kısıtlar altında çözüme ulaşmayı hedeflemişlerdir [54].

Adolreza Roshani ve ark.iki sıralı M-MHD problemi üzerine çalışma yapmışlardır. Problemi çözüme ulaştırabilmek için karma tamsayılı model önerilmiştir. M-MHD problemleri NP-hard olarak kabul edildiği için orta ve yüksek ölçekli problemleri çözmek için sezgisel algoritmadan yararlanılmıştır [55].

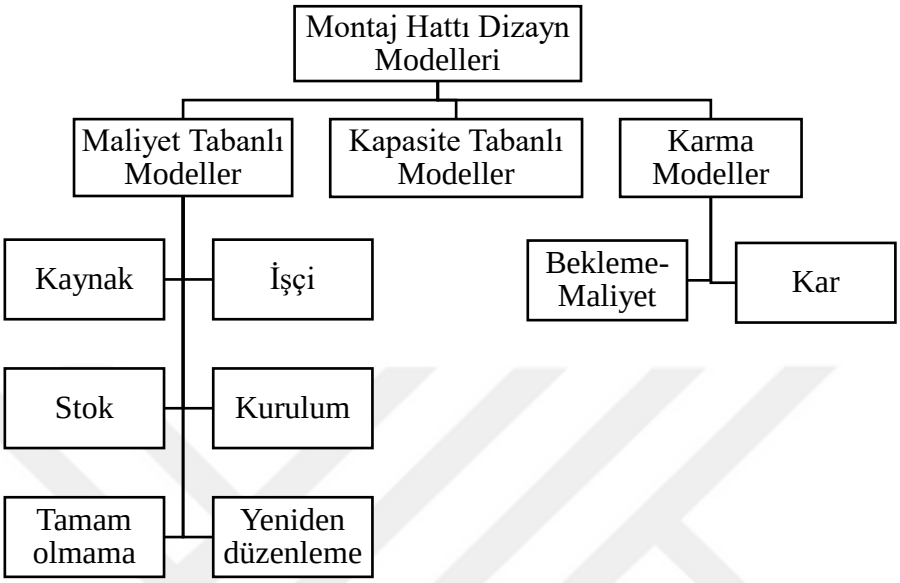
Günümüzde montaj hatlarında optimum düzeyde kaynakların kullanılması ve kabiliyetli işçilerin bir den fazla görev tamamlayabilmesi esas alınmıştır. Geleneksel montaj hatlarında görevler istasyonlara atanmaktadır. Atamalar gerçekleşirken mevcut kaynaklar göz ardı edilmektedir. Ancak gerçek durumlarda bu kaynakların varlığı ve yeterliliği tartışılmak ve göz önünde bulundurulmak zorundadır. Bununla birlikte piyasada gittikçe zorlaşan rekabette yer alabilmek için üretim maliyetlerin en aza indirilmesi gerekmektedir. Salimi ve ark. 2013 yılında literatür ve gerçek hayatla olan farkı kapatmak için yeni bir model öne sürmüşlerdir. Önerdikleri model matematiksel bir model olup meta sezgisel kalibrasyonlu parametre optimizasyon algoritmasıyla modellenmiştir. Yapılan analizler geliştirilen modelin gerçek durumlara uygulanması üzerine olmuştur [56].

Avikal ve ark. yaptıkları çalışmada toplam üretim maliyetini en küçüklemek adına yeni önerdikleri sezgisel algoritmayla çözüme ulaşmayı hedeflemiştir. Literatürdeki problemleri kullanarak kendi önerdikleri ve diğer sezgisel algoritmalarla kıyaslamışlardır. Kendi önerdikleri yeni modelin iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [57].

Kazemi ve Sedighi M-MHD problemlerine başka bir açıdan yaklaşmışlardır. Büyük ölçekli ürünlerin montaj hatlarında bir den fazla işçi aynı görevde çalışabilmektedir. Bunun adına Çok-İşçili Montaj Hattı denir. Çok işçili montaj hatlarındaki amaç bir ürün üzerinde oluşan işçiliğin minimize edilmesidir. Kazemi ve Sedighi, bunu başarabilmek için birden çok sezgisel ve genetik algoritmalar sunmuşlardır [58]. Aynı konu üzerinde 2014 yılında Abdollatif Sepahi'ninde çalışması mevcuttur [59].

Hazır ve ark. yapmış oldukları çalışmada o güne kadar ki M-MHD problemleri üzerinde yapılan ve güncel çalışmaları derlemişlerdir. Sonuç olarak literatürdeki kaynakların birçoğu

malzeme/kaynak maliyeti üzerinedir ve sadece bir kriter üzerinde durulmuştur. Kendileri makalenin sonunda yeni ve gelecekteki çalışmalar hakkında önerilerde bulunmuşlardır [60]. Ayrıca montaj hattı dizaynlarını maliyet tabanlı modeller, kapasite tabanlı modeller ve birleşik tabanlı modeller olarak sınıflandırmışlardır [61].



Şekil 12. Montaj Hattı Dizayn Modelleri

Roshani ve Giglio, karma tamsayılı matematiksel model ile çok işçili küçük ölçekli MHD problemlerini maliyeti en küçükleyerek çözmeyi hedeflemişlerdir. Aldıkları sonuçlar ile birlikte Çok işçili M-MHD problemlerinin çözümüne ulaşılmasının literatürde bahsi geçen çok işçili MHD problemlerini göre daha kompleks olduğunu ortaya koymuşlardır. [62].

Maliyetleri en küçüklemek için üreticiler montaj hattı kurmaya veya onu en verimli şekilde çalıştırmaya özen göstermektedir. Bunu yapabilmek için iş yükünü eşit bir şekilde istasyonlara dağıtmak büyük önem arz etmektedir. Pereira ve ark. yapmış oldukları çalışmada görev atamalarını ve kaynak kullanım kararlarını birlikte ele alarak, kaynak maliyetlerini farklı kabul ederek, hibrid sezgisel yaklaşım ile çözüme ulaşmayı hedeflemişlerdir. Sonuç olarak hibrid yaklaşımın olumlu sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır [63].

Modern dünyada otomasyonlu üretime geçiş gün geçtikçe artış göstermektedir. Ancak üreticiler bazı işleri otomatik hale getirememektedir. Bunun en büyük sebebi insana olan bağımlılıktır. Teknoloji hızla ilerlediği için robotlar bazı manuel görevleri icra edebilmektedir. Weckenborg ve Spengler yapmış oldukları çalışmada aynı görevde ve istasyonda hem insan gücünden hem de robot gücünden yararlanılabileceğini savunmuşlardır. Bunun için matematiksel bir model oluşturup, gerçek hayata uygulanabilir hale getirmişlerdir. Sonuç

olarak, robot ve insan iş birliğinden ekonomik, düşük maliyetli çözümler elde etmeyi hedeflemişlerdir [64].

4.2 Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi (MHDİA)

MHDİA problemleri üzerinde çalışmalar yeni sayılabilecek yakın dönemlerde ele alınmıştır. İşçilerin varlığı her zaman kabul görmüş ancak yetenek, tecrübe seviyelerine göre atanması özellikle günümüzde büyük önem arz etmektedir. Robotların işçilerin yerini aldığı bu günlerde, öyle üretim çeşitleri vardır ki, insansız montaj yapılabilmesi kaçınılmazdır. Bu sebeple literatürdeki araştırmalar içerisinde eski kaynaklarda insan odaklı, yakın tarihte ise robot kaynaklı problemler ele alınmıştır.

MHDİA problemi kısıtlı sayıda işçilerin mevcut olduğu, her görev süresinin işçilerin yeterliliğine bağlı olduğu ve görev-işçi uyumsuzluğu gibi engeller doğrultusunda ortaya çıkmıştır. Bu problem eş zamanlı iki çözüm sunmaktadır;

1. Görevlerin istasyona atanması
2. Uygun işçilerin istasyona atanması

Miralles ve ark. MHDİA problemi için yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Küçük ölçekli problemler için dal-sınır algoritması ve büyük boyutlu problemler dal-sınır tabanlı sezgisel algoritmalar kullanılmıştır [65]

Corominas ve ark. yaptıkları çalışmada deneyimli ve deneyimsiz işçilerin bulunduğu montaj hattının tekrar dengelenmesi ve bu süreçte kapasiteyi arttırmak hedeflenmiştir. Problemin başlıca özellikleri;

- Şirket geçici personel istihdam etmektedir. Devamlı çalışan personele göre görev süreleri daha uzun sürmektedir.
- Her deneyimli personelin yanında bir deneyimsiz personel olma şartı konmuştur.
- Görevler birbirine benzememektedir.

Bu koşullar altında amaç deneyimsiz personel sayısını en aza indirerek, verilen çevrim süresi içinde maksimum performans almaktır. Problem İkili doğrusal programlama ile modellenmiştir ve çözümü ILOG CPLEX 9.0 da yapılmıştır [66].

Miralles ve ark. fiziksel ve mental engelli insanlar üzerinde çok anlamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Engelli insanların iş hayatında yer edinebilmeleri için, her birinin yeteneklerine uygun yerlere atanmasını sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir [22].

Araujo ve ark. engelli işçilerle alakalı çalışmalarını sürdürmüş, ancak bu sefer paralel montaj hattı ve işçi atama problemi üzerinde durmuşlardır. Bu yaklaşımlarıyla yeni olasılıkları barındıran işçi-istasyon atamalarına olanak vermiştir. Çözüm için doğrusal karma-tamsayılı model ve iki tane sezgisel model önermişlerdir [68].

Blum ve Miralles MHDİA problemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu problemde bütün görevler işçilere atanmak zorunda ve bütün işçiler istasyonlara atanmak zorundadır. Görev süreleri işçilere bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve bazı durumlarda işçilerin görevi için yetersiz olma durumu vardır. Önermiş oldukları algoritma literatürdeki diğer çalışmalara nazaran çok iyi veya eşit değerlerde sonuç vermiştir [69].

Mutlu ve ark. 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada MHDİA tip-2 problemi üzerinedir. Görev süreleri işçilerin yeteneklerine göre değişkenlik göstermektedir ve bu sebeple çevrim süresini en küçüklemek için görevlerin ve işçilerin istasyonlara atanması gerekmektedir. Bu problemi çözüme kavuşturabilmek için genetik algoritma kullanmışlardır [70].

Geleneksel montaj hatlarında görev tamamlama süreleri her işçi için eşit kabul edilmektedir. Ancak korumalı işyerlerinde bu durum değişkenlik gösterir çünkü bazı işçiler yeterlilik seviyelerinden ötürü işleri daha yavaş tamamlamaktadırlar. İşçi çeşitliliği bize MHDİA problemini ortaya çıkarmıştır. Borba ve Ritt, yapmış oldukları çalışmada sabit sayıda işçiyle maksimum ürün çıkarmayı hedeflemişlerdir. Bunun için yeni sezgisel ve kesin çözüm yöntemleri önermişlerdir [71].

Vila ve Pereira, yaptıkları çalışmada MHDİA problemin tanımını yaptıktan sonra, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmalar yapıp, yeni bir alt-sınır elde etmişlerdir. Önermiş oldukları yeni algoritma literatürdeki diğer elde edilmiş sonuçlara kıyasla daha kaliteli sonuçlar vermiştir [72].

Sungur ve Yavuz, yaptıkları çalışmada yeni bir montaj hattı dengeleme problemi önermişlerdir. Montaj Hattı Dengeleme ve Hiyerarşik İşçi Atama probleminde en önemli durum, az yeterli işçi, çok yeterli işçiyle yüksek maliyeti ile birlikte yer değiştirebilir olmasıdır. Bu problemdeki amaç işçi atamalarını optimize ederek toplam maliyeti en küçüklemektir. Çözümler için tam-sayılı doğrusal programlama modeli kullanılmıştır [73].

Moreira ve ark, yaptıkları çalışmada engelli çalışanların olduğu korumalı işyerlerinde işçilerin bir arada maksimum verimlilikte çalışabilmeleri için yeni bir matematiksel ve sezgisel model önermişlerdir. Bu çalışma sonucunda verimlilikte artış gözlenmiştir [74].

Moreira ve ark, yaptıkları çalışmada görev sürelerinin işçiye bağımlı ve belirsiz olduğundan bahsetmişlerdir. Amaç, görevlerin ve işçilerin minimum istasyona atanarak üretim performansını en üst seviyede tutmak ve somut değerlere ulaşmaktır. Bunun için iki tane karmaşık tam-sayılı programlama modeli önermişlerdir. Daha kaliteli sonuçlar alabilmek için önermiş oldukları modelleri sezgisel modellerle desteklemiştir. Elde ettikleri sonuçlar dayanıklı optimizasyon yaparak deterministik sonuçlara göre daha kaliteli olmuştur [75].

Ramezanian ve Ezzatpanah, literatürde fazla çalışmamış olan Karışık Modelli MHDİA problemi üzerine 2015 yılında bir çalışma yapmışlardır. Karışık modelli MHD problemlerinin son yıllarda popülaritesi tek montaj hatlarında eş zamanlı montaj yapılabildiği için oldukça yükselmiştir. Bunun yanı sıra işçi atama problemleri de işletme maliyetini en küçüklemeyi hedefler. Önermiş oldukları model bağımsız iki amacı değerlendirmiştir.

1. Çevrim süresi en küçüklemek.
2. İşçilik maliyetini en küçüklemek.

İki amacı çözüme ulaştırabilmek için hedef programlama yaklaşımını önermişlerdir. Ancak problemin büyük boyutlu olmasından ötürü “imperative competitive” algoritmasını geliştirmişlerdir [76]

Öksüz ve ark. U-tipi montaj hattında işçi atama problemi üzerine çalışma yapmışlardır. Literatürde, görevlerin performans seviyesi ve iş tamamlama zamanı işçinin performansına bağlı olarak hesaplanmamaktadır. Bu tutum ve bakış açısı hiçbir zaman gerçeği yansıtmaz. Bu problem de işçi performansını da hesaplayarak U-tipi montaj hattının verimliliği hesaplanmak istenmiştir. Arı kolonisi algoritması ve genetik algoritma kısa sürede çözüm alabilmek için kullanılmıştır [77].

Giglio ve ark. çok işçili montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemi üzerine çalışma yapmışlardır. Toplam işletme maliyetini en küçüklemek adına yeni karma tam-sayılı model önermişlerdir. Bu modelin en büyük avantajı, işçiler aynı ürün etrafında eş zamanlı olarak farklı görevleri gerçekleştirebilmektedirler [78].

MHD problemlerinin amaçlarından bir tanesi iş yükünü eşit bir şekilde istasyonlara pay etmektir. Bugüne kadar birçok model önerilmiştir ancak hiçbiri bütün parametreleri

içermemektedir. Sikora ve ark. yapmış oldukları çalışmada karma tam-sayılı doğrusal programlama model ile Gezen İşçi MHD problemi üzerinde çalışmışlardır. Gezen Satıcı formülünü MHD problemine entegre ederek çözüme ulaşmışlardır [79]

Üretimin esnekliği son yıllarda üreticiler için en önemli konu haline geldi. Esnekliği arttırman en kısa ve en az ucuz yolu bir den çok yetenekli (multi-skilled) işçilerin atanma hücre tipi üretimde atanmasıdır. Lian ve ark. bu problemin çözümü için matematiksel sezgisel model geliştirmişlerdir [80]

Liu ve ark. yapmış oldukları çalışmada montaj hattında işçi sayısını en küçükleyecek sonuca ulaşmak istemişlerdir. Bunun yanı sıra, günümüz koşullarının değişkenlik gösterdiği son yıllarda talep belirsizliği oluşmaktadır. Liu ve ark. MHDİA problemine talebi de düşünerek hareket eden ilk ekip olmuşlardır.

1. Belirsizlik setini talebi görebilmek için uygulamışlardır.
2. Şans kısıtı (Chance- constraint) programlama modeli önermişlerdir.
3. Markov eşitsizliği ve Karma tam-sayılı ikinci derece konik programını (MI-SOCP) şans kısıtlarını benzetmek için kullanmışlardır [81].

Zhang ve ark. U-tipi MHDİA probleminde ergonomik risk ve çevrim süresinin en küçüklenmesiyle ilgili çalışma yapmışlardır. Bunun için "Restarted Iterated Pareto Greedy" algoritmasını kullanmışlardır. Sonuçları geliştirmek adına sezgisel yaklaşımlar eklemişlerdir [82].

Liu ve ark. yapmış oldukları çalışmada işçi atama ve enerji tüketimi eş zamanlı en küçükleyen bi-objective karma tam-sayılı doğrusal programlama modeli kullanıp €-kısıt metodu adapte etmişlerdir. Büyük ölçekli problemleri çözebilmek için;

- İşletme zamanı ve enerji tüketimi sorted first rule (PT-EC-SFR)
- Çok amaçlı genetik algoritma
- Çok amaçlı benzetimli tavlama yöntemi kullanmışlardır.

(PT-EC-SFR) modeli önerilen diğer modellerin önüne geçerek en iyi sonuçları vermiştir [83].

5-M-MHD, MHDİA VE M-MHDİA PROBLEMLERİ İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER

5.1 M-MHD Problemi İçin Matematiksel Model

MHD problemleriyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, G-MHD problemlerinin temel amacı sabit bir çevrim süresi kısıtı altında en küçük istasyon sayısına ulaşmaktır. İstasyonları en küçüklemek için, montaj hattında geçirilen boş zamanların ortadan kalkması veya en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, bu problemlerin adına zaman tabanlı montaj hattı dengeleme denilmektedir.

Teknolojinin ilerlemesi ve dünya geneline hızlı bir şekilde yaygınlaştığı için piyasalardaki rekabette mücadele etmek artık çok zor bir durum almıştır. Satış fiyatlarının ve brüt kazancın her geçen gün düştüğü, hammadde maliyetlerinin her geçen gün arttığı bugünlerde düşük maliyetli üretim kavramı her işletmenin gündeminde yer almaktadır. Bu süreçte montaj hatlarının dengelenmesi veya varlığı bile yeterli gelmemektedir. Bu koşullar altında, montaj hatlarının maliyet tabanlı bir amaca hizmet etmesi gerekmektedir. Geleneksel montaj hattı dengeleme yaklaşımları yerine, maliyet tabanlı bir yaklaşımla dengelenmesine maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme denilmektedir. Montaj hattı üzerinde görevlerin maliyeti en küçükleyecek şekilde, öncelik ilişkilerine uyarak ve belirtilen kısıtlar altında, istasyonlara atanmasına maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemi denilmektedir (M-MHDP). Problemin amacı ürün başına düşen toplam maliyeti en küçüklemektir [19] [20] [4].

Fabrikalarda ürünün son montaj aşamasında emeğe dayalı iş gücü gerekmektedir. Bu tip üretimlerde iş gücü maliyeti toplam maliyetin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. M-MHD problemlerinde bu sebeple işçilerin aldığı ücretin dengeleme yaparken dikkate alınması gerekmektedir. Montaj hatlarında işçilerin atandığı görevlerin zorluk dereceleri birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle her görevin birbirinden bağımsız ücret oranına sahip olması mümkündür. Montaj hatlarında çalışan işçilere, boşta kaldıkları zamanlar dahil, çevrim süresi kadar ücret ödenmektedir. Bir işçiye ödenen ücreti bulmak için ücret oranı ile çevrim süresi çarpılmaktadır. Tüm hat üzerindeki toplam işçilik maliyetini bulmak için hat boyunca çalışan tüm işçilere ödenen toplam ücrettir [17].

Diğer bir taraftan son montaj kısmında makine, taşıma için tesis yatırımları gerekmektedir. Taşıma tesisinin maliyetleri direkt olarak montaj hattının uzunluğu ile alakalıdır. Uzunluğu belirleyen etken ise montaj hattı üzerindeki istasyon sayısıdır. Makineler

ise özel amaçlı veya genel olarak iki durumda kullanılmaktadır. Özel amaçlı makineler genellikle tek bir görev için alınıp, kullanılmaktadırlar. Bu sebeple, özel makine sayısı sabit kabul edilir ve görevlerin istasyonlara atanmasından bağımsızdır. Geleneksel makineler, her montaj görevi için standart kabul edilir ve istasyon sayısı kadar var olduğu kabul edilir [20] [4] [17].

Son olarak hammadde maliyeti ise, görevlerin istasyonlara atanmasına bağlı değildir [6].

Bahsi geçen maliyet ölçekleri ile ilgili bilgiler doğrultusunda toplam üretim maliyeti aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Matthias Amen tarafından önerilen karma tam-sayılı doğrusal programlama modelinin notasyonlar, parametreler ve karar değişkenleri sırasıyla aşağıda gösterilmiştir [17].

Tablo 5.1.1 M-MHD problemi karar modelinde kullanılan notasyonlar;

Notasyon	Açıklama
k	İstasyon numarası (indeksi), $k = 1, \dots, \overline{K}$ $\overline{K}$: en fazla istasyon sayısı
i, r, s	Görev numarası (indeksi), $i = 1, \dots, n$, n: toplam görev sayısı
P_s	s görevinin öncül görevler kümesi
$r \in P_s$	Öncelik ilişkisi; r görevi s görevinden önce tamamlanmak zorundadır

Tablo 5.1.2 M-MHD problemi karar modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Açıklama
c	çevrim süresi
t_i	i görevinin tamamlanma zamanı
w_i	i görevinin birim zaman için maliyet oranı

Tablo 5.1.3 M-MHD problemi karar modelinde kullanılan değişkenler

Değişken	Açıklama
x_{ik}	1, eğer i görevi k istasyonuna atanmış ise; 0, aksi halde
z_k	1, eğer k istasyonu kullanılmış ise; 0, aksi halde
ws_k	k istasyonunun maliyet oranı

$$Enküçükleme\ TM = c.\sum_{k=1}^{\overline{K}} ws_k \tag{5.1.1}$$

$$\sum_{k=1}^{\overline{K}} x_{ik} = 1 \quad , \ i = 1, \ldots, n \tag{5.1.2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} t_i \ x_{ik} \leq c \ z_k \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} \tag{5.1.3}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ik} \geq z_k \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} \tag{5.1.4}$$

$$z_k \geq z_{k+1} \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} - 1 \tag{5.1.5}$$

$$\sum_{k=1}^{\overline{K}} k \ x_{rk} \leq \sum_{k=1}^{\overline{K}} k \ x_{sk} \quad , \ s = 1, \ldots, n \quad , \ r \in P_s \tag{5.1.6}$$

$$ws_k \geq w_i \ x_{ik} \ , \ i = 1, \ldots, n \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} \tag{5.1.7}$$

$$ws_k \geq 0 \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} \tag{5.1.8}$$

$$x_{ik} \ , z_k \in \{0, 1\} \quad , \ i = 1, \ldots, n \quad , \ k = 1, \ldots, \overline{K} \tag{5.1.9}$$

Eş. 5.1.1'de M-MHD probleminin çözümü için kullanılan modelin amacı birim üretim maliyetini en küçüklemektir. Bu eşitlikte ürün başına toplam üretim maliyeti istasyon maliyet oranının çevrim süresiyle çarpımlarının toplamından oluşmaktadır.

Eş. 5.1.2'de verilen kısıt bir atama kısıtı olup, her görev yalnızca bir istasyona atanabilmektedir.

Eş. 5.1.3'de verilen kısıt bir Çevrim süresi kısıtı olup, istasyonların toplam iş yükünün, çevrim süresinı aşmamasını sağlamaktadır.

Eş. 5.1.3 ve Eş. 5.1.4'de verilen kısıtlar, kullanılması gereken istasyonlara karar vermektedir.

Eş. 5.1.5'de verilen kısıt, üretim hattında boş istasyonlar olma durumunda, hattın en sonunda olmalarını sağlamaktadır.

Eş. 5.1.6'da verilen kısıt, montaj hattında ürünlerin yapılabilmesi için gereken öncelik sırasına uyulmasını sağlar.

Eş. 5.1.7'de verilen kısıt, istasyonların maliyet oranını belirlemektedir. Bir istasyonun maliyet oranı o istasyona atanan görevlerin en yüksek maliyet oranı değerinde belirlenmektedir.

Eş. 5.1.8'de verilen kısıt karar değişkenlerinin negatif değer almasını engeller.

Eş. 5.1.9'da karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerini almalarını sağlar.

5.2 MHDİA Problemi için Matematiksel Model

B-MHD problemlerinde işlem süreleri sabit olarak kabul edilmektedir. Pratikte, her işçinin yeteneği ve tecrübesi birbirinden farklıdır. Bu sebeple, görevlerin tamamlanma süreleri her işçinin performans düzeyine göre değişkenlik gösterir. Aynı zamanda, işçinin yetersizliği durumunda görevin tamamlanamaması da söz konusudur. MHDİA problemleri işçilerin aynı görevi değişik sürelerde gerçekleştirebileceğini göz önünde bulundurduğu için gerçek hayatta karşılaşılan problemlere daha yakındır. MHDİA problemlerinde işçilerin becerileri, yetenekleri ve tecrübelerinin yeterli olup olmama durumuna göre, yalnızca görevlerin istasyonlara atanması değil, işçilerin istasyonlara atanması söz konusudur.

Yukarıda bahsedildiği üzere işçilerin performansları ve görevlerini tamamlama süreleri çeşitli nedenlerle farklılaşmaktadır. Şekil 15'te 4 işçili ve 6 görevli bir işlem için görev atama matrisi tablosu verilmiştir.

		Görevler					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
İşçiler	**1**	x	5	2	x	3	5
	2	7	3	2	3	x	x
	3	x	2	4	3	x	3
	4	4	x	x	5	5	x

Şekil 13. Görev Atama Matrisi

- Yukarıdaki şekilde 4 işçinin atanacağı 6 görev vardır.
- Tüm görevler işçiler tarafından farklı sürelerde tamamlanmaktadır. Örneğin, görev 2, dördüncü işçi tarafından gerçekleştirilemezken, en hızlı üçüncü işçi tarafından yapılabilmektedir. Görev 4'te ise ikinci ve üçüncü işçinin görevi tamamlama süresi birbirine eşittir. Kısıtlar göz önünde bulundurularak, hangi işçinin atanacağına karar verilecektir.

- Her işçi her göreve atanamamaktadır. Örneğin, görev 1, birinci ve üçüncü işçi tarafından gerçekleştirilememektedir. Görev 4 ise, birinci işçi hariç tüm işçiler tarafından tamamlanabilmektedir.

Örnek görev atama matrisinde görüldüğü üzere işçilerin yetenekleri, işi tamamlama süreleri değişiklik göstermektedir. Her işçi bütün görevleri yapma yetisine sahip olmayabilir veya yetisi olduğu görevi tamamlama süreleri birbirinden farklı olabilir. Bu nedenle MHD çalışmalarında işçi performansını kesinlikle göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Yukarıda bahsi geçen tanımlarla birlikte aşağıda MHDİA probleminin çözümü için geliştirilen matematiksel modelin parametreleri ve karar değişkenleri açıklamalarıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.2.1. MHDİA problemi karar modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Açıklama
c	çevrim süresi
t_{iw}	*i* görevinin *w* operatörü tarafından tamamlanma süresi

Değişken	Açıklama
x_{ikw}	*i* görevinin *k* istasyonunda *w* operatör tarafından yapılması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
z_k	k istasyonunun açılması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
y_{kw}	k istasyonuna w operatörü atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken

Tablo 5.2.2 MHDİA problemi karar modelinde kullanılan değişkenler

$$Enk \sum_{k=1}^{K} z_k \tag{5.2.1}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} x_{ikw} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, n \tag{5.2.2}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{w=1}^{W} t_{iw}x_{ikw} \leq C.z_k \quad , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.2.3}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{w=1}^{W} x_{ikw} \geq z_k \quad , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.2.4}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} k x_{rkw} \leq \sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} k x_{skw} \quad , \quad (r,s) \in P_s \tag{5.2.5}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ikw} \leq n.y_{kw} \ , \quad k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.2.6}$$

$$\sum_{w=1}^{W} y_{kw} = z_k \ , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.2.7}$$

$$\sum_{k=1}^{K} y_{kw} \leq 1 \ , \quad w = 1, \dots, W \tag{5.2.8}$$

$$z_k \geq z_{k+1} \quad , \ k = 1, \dots, K \tag{5.2.9}$$

$$x_{ikw} \in \{0,1\} \ , \ i = 1, \dots, n \ , \ k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.2.10}$$

$$y_{kw} \in \{0,1\} \ , \ k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.2.11}$$

$$z_k \in \{0,1\} \ , \ k = 1, \dots, K \tag{5.2.12}$$

Eş. 5.2.1' de MHDİA probleminin amaç fonksiyonu olup, amaç istasyon sayısının en küçüklenmesidir.

Eş. 5.2.2'de verilen kısıt her bir görevin, bir istasyona atanan işçi tarafından yapılmasını sağlar. Her bir görevin bir istasyona atanmasını sağlar.

Eş. 5.2.3'te verilen kısıt her bir istasyon zamanının çevrim süresini aşmasını önler.

Eş. 5.2.4'te verilen kısıt açılan her bir istasyona görev atanmasını sağlar.

Eş. 5.2.5'te verilen kısıt görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlar.

Eş. 5.2.6'da verilen kısıt bir istasyona işçi atanmış ise, atanan işçinin yapabileceği görevlerin ilgili istasyona atanmasını sağlar.

Eş. 5.2.7'de verilen kısıt açılmış bir istasyona kesinlikle işçi atanmasını sağlar. İstasyon boş kalamaz.

Eş. 5.2.8'de verilen kısıt işçilerin en fazla bir istasyona atanmasını sağlar. İşçiler istasyona atanmak zorunda değildir.

Eş. 5.2.9'da verilen kısıt önceki istasyon açılmadan sonraki istasyonun açılmasına izin vermez.

Eş. 5.2.10, Eş. 5.2.11 ve Eş. 5.2.12'de verilen kısıtlar karar değişkenlerinin 0-1 değerini alan ikili değişkenler olduğunu gösterir.

5.3 M-MHDİA Problemi için Matematiksel Model

Tez kapsamında önerilecek olan karma tam-sayılı doğrusal programlama matematiksel modelinin amaç fonksiyonu, kısıtları, parametreleri ve karar değişkenleri açıklamalarıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.3.1. M-MHDİA problemi karar modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Açıklama
c	çevrim süresi
t_{iw}	i görevinin w işçisi tarafından tamamlanma zamanı
w_i	i görevinin ücret oranı

Tablo 5.3.2. M-MHDİA problemi karar modelinde kullanılan karar değişkenleri

Değişken	Açıklama
x_{ikw}	i görevinin k istasyonunda w işçisi tarafından yapılması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
y_{kw}	k istasyonuna w işçisi atanması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
z_k	k istasyonunun açılması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili değişken
ws_k	k istasyonunun maliyet oranı

$$Enk \sum_{k=1}^{K} C.ws_k \tag{5.3.1}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} x_{ikw} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, n \tag{5.3.2}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{w=1}^{W} t_{iw}x_{ikw} \leq C.z_k \quad , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.3.3}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{w=1}^{W} x_{ikw} \geq z_k \quad , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.3.4}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} kx_{rkw} \leq \sum_{k=1}^{K}\sum_{w=1}^{W} kx_{skw} \quad , \quad (r,s) \in P_s \tag{5.3.5}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ikw} \leq n.y_{kw} \ , \quad k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.3.6}$$

$$\sum_{w=1}^{W} y_{kw} = z_k \ , \quad k = 1, \dots, K \tag{5.3.7}$$

$$\sum_{k=1}^{K} y_{kw} \leq 1 \ , \quad w = 1, \dots, W \tag{5.3.8}$$

$$ws_k \geq w_i.x_{ikw} \ , \ i = 1, \dots, n \ , \ k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.3.9}$$

$$z_k \geq z_{k+1} \ , \ k = 1, \dots, K \tag{5.3.10}$$

$$x_{ikw} \in \{0,1\} \ , \ i = 1, \dots, n \ , \ k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.3.11}$$

$$y_{kw} \in \{0,1\} \ , \ k = 1, \dots, K \ , \ w = 1, \dots, W \tag{5.3.12}$$

$$z_k \in \{0,1\} \ , \ k = 1, \dots, K \tag{5.3.13}$$

Eş. 5.3.1'de amaç fonksiyonu verilmiştir. Burada birim işçilik, birim yatırım (sermaye) maliyetlerini içeren birim istasyon maliyet oranlarıyla hesaplanan toplam maliyet değerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Eş. 5.3.2'de verilen kısıt tüm görevlerin, istasyona atanan bir işçi tarafından yapılmasını sağlar. Ayrıca, her görevin bir istasyona atanmasını sağlar.

Eş. 5.3.3'de verilen kısıt her bir istasyonun çevrim süresini aşmasını önler.

Eş. 5.3.4'de verilen kısıt açılan her bir istasyona görev atanmasını sağlar.

Eş. 5.3.5'de verilen kısıt görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlar.

Eş. 5.3.6'da verilen kısıt bir istasyona işçi atanmış ise, atanan işçinin yapabileceği görevlerin ilgili istasyona atanmasını sağlar.

Eş. 5.3.7'de verilen kısıt açılmış bir istasyona işçi atanması sağlar.

Eş. 5.3.8’de verilen kısıt işçilerin en fazla bir istasyona atanmasını sağlar. Ayrıca, her işçi istasyona atanmak zorunda değildir.

Eş. 5.3.9’da verilen kısıt bir istasyona atanan görevlerin en büyük ücret oranı, o istasyonun maliyet oranı olarak belirlenir.

Eş. 5.3.10’da verilen kısıt önceki istasyon açılmadan sonraki istasyonun açılmasına izin vermez.

Eş. 5.2.11, Eş. 5.2.12 ve Eş. 5.2.13’de verilen kısıtlar karar değişkenlerinin 0-1 değerini alan ikili değişkenler olduğunu gösterir.

Bir sonraki bölümde yukarıda bahsi geçen M-MHDİA ve MHDİA problemlerinin çözümleri ve alınan sonuçlar tartışılacaktır.

6. SAYISAL ANALİZLER

Bu bölümde M-MHDİA ve MHDİA problemlerinin matematiksel modelleriyle elde edilen sonuçlar sırasıyla tartışılacaktır. Daha sonra iki ayrı modelden ortaya çıkan sonuçlar birbiri ile istasyon sayısı özelinde kıyaslanacak ve en iyi sonuçlar değerlendirilecektir.

M-MHDİA ve MHDİA problemlerinin çözümünde kullanılan, literatürde de bulunan problem isimleri aşağıda verilmiştir.

- Heskia
- Rozsieg
- Sawyer
- Kilbridge
- Hahn

Her problem setinden 80 tane mevcuttur. Toplamda çözüme kavuşturulan problem sayısı 400'dür. Problemler görev sayılarına göre; (1-30) göreve sahip olanlar küçük boyutlu, (31-70) göreve sahip olanlar orta boyutlu ve (71-fazlası) göreve sahip olanlar büyük boyutlu problemler olarak sınıflandırılmıştır.

Tez kapsamında kullanılan problem setlerinden Heskia, Rozsieg ve Sawyer küçük boyutlu, Killbridge ve Hahn setleri orta boyutlu problemlere örnektir. Bu süreçte büyük boyutlu problemlerden Tonge ve Wee-Mag problem setleri tez kapsamında, çözdürülmüştür. Ancak, önerilen matematiksel modelin büyük boyutlu problemlerde en iyi çözüm alamadığı gözlemlendiği için kapsam dışında bırakılmıştır.

Bu kapsamda çözdürülen problemlerden Heskia ve Rozsieg verilerine Blum ve Miralles'in makalesinden ulaşılmıştır [68]. Yine aynı makaleden Sawyer, Killbridge ve Hahn setleri için görev sürelerinin, işçi-görev uyuşmazlık oranının ve öncelik ilişkilerinin nasıl kullanıldığına dair yöntemler alınmış ve uygulanarak belirlenmiştir. M-MHDİA problemi için 5 problem setinde ortak olarak rastgele maliyet üretilmiş ve eklenmiştir. Tüm problemler için literatürde belirlenen çevrim süreleri baz alınarak ekleme yapılmış ve her ortak işçi sayısı için çevrim süreleri sabit tutulmuştur. Buradaki amaç çevrim süresini sabit tutup, en uygun istasyon sayısına ve en düşük maliyete ulaşmaktır.

Ele alınan 5 adet problem setinden toplamda 400 adet problem CPLEX ILOG 12.7.1'de programında çözdürülerek en iyi çözümler araştırılmıştır. Matematiksel modelin çözüme ulaştırılabilmesi için 21600 saniye süre kısıtı tanımlanmıştır. M-MHDİA problem çözümleri EK-1.1 ile EK-1.5. arasında verilmiştir.

EK-1.1 ile EK-1.5'de M-MHDİA 5 adet problem setinin çözümleri paylaşılmıştır. İlk sütunda problem adi verilmiştir. İkinci sütunda problem içinde bulunan işçi sayısı belirtilmiştir. Üçüncü sütunda görev sayıları mevcuttur. Dördüncü ve Beşinci sütunları sırasıyla düşük ve yüksek kuralına göre hesaplanan görev süreleri olmak üzere belirtilmiştir. Blum ve Miralles [68], problemler için görev sürelerini belirlerken iki farklı şekilde hesaplama yapmışlardır;

- Düşük sütununda rastgele üretilecek görev sürelerinin aralığı 1 ile orijinal süre arasındadır.
- Yüksek sütununda rastgele üretilecek görev sürelerinin aralığı 1 ile orijinal sürenin 3 katı arasında değer almaktadır.
- Rastgele üretilen görev süresi iki durumda da maksimum orijinal süre değerinin üzerini aldığı takdirde işçinin görev için uyumsuz olduğu kabul edilip -1 değerini almaktadır.

Altıncı sütunda uyuşmazlık oranları belirlenmiştir. Düşük ve Yüksek olarak ayrılan problemler kendi içlerinde %10 ve %20 uyuşmazlık oranı olarak ayrılmaktadırlar. Bu sebeple sürelerin alacağı -1 değerleri sınırlandırılmıştır. Yedinci sütunda amaç fonksiyonunun aldığı değerleri göstermektedir. M-MHDİA probleminde amaç fonksiyonu toplam maliyetin en küçüklenmesidir. Sekizinci sütunda ise her bir problemin kaç saniyede çözüme kavuştuğunu göstermektedir. "İ" ile başlayan sütunlarda her bir problem de kaç işçinin, kaç görevde kullanıldığını göstermektedir.

İlk problem seti Heskia'da 80 adet problem çözdürülmüştür. Bu problemlerin 40 tanesi 4 işçi, 40 tanesi 7 işçilidir. Bahsi geçen problemlerin hepsinde en iyi çözüme ulaşılmıştır.

İkinci problem Roszieg'de 80 adet problem çözdürülmüştür. Bu problemlerin 40 tanesi 4 işçi, 40 tanesi 6 işçilidir. Yanlızca bir problemde verilen çevrim süresi yetmediği için en iyi çözüm alınamamıştır. Kalan 79 problemde en iyi çözüme ulaşılmıştır.

Üçüncü problem Sawyer'da 80 adet problem çözdürülmüştür. Bu problemlerin 40 tanesi 4 işçi, 40 tanesi 7 işçilidir. Çözdürülen problemlerin hepsinde en iyi çözüme ulaşılmıştır.

Dördüncü ve beşinci problemler, Kilbridge ve Hahn'da, toplam 160 problem çözdürülmüştür. Killbridge setinde 40 problem 6 işçi ve 40 problem 11 işçilidir. Hahn setinde ise 40 problem 7 işçi ve 40 problem 13 işçilidir. İki problem setinde ortak olarak sırası ile 6 ve 7 işçili problemlerde en iyi çözüme ulaşılmıştır. Kilbridge ve Hahn problem seti 11 ve 13 işçili problem grubunda süre kısıtına takılarak uygun sonuçlar bulunmuştur. Ancak bu sonuçlar beklenen en iyi çözüm değildir.

Bütün problemler incelendiğinde çözüm süreleri ortalaması 399 problem de 4359,81 saniye iken, en iyi çözüm veren problem süreleri ortalaması 240 problemde 65,57 saniyedir. Uygun çözüm alınan 160 problemde ise ortalama süre 10801,16 saniye olarak çıkmıştır. Bahsedilen sonuçların özeti Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. M-MHDİA problem setleri çözüm özeti

Problem Adı	Problem Sayısı	En iyi çözüm alınan problem sayısı	Uygun çözüm alınan problem sayısı	Ort. Çözüm Süresi (sn)
Heskia	80	80	-	17,62
Roszieg	80	79	-	1,15
Sawyer	80	80	-	86,16
Kilbridge	80	40	40	10814,1
Hahn	80	40	40	10880,06

MHDİA problemi çözümleri için aynı problem setleri kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu burada istasyon sayısını en küçüklemektir. Elde edilen sonuçlar, M-MHDİA probleminde ortaya çıkan istasyon sayısı ile kıyaslanarak EK-2.1 ile EK-2.5. arasında gösterilmiştir. İstasyon sayısı M-MHDİA probleminde yüksek olanlar yeşil ile boyanmıştır.

EK-2.1 ile EK-2.5'de birinci sütunda problemin adı belirtilmiştir. İkinci ve üçüncü sütunda ise sırası ile işçi sayısı ve görev sayıları belirtilmiştir. Dördüncü ve Beşinci sütunları sırasıyla düşük ve yüksek kuralına göre hesaplanan görev süreleri olmak üzere belirtilmiştir. Altıncı sütunda uyuşmazlık oranları verilmiştir. Yedinci sütunda amaç fonksiyonun aldığı en küçük istasyon sayısı değerleri ve sekizinci sütunda kıyaslama yapacağımız M-MHDİA problem setlerinin almış olduğu kullanılan istasyon değerleri vardır. Tablo 6.2'de yapılan özet kıyaslama gösterilmiştir.

Tablo 6.2. M-MHDİA ve MHDİA istasyon sayıları kıyas tablosu

Problem Adı	Problem Sayısı	İstasyon Sayısı Eşit Olan	İstasyon sayısı M-MHDİA > MHDİA
Heskia	80	67	13
Roszieg	79	67	12
Sawyer	80	59	21
Kilbridge	80	53	27
Hahn	80	58	22

Matthias Amen montaj hattı dengeleme problemlerinde sadece istasyon sayısını en küçüklemenin yeterli olmadığını söylemiştir. İstasyonlar da çalışan işçilerin beceri, tecrübe ve çalıştığı istasyondaki görevin niteliğine göre almış oldukları ücretler vardır. Bu ücretlerin sabit olduğunu varsaymak gerçeği yansıtmaz. Bunun yanında, ücretlerin dağılımlarına göre istasyon sayısı fazla bile olsa en düşük maliyet elde edilebilir. Yukarıdaki tabloda gösterilen istasyon sayılarını özetleyecek olursak;

- 5 problem setinden alınan çözümlerde istasyon sayıları M-MHDİA ve MHDİA problemlerinde birbirine eşit olanların sayısı 304'tür.
- M-MHDİA problem setindeki istasyon sayılarının MHDİA problem setindeki istasyon sayısından büyük olanlar 95'tir. Bahsi geçen problemlerde, istasyon sayısı yüksek olmasına rağmen en düşük maliyete ulaşılmıştır.

EK-2 de görüleceği üzere hiçbir zaman M-MHDİA problemlerinin açmış olduğu istasyon sayısı MHDİA istasyon sayısından küçük değildir.

EK-2 de elde edilen sonuçları işçi sayısına göre kıyasladığımız aşağıdaki özet tablo ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6.3. M-MHDİA ve MHDİA işçi sayısına göre kıyas tablosu

İŞÇİ SAYISINA GÖRE				
Problem Adı	**Problem Sayısı**	**İşçi Sayısı**	**İstasyon Sayısı Eşit Olan**	**M-MHDİA > MHDİA**
Heskia	40	4	36	4
	40	7	31	9
Roszieg	39	4	34	5
	40	6	33	7
Sawyer	40	4	32	8
	40	7	27	13
Kilbridge	40	6	36	4
	40	11	18	22
Hahn	40	7	37	3
	40	13	21	19

Yukarıdaki tabloda elde edilen sonuçlar işçi sayısı özelinde kıyaslanmıştır. Bu bağlamda, tez kapsamında önerilen modelin işçi sayıları özelinde analiz ettiğimizde, M-MHDİA problemi istasyon sayısının MHDİA problemi istasyon sayısından büyük olduğu 95 problemin %26'sı az işçi sayılı problemlerde, %74'ü ise çok işçi sayılı problemlerde alınmıştır. Buradan, önerilen M-MHDİA modelin işçi sayısı arttıkça daha çok istasyon kullanarak daha düşük maliyetlerle sonuca ulaştığı görülmektedir.

Tablo 6.4. M-MHDİA ve MHDİA görev süresi hesap yöntemine göre kıyas tablosu

GÖREV SÜRESİ HESAP YÖNTEMİNE GÖRE				
Problem Adı	**Problem Sayısı**	**Düşük ve Yüksek**	**İstasyon Sayısı Eşit Olan**	**M-MHDİA > MHDİA**
Heskia	40	1	31	9
	40	3	36	4
Roszieg	39	1	31	8
	40	3	36	4
Sawyer	40	1	30	10
	40	3	29	11
Kilbridge	40	1	25	15
	40	3	28	12
Hahn	40	1	28	12
	40	3	30	10

Tez kapsamında önerilen modelin görev süresi hesap yöntemine göre yapılan analizinde M-MHDİA problemi istasyon sayısının MHDİA problemi istasyon sayısından büyük olduğu 95 problemin %43'ünde yüksek, %57'sinde ise düşük yöntemde elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile birlikte rastgele üretilen sürelerin orijinal süreyi geçmediği durumlarda daha çok istasyon ile daha düşük maliyetli sonuç elde edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 6.5. M-MHDİA ve MHDİA uyuşmazlık oranına göre kıyas tablosu

UYUŞMAZLIK ORANINA GÖRE				
Problem Adı	**Problem Sayısı**	**Uyuşmazlık Oranı %**	**İstasyon Sayısı Eşit Olan**	**M-MHDİA > MHDİA**
Heskia	40	10	34	6
	40	20	33	7
Roszieg	40	10	36	4
	39	20	31	8
Sawyer	40	10	28	12
	40	20	31	9
Kilbridge	40	10	27	13
	40	20	26	14
Hahn	40	10	31	9
	40	20	27	13

Yapılan son analiz, önerilen modelin uyuşmazlık oranına göre yapılmıştır. Burada, M-MHDİA problemi istasyon sayısının MHDİA problemi istasyon sayısından daha büyük olduğu 95 problemin %46'sında %10 uyuşmazlık, %54'ünde ise %20 uyuşmazlık oranında elde edilmiştir. Bu durumda, önerilen matematiksel modelin işçi-görev uyuşmazlığı oranının arttıkça, başka bir deyişle görevleri yapabilen işçi sayısı azaldıkça daha çok istasyon kullanarak daha düşük maliyetle sonuca ulaştığı görülmektedir.

7. SONUÇ

MHD problemlerindeki amaç montaj hattındaki istasyon sayılarını sabit bir çevrim süresi içerisinde en küçüklemektir. Bu bağlamda, tez kapsamında M-MHDİA problemi ilk defa ele alınmıştır. Montaj hatlarına yapılan doğru işçi atama ve istasyon sayılarını en küçükleme fonksiyonları her zaman en düşük maliyetli çözümleri ortaya çıkarmaz. Çünkü, işçinin becerisi, tecrübesi ve istasyonlarda kullanılan kaynakların veya yatırım maliyetlerinin ücretleri sabit değildir. Başka bir söylemle, her işçi ve her istasyonun maliyet oranları vardır ve birbirinden bağımsız olarak farklılık göstermektedir. Önerilen modelde maliyet kısıtı eklenerek amaç fonksiyonunda birim işçilik, birim yatırım (sermaye) maliyetlerini içeren birim istasyon maliyet oranlarıyla hesaplanan toplam maliyet değerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda 400 adet problem çözdürülmüştür. Bu problemlerin 239 tanesinde en iyi çözüme ulaşılmıştır. Kalan 160 problem de ise model süre kısıtına takıldığından, uygun çözümler bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, istasyon sayılarının hangi durumlarda artış gösterdiğini kıyaslamak adına işçi sayısına göre, görev süresi hesap yöntemine göre ve uyuşmazlık oranına göre kıyaslanmıştır. Önerilen matematiksel modelin hangi durumlarda daha iyi sonuç verdiği açıklanmıştır. Ayrıca, önerilen matematiksel modelin küçük ve orta boyutlu problemlerde en iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Büyük boyutlu problemler için daha sonraki çalışmalar için sezgisel yaklaşım ile mevcut matematiksel model geliştirilebilir.

En az istasyon her zaman en düşük maliyetli çözüm değildir. Bunu ispatlamak adına M-MHDİA probleminde her bir problem setinde kullanılan istasyon sayısını MHDİA probleminde kullanılan istasyon sayısıyla kıyaslanmıştır. Ortaya çıkan sonuç maliyet tabanlı modelin birçok problemde daha fazla istasyon kullanarak en düşük maliyete ulaştığı, en kötü durumda ise istasyon odaklı model ile aynı sayıda istasyon kullandığı görülmüştür. Bu sonuç bize Matthias Amen'in savunduğu gibi maliyet tabanlı yaklaşımın daha iyi çözüm verdiğini göstermektedir ve maliyet tabanlı matematiksel modelin benimsenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] h. Editors, «HISTORY,» A&E Television Networks, [Çevrimiçi]. Available: https://www.history.com/this-day-in-history/fords-assembly-line-starts-rolling. [Erişildi: 13 Kasım 2009].

[2] Hadi Gökçen and Erdal Eren "A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem," *International Journal of production economics 48,* vol. 2, pp. 177-185, 1997.

[3] Armin Scholl and Christian Becker "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing," *European Journal of Operational Research 168,* vol. 3, no. 168, pp. 666-693, 2004.

[4] M. Amen, "Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey," *International journal of production economics*, vol. 68, pp. 1-14, 2000.

[5] P. D. B. Kobu, Üretim Yönetimi, Beta Yayınevi- Ders Kitapları, 2009.

[6] T. Derya, "*Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni Modeller,"* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA: Yüksek Öğretim Kurumu, 2012.

[7] H. Gökçen, K. Ağpak, R. Benzer, "Balancing of parallel assembly lines,"*International Journal of Production Economics*, vol. 103, pp. 600-609, 2006.

[8] H. Çerçioğlu, "*Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Yeni Modeller,"* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA: Yüksek Öğretim Kurumu, 2009.

[9] T. Kellegöz," *Paralel Çok İşçili Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Yeni Çözüm Yaklaşımları,"* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA: Yüksek Öğretim Kurumu, 2011.

[10] M. Uzmen, "*Montaj Hattı Dengeleme,"*Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul: Yüksek Öğretim Kurumu, 1990.

[11] E. Özgörmüş," *Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme, "* Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli: Yüksek Öğretim Kurumu, 2007.

[12] G. J. Miltenburg and J. Wijngaard “The U-line Line Balancing Problem,” *Management Science*, vol. 40, no. 10, pp. 1378-1388, 1994.

[13] H. Gökçen,”*Karışık Modelli Deterministik Montaj Hattı Dengeleme problemleri İçin Yeni Modeller,”*Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA: Yüksek Öğrenim Kurumu, 1994.

[14] S. Ghosh and R. J. Gagnon “A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems,” *International Journal of Production Research*, vol. 27, no. 4, pp. 637-670, 1989.

[15] İ. Baybars, “A Survey of exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem,” *Management Science*, vol. 32, no. 8, pp. 909-932, 1986.

[16] Nils Boysen, Malte Fliedner, Armin Scholl,”Assembly Line Balancing: Which Model to use when,”*International journal of production economics*, vol. 111, pp. 509-528, 2008.

[17] Matthias Amen, “Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds,” *European Journal of Operational Research*, vol. 168, pp. 747-770, 2006.

[18] Armin Scholl and Christian Becker, “A note on "An exact method for cost-oriented assembly line balancing,” *International Journal of Production Economics*, vol. 97, pp. 343-352, 2005.

[19] O. Rosenberg and H. Ziegler, “A Comparison of Heruistic Algorithms for Cost-Oriented Assembly Line Balancing,” *Methods and Models of Operations Research*, vol. 36, pp. 477-495, 1992.

[20] M. Amen, “An exact method for cost-oriented assembly line balancing,” *International journal of production economics*, vol. 64, pp. 187-195, 2000.

[21] R. Steffen, “Produktionsplanung Bei FlieBbandfertigung.,” Gabler: Wiesbaden, 1977.

[22] C. Miralles et al., “Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study,” *International journal of production economics*, vol. 110, pp. 187-197, 2007.

[23] M. E. Salveson, “The assembly line balancing problem,” *Journal of Industrial Engineering*, vol. 6, pp. 18-25, 1955.

[24] Yong Ju Kim et. al., “A heuristic-based genetic algorithm for workload smoothing in assembly lines,” *Computers Opertaions Research,* vol. 25, no. 2, pp. 99-111, 1998.

[25] Subhash C. Sarin, et al., “A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem,” *Omega The International Journal of Management Science,* vol. 27, pp. 525-535, 1999.

[26] M. Lucertini et al., “Modeling an assembly line for configuration and flow management,” *Computer Integrated MAnufacturing Systems,* vol. 11, no. 1-2, pp. 15-24, 1998.

[27] Armin Scholl and Robert Klein “Balancing assembly lines effectively- A computational comparison,” *European Journal of Operational Research,* vol. 114, pp. 50-58, 1999.

[28] Marc Peeters and Zeger Degraeve “An linear programming based lower bound for the simple assembly line balancing problem,” *European Journal of Operational Research,* vol. 168, pp. 716-731, 2006.

[29] Yakup Kara and Yakup Atasagun “Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times: An Application to Parallel Assembly Lines,” *7th IFAC Proceedings,* vol. 46(9), pp. 845-850, 2013

[30] W. Grzechca, “Assembly Line Balancing Problem with Reduced Number of Workstations,” *IFAC Proceedings of the 19th World Congress*, Cape Town, 2014.

[31] Tae Ok Lee et al., “Modeling and solving constrainted two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms,” *Applied Soft Computing,* vol. 12, pp. 3343-3355, 2012.

[32] Nils Boysen et al,. “A classification of assembly line balancing problems,” *European Journal of Operational Research,* vol. 183, pp. 674-693, 2007.

[33] B. Rekiek. et al., “ State of Art of Optimization Methods for Assembly Line Design,”*Annual Reviews in Control,* vol. 26, pp. 163-174, 2002.

[34] M. D. Toksarı et al., “Simple and U-Type assembly line balancing problems wit ha learning effect,” *Applies Mathematical Modelling,* vol. 32, pp. 2954-2961, 2008.

[35] M. D. Toksarı et al., “Assembly line balancing problem with deterioration tasks and learning effect,” *Expert Systems with Applications,* vol. 37, pp. 1223-1228, 2010.

[36] S. G. Ponnambalam et al., “Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 45, pp. 669-690, 2003.

[37] Mingzhou Jin and S. D. Wu,”A new heuristic method for mixed model assembly line balancing problem,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 44, pp. 159-169, 2002.

[38] A. C. Nearchou, “A differential evolution algorithm for simple assembly line balancing,” *IFAC 16th Triennial World Congress,* Prague, 2005.

[39] U. Özcan and B. Toklu, “Balancing of mixed-model two-sided assembly lines,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 57, pp. 217-227, 2009.

[40] D. R. Morrison et al., “An application of the branch,bound, and remember algorithm to a new simple assembly line balancing dataset,” *European Journal of Operational Research,* vol. 236, pp. 403-409, 2014.

[41] Z. A. Çil. et al., “A Goal Programming Approach for Robotic Assembly Line Balancing Problem,” *IFAC Online Papers,* vol. 49, no. 12, pp. 938-942, 2016.

[42] C. G. S. Sikora et al., “Integer based formulation for the simple assembly line balancing problem with multiple identical tasks,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 104, pp. 134-144, 2017.

[43] Alexandre Dolgui and Evgeny Gafarov, “Some new ideas for assembly line balancing research,” *IFAC Papers Online,* vol. 50, no. 1, pp. 2255-2259, 2017.

[44] Y. Li et al., “Type-1 U-shaped Assembly Line Balancing under certain task time,” *IFAC Papers Online,* vol. 52, no. 13, pp. 992-997, 2019.

[45] L. Lingitz et al., “Balancing non-bottleneck stations using simple assembly line balancing models,” *IFAC Papers Online,* vol. 52, no. 13, pp. 1432-1437, 2019.

[46] Z. A. Çil and D. Kızılay, “Constraint programming model for multi-manned assembly line balancing problem,” *Computers and Operations Research,* vol. 124, pp. 1-14, 2020.

[47] H. S. L. J. F. Kottas, «A-cost-oriented approach to stochastic line balancing,» *AIIE Transactions,* cilt 5, no. 2, pp. 164-171, 1973.

[48] J. F. Kottas and Lau, Hon-Shiang, "A total operating cost model for paced lines with stochastic task times," *IIE Transactions,* vol. 8, no. 2, pp. 234-240, 1976.

[49] F. N. Silverman and J. C. Carter, "A-cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages," *Management Science,* vol. 32, no. 4, pp. 455-463, 1986.

[50] A. Foroughi and H. Gökçen, "Maliyet Tabanlı Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi," *Journal of the Faculty Engineering and Architecture of Gazi University,* vol.29, no. 3, pp. 469-476, 2014.

[51] W. Grzecha, "Estimation of Time and Cost Oriented Assembly Line Balancing Problem," *IEEE Computer Society,* pp. 248-253, Gliwice, 2008, DOI: 10.1109/ICSEng.2008.48

[52] W. Grzechca, "Methodology for cost oriented assembly line balancing problems," *Total Logistic Management,* no. 4, pp. 57-67, 2011.

[53] W. Grzechca, "Cost and Time in two-sided assembly line structure," *Mathematical Methods and Systems in Science and Engineering,* pp. 265-273, 2015.

[54] M. Padron et al., "A methodology for cost-oriented assembly line balancing problems," *Journal of Manufacturing Technology Management,* vol. 20, no. 8, pp. 1147-1165, 2009.

[55] A. Roshani et al., "Cost-oriented two-sided assembly line balancing problem: A simulated annealing approach," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing,* pp. 1-27, 2012, DOI:10.1080/0951192X.2012.664786

[56] P. Salimi et al., "Cost-Oriented Assembly Line Balancing by Considering Resource Constraint," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences,* vol. 7, no. 6, pp. 433-446, 2013.

[57] S. Avikal et al., "*A Heuristic for Cost Oriented Assembly Line Balancing Problems",* 2014, DOI: 10.7763/IPEDR.2014.V75.35

[58] A. Kazemi and A. Sedighi,"A Cost-oriented Model for Multi-manned Assembly Line Balancing Problem," *Journal of Optimization in Industrial Enginerring,* vol. 13, pp. 13-25, 2013.

[59] A. Sepahi, “Heuristic Algorithms to Solve Cost-Oriented Line Balancing Problem,” *European Journal of Academic Essays,* vol. 1, no. 3, pp. 101-107, 2014.

[60] Öncü Hazır et al., “A Survey on Cost and Profit Oriented Assembly Line Balancing,”*19th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Cape Town, August, 2014.

[61] Öncü Hazır, X. Delorme and A. Dolgui,”A Review of Cost and Profit Oriented Lines Design and Balancing Problems and Solution Approaches,” *Annual Reviews in Control*, pp. 1-32, Oct. 2015, DOI: 10.1016/j.arcontrol.2015.09.001

[62] A. Roshani and D. Giglio,”A Mathematical Programming Formulation for Cost-oriented Multi-manned Assembly Line Balancing Problem,» *IFAC Papers Online,* vol.48, no. 3, pp. 2293-2298, 2015.

[63] J. Pereira et al., “A memetic algorithm for the cost-oriented robotic assembly line balancing problem,” *Computers and Operations Research,* vol. 99, pp. 249-261, 2018.

[64] C. Weckenborg and T. S. Spengler,”Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: A cost-oriented approach,” *IFAC Papers Online,* vol. 52, no. 13, pp. 1860-1865, 2019.

[65] C. Miralles et al., “Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work Centres for Disabled,” *Discrete Applied Mathematics*, vol. 156, pp. 352-367, 2008.

[66] A. Corominas et al.,”Balancing assembly line with skilled and unskilled workers,” *Omega The International Journal of Management Science,* vol. 36, pp. 1126-1132, 2008.

[67] C. Miralles et al., “Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study,” *International Journal of Production Economics*, vol. 110, pp. 187-197, 2007.

[68] F. F. B. Araujo et al., “Balancing parallel assembly lines with disabled workers,” *European Journal of Industrial Enginerring*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, xxxx.

[69] C. Blum and C. Miralles,"On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search," *Computers & Operations Research*, vol. 38, pp. 328-339, 2011.

[70] Ö. Mutlu et al., "An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II," *Computers & Operations Research*, vol. 40, pp. 418-426, 2013.

[71] L. Borba and M. Ritt,"A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker assignment and Balancing Problem," *Computers & Operations Research*, vol.45, pp. 87-96, 2014.

[72] M. Vila and J. Pereira, "A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems," *Computers & Operations Research*, vol. 44, pp. 105-114, 2014.

[73] B. Sungur and Y. Yavuz,"Assembly line balancing with hierarchical worker assignment,» *Journal of Manufacturing Systems,"*vol. 37, pp. 290-298, 2015.

[74] M. C. O. Moreira et al., "Model and heuristics for the Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem," *Computers & Operations Research*, vol. 54, pp. 64-73, 2015.

[75] M. C. O. Moreira et al., "The multi-objective assembly line worker integration and balancing problem of type-2," *Computers and Operations Research*, vol. 82, pp. 114-125, 2017.

[76] R. Ramezanian and A. Ezzatpanah,"Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 87, pp. 74-80, 2015.

[77] M. K. Öksüz et al., "U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: A mathematical model and two meta-heuristics," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 112, pp. 246-263, 2017.

[78] D. Giglio et al., "Multi-manned Assembly Line Balancing Problem with Skilled Workers: A New Mathematical Formulation," *IFAC Papers Online*, vol. 50, no. 1, pp. 1211-1216, 2017.

[79] C. G. S. Sikora et al., "Traveling worker assembly line (re)balancing problem: Model, reduction techniques, and real case studies," *European Journal of Operational Research*, vol. 259, pp. 949-971, 2017.

[80] J. Lian et al., “A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems considering the worker heterogeneity,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 118, pp. 366-382, 2018.

[81] M. Liu et al., “Workforce Assignment in Assembly Line Considering Uncertain Demand,” *IFAC Papers Online,* vol. 52, no. 13, pp. 223-228, 2019.

[82] Z. Zhang et al., “Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach,” *Computers and Operations Research,* vol.118, pp. 1-15, 2020.

[83] R. Liu et al., “Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem,” *Computers & Industrial Engineering,* vol. 151, pp. 1-12, 2021.

[84] İbrahim Küçükkoç, PHD.”EMM 4208- Montaj Hattı Tasarımı ve Analizi.” http://ikucukkoc.baun.edu.tr/lectures/EMM4208/Montaj_Hatti_Dengeleme_Yakup_Kara.pdf

EKLER

EK 1.1: M-MHİDA Problemi Çözümleri - Heskia

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4
1	Heskia	4	28	1		10	14848	0,3	24	7	27	0
2	Heskia	4	28	1		10	13056	0,23	23	28	0	0
3	Heskia	4	28	1		10	13568	0,34	7	28	18	0
4	Heskia	4	28	1		10	14080	0,28	28	27	0	0
5	Heskia	4	28	1		10	11008	0,3	25	18	0	0
6	Heskia	4	28	1		10	14336	0,17	24	27	5	0
7	Heskia	4	28	1		10	14080	0,3	25	2	28	0
8	Heskia	4	28	1		10	11008	0,25	12	28	3	0
9	Heskia	4	28	1		10	11264	0,34	16	28	0	0
10	Heskia	4	28	1		10	11520	0,17	4	28	11	2
11	Heskia	4	28	1		20	16128	0,26	25	27	11	0
12	Heskia	4	28	1		20	16384	0,2	28	8	28	0
13	Heskia	4	28	1		20	13312	0,27	28	21	3	0
14	Heskia	4	28	1		20	14336	0,16	27	7	22	0
15	Heskia	4	28	1		20	16384	0,28	2	21	13	28
16	Heskia	4	28	1		20	16384	0,16	24	12	28	0
17	Heskia	4	28	1		20	18432	0,14	26	25	21	0
18	Heskia	4	28	1		20	16640	0,16	12	28	25	0
19	Heskia	4	28	1		20	12288	0,28	20	28	0	0
20	Heskia	4	28	1		20	14848	0,16	22	28	8	0
21	Heskia	4	28		3	10	29952	0,13	12	27	0	0
22	Heskia	4	28		3	10	33572	0,23	16	28	0	0
23	Heskia	4	28		3	10	41202	0,14	26	28	0	0
24	Heskia	4	28		3	10	30720	0,23	28	12	0	0
25	Heskia	4	28		3	10	26112	0,2	28	6	0	0
26	Heskia	4	28		3	10	35328	0,16	19	27	0	0
27	Heskia	4	28		3	10	31488	0,13	13	28	0	0
28	Heskia	4	28		3	10	31488	0,23	28	13	0	0
29	Heskia	4	28		3	10	33792	0,3	16	28	0	0
30	Heskia	4	28		3	10	31488	0,2	13	28	0	0
31	Heskia	4	28		3	20	25344	0,13	1	27	5	0
32	Heskia	4	28		3	20	29952	0,13	28	11	0	0
33	Heskia	4	28		3	20	26880	0,25	28	7	0	0
34	Heskia	4	28		3	20	27648	0,13	28	8	0	0
35	Heskia	4	28		3	20	33792	0,09	17	27	0	0
36	Heskia	4	28		3	20	33024	0,28	17	26	0	0
37	Heskia	4	28		3	20	29952	0,25	28	11	0	0
38	Heskia	4	28		3	20	36864	0,11	21	27	0	0
39	Heskia	4	28		3	20	31488	0,14	28	13	0	0
40	Heskia	4	28		3	20	30720	0,19	28	12	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4
41	Heskia	7	28	1		10	8970	36,86	26	28	11	0
42	Heskia	7	28	1		10	9246	66,7	27	12	28	0
43	Heskia	7	28	1		10	8280	9,64	26	8	26	0
44	Heskia	7	28	1		10	6762	12,78	21	28	0	0
45	Heskia	7	28	1		10	7038	91,59	9	24	18	0
46	Heskia	7	28	1		10	8418	15,22	25	6	28	2
47	Heskia	7	28	1		10	8556	86,5	27	8	27	0
48	Heskia	7	28	1		10	8694	83,47	27	16	20	0
49	Heskia	7	28	1		10	9384	66,16	25	10	5	28
50	Heskia	7	28	1		10	8556	18,75	28	23	11	0
51	Heskia	7	28	1		20	9246	211,12	27	3	24	13
52	Heskia	7	28	1		20	11868	115,63	20	26	12	28
53	Heskia	7	28	1		20	9936	33,45	20	27	2	23
54	Heskia	7	28	1		20	8556	33,74	20	14	28	0
55	Heskia	7	28	1		20	9522	47,84	14	26	28	1
56	Heskia	7	28	1		20	9798	20,31	28	28	15	0
57	Heskia	7	28	1		20	7728	20,89	6	28	22	0
58	Heskia	7	28	1		20	8556	58,27	26	8	28	0
59	Heskia	7	28	1		20	10212	74,41	19	27	1	27
60	Heskia	7	28	1		20	7176	74,75	21	4	27	0
61	Heskia	7	28		3	10	20700	9,73	27	23	0	0
62	Heskia	7	28		3	10	17802	10,41	17	26	0	0
63	Heskia	7	28		3	10	19458	18,38	5	27	15	0
64	Heskia	7	28		3	10	19872	5,99	20	28	0	0
65	Heskia	7	28		3	10	19458	9,39	27	1	19	0
66	Heskia	7	28		3	10	22770	4,63	27	28	0	0
67	Heskia	7	28		3	10	22356	8,81	27	27	0	0
68	Heskia	7	28		3	10	17388	9,25	16	26	0	0
69	Heskia	7	28		3	10	20700	9,78	22	28	0	0
70	Heskia	7	28		3	10	18630	6,81	28	17	0	0
71	Heskia	7	28		3	20	20286	7,88	21	28	0	0
72	Heskia	7	28		3	20	18630	3,19	17	28	0	0
73	Heskia	7	28		3	20	19458	6,17	28	19	0	0
74	Heskia	7	28		3	20	23184	6,78	27	1	28	0
75	Heskia	7	28		3	20	19044	19,41	1	19	26	0
76	Heskia	7	28		3	20	21528	24,53	25	27	0	0
77	Heskia	7	28		3	20	19458	4,13	27	20	0	0
78	Heskia	7	28		3	20	21114	22,11	23	28	0	0
79	Heskia	7	28		3	20	21114	28,98	28	23	0	0
80	Heskia	7	28		3	20	19044	6,97	1	17	28	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ5	İ6	İ7
1	Heskia	4	28	1		10	14848	0,3	0	0	0
2	Heskia	4	28	1		10	13056	0,23	0	0	0
3	Heskia	4	28	1		10	13568	0,34	0	0	0
4	Heskia	4	28	1		10	14080	0,28	0	0	0
5	Heskia	4	28	1		10	11008	0,3	0	0	0
6	Heskia	4	28	1		10	14336	0,17	0	0	0
7	Heskia	4	28	1		10	14080	0,3	0	0	0
8	Heskia	4	28	1		10	11008	0,25	0	0	0
9	Heskia	4	28	1		10	11264	0,34	0	0	0
10	Heskia	4	28	1		10	11520	0,17	0	0	0
11	Heskia	4	28	1		20	16128	0,26	0	0	0
12	Heskia	4	28	1		20	16384	0,2	0	0	0
13	Heskia	4	28	1		20	13312	0,27	0	0	0
14	Heskia	4	28	1		20	14336	0,16	0	0	0
15	Heskia	4	28	1		20	16384	0,28	0	0	0
16	Heskia	4	28	1		20	16384	0,16	0	0	0
17	Heskia	4	28	1		20	18432	0,14	0	0	0
18	Heskia	4	28	1		20	16640	0,16	0	0	0
19	Heskia	4	28	1		20	12288	0,28	0	0	0
20	Heskia	4	28	1		20	14848	0,16	0	0	0
21	Heskia	4	28		3	10	29952	0,13	0	0	0
22	Heskia	4	28		3	10	33572	0,23	0	0	0
23	Heskia	4	28		3	10	41202	0,14	0	0	0
24	Heskia	4	28		3	10	30720	0,23	0	0	0
25	Heskia	4	28		3	10	26112	0,2	0	0	0
26	Heskia	4	28		3	10	35328	0,16	0	0	0
27	Heskia	4	28		3	10	31488	0,13	0	0	0
28	Heskia	4	28		3	10	31488	0,23	0	0	0
29	Heskia	4	28		3	10	33792	0,3	0	0	0
30	Heskia	4	28		3	10	31488	0,2	0	0	0
31	Heskia	4	28		3	20	25344	0,13	0	0	0
32	Heskia	4	28		3	20	29952	0,13	0	0	0
33	Heskia	4	28		3	20	26880	0,25	0	0	0
34	Heskia	4	28		3	20	27648	0,13	0	0	0
35	Heskia	4	28		3	20	33792	0,09	0	0	0
36	Heskia	4	28		3	20	33024	0,28	0	0	0
37	Heskia	4	28		3	20	29952	0,25	0	0	0
38	Heskia	4	28		3	20	36864	0,11	0	0	0
39	Heskia	4	28		3	20	31488	0,14	0	0	0
40	Heskia	4	28		3	20	30720	0,19	0	0	0
41	Heskia	7	28	1		10	8970	36,86	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ5	İ6	İ7
42	Heskia	7	28	1		10	9246	66,7	0	0	0
43	Heskia	7	28	1		10	8280	9,64	0	0	0
44	Heskia	7	28	1		10	6762	12,78	0	0	0
45	Heskia	7	28	1		10	7038	91,59	0	0	0
46	Heskia	7	28	1		10	8418	15,22	0	0	0
47	Heskia	7	28	1		10	8556	86,5	0	0	0
48	Heskia	7	28	1		10	8694	83,47	0	0	0
49	Heskia	7	28	1		10	9384	66,16	0	0	0
50	Heskia	7	28	1		10	8556	18,75	0	0	0
51	Heskia	7	28	1		20	9246	211,12	0	0	0
52	Heskia	7	28	1		20	11868	115,63	0	0	0
53	Heskia	7	28	1		20	9936	33,45	0	0	0
54	Heskia	7	28	1		20	8556	33,74	0	0	0
55	Heskia	7	28	1		20	9522	47,84	0	0	0
56	Heskia	7	28	1		20	9798	20,31	0	0	0
57	Heskia	7	28	1		20	7728	20,89	0	0	0
58	Heskia	7	28	1		20	8556	58,27	0	0	0
59	Heskia	7	28	1		20	10212	74,41	0	0	0
60	Heskia	7	28	1		20	7176	74,75	0	0	0
61	Heskia	7	28		3	10	20700	9,73	0	0	0
62	Heskia	7	28		3	10	17802	10,41	0	0	0
63	Heskia	7	28		3	10	19458	18,38	0	0	0
64	Heskia	7	28		3	10	19872	5,99	0	0	0
65	Heskia	7	28		3	10	19458	9,39	0	0	0
66	Heskia	7	28		3	10	22770	4,63	0	0	0
67	Heskia	7	28		3	10	22356	8,81	0	0	0
68	Heskia	7	28		3	10	17388	9,25	0	0	0
69	Heskia	7	28		3	10	20700	9,78	0	0	0
70	Heskia	7	28		3	10	18630	6,81	0	0	0
71	Heskia	7	28		3	20	20286	7,88	0	0	0
72	Heskia	7	28		3	20	18630	3,19	0	0	0
73	Heskia	7	28		3	20	19458	6,17	0	0	0
74	Heskia	7	28		3	20	23184	6,78	0	0	0
75	Heskia	7	28		3	20	19044	19,41	0	0	0
76	Heskia	7	28		3	20	21528	24,53	0	0	0
77	Heskia	7	28		3	20	19458	4,13	0	0	0
78	Heskia	7	28		3	20	21114	22,11	0	0	0
79	Heskia	7	28		3	20	21114	28,98	0	0	0
80	Heskia	7	28		3	20	19044	6,97	0	0	0

EK 1.2: M-MHİDA Problemi Çözümleri - Roszieg

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3
1	Roszieg	4	25	1		10	2680	0,14	25	25	17
2	Roszieg	4	25	1		10	2720	0,14	25	24	19
3	Roszieg	4	25	1		10	2000	0,14	25	25	0
4	Roszieg	4	25	1		10	2480	0,16	15	23	24
5	Roszieg	4	25	1		10	1960	0,3	23	23	3
6	Roszieg	4	25	1		10	2600	0,14	25	22	18
7	Roszieg	4	25	1		10	2200	0,13	22	8	25
8	Roszieg	4	25	1		10	2480	0,19	25	14	23
9	Roszieg	4	25	1		10	2520	0,14	21	17	25
10	Roszieg	4	25	1		10	2320	0,17	25	24	9
11	Roszieg	4	25	1		20	2680	0,17	19	25	23
12	Roszieg	4	25	1		20	3360	0,16	23	13	25
14	Roszieg	4	25	1		20	2760	0,09	23	6	19
15	Roszieg	4	25	1		20	2160	0,14	24	8	22
16	Roszieg	4	25	1		20	2320	0,16	24	23	11
17	Roszieg	4	25	1		20	2720	0,13	8	25	20
18	Roszieg	4	25	1		20	2400	0,16	5	24	6
19	Roszieg	4	25	1		20	3480	0,08	18	24	24
20	Roszieg	4	25	1		20	3560	0,03	22	25	23
21	Roszieg	4	25		3	10	4440	0,14	12	25	0
22	Roszieg	4	25		3	10	3240	0,13	23	4	0
23	Roszieg	4	25		3	10	3840	0,38	25	7	0
24	Roszieg	4	25		3	10	3480	0,14	24	5	0
25	Roszieg	4	25		3	10	3480	0,16	4	25	0
26	Roszieg	4	25		3	10	4680	0,17	25	14	0
27	Roszieg	4	25		3	10	3120	0,23	24	2	0
28	Roszieg	4	25		3	10	3960	0,14	25	8	0
29	Roszieg	4	25		3	10	3720	0,16	23	8	0
30	Roszieg	4	25		3	10	3600	0,14	25	5	0
31	Roszieg	4	25		3	20	3480	0,16	25	4	0
32	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,17	25	6	0
33	Roszieg	4	25		3	20	3360	0,13	25	3	0
34	Roszieg	4	25		3	20	3840	0,11	25	7	0
35	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,14	5	25	1
36	Roszieg	4	25		3	20	3240	0,11	25	2	0
37	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,14	24	7	0
38	Roszieg	4	25		3	20	3840	0,14	4	25	3
39	Roszieg	4	25		3	20	3360	0,09	2	23	3
40	Roszieg	4	25		3	20	3480	0,19	24	5	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3
41	Roszieg	6	25	1		10	1650	1,31	24	23	19
42	Roszieg	6	25	1		10	1625	6,95	25	15	25
43	Roszieg	6	25	1		10	1450	1,31	2	25	11
44	Roszieg	6	25	1		10	1250	2,58	25	25	0
45	Roszieg	6	25	1		10	1650	3,33	25	24	17
46	Roszieg	6	25	1		10	1300	3,77	3	19	25
47	Roszieg	6	25	1		10	1700	6,28	23	21	24
48	Roszieg	6	25	1		10	1600	3,27	14	25	25
49	Roszieg	6	25	1		10	1525	3,61	16	20	25
50	Roszieg	6	25	1		10	1800	2,19	24	25	23
51	Roszieg	6	25	1		20	1400	2,66	18	25	13
52	Roszieg	6	25	1		20	1600	0,88	22	23	19
53	Roszieg	6	25	1		20	1825	0,75	4	25	7
54	Roszieg	6	25	1		20	1450	0,95	1	10	23
55	Roszieg	6	25	1		20	1800	2,5	23	25	18
56	Roszieg	6	25	1		20	1825	3,75	22	2	21
57	Roszieg	6	25	1		20	2175	2,08	25	1	25
58	Roszieg	6	25	1		20	1475	3,28	13	22	19
59	Roszieg	6	25	1		20	1775	3,09	4	21	15
60	Roszieg	6	25	1		20	1375	2,17	18	22	15
61	Roszieg	6	25		3	10	3075	1,05	23	18	0
62	Roszieg	6	25		3	10	3300	1,19	19	25	0
63	Roszieg	6	25		3	10	3600	1,73	22	25	1
64	Roszieg	6	25		3	10	3600	2,08	25	23	0
65	Roszieg	6	25		3	10	2550	1,17	11	23	0
66	Roszieg	6	25		3	10	3225	1,06	19	24	0
67	Roszieg	6	25		3	10	3375	1,55	24	21	0
68	Roszieg	6	25		3	10	3600	0,94	23	25	0
69	Roszieg	6	25		3	10	3375	1,31	20	25	0
70	Roszieg	6	25		3	10	3375	4,3	25	20	0
71	Roszieg	6	25		3	20	3375	1,2	20	25	0
72	Roszieg	6	25		3	20	3300	1,34	20	24	0
73	Roszieg	6	25		3	20	3525	1,58	25	22	0
74	Roszieg	6	25		3	20	3000	1,05	20	20	0
75	Roszieg	6	25		3	20	3450	1,33	24	22	0
76	Roszieg	6	25		3	20	3375	0,86	25	20	0
77	Roszieg	6	25		3	20	3525	0,97	25	22	0
78	Roszieg	6	25		3	20	3225	1,33	24	19	0
79	Roszieg	6	25		3	20	3525	1,17	22	25	0
80	Roszieg	6	25		3	20	3300	1,7	25	19	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ4	İ5	İ6
1	Roszieg	4	25	1		10	2680	0,14	0	0	0
2	Roszieg	4	25	1		10	2720	0,14	0	0	0
3	Roszieg	4	25	1		10	2000	0,14	0	0	0
4	Roszieg	4	25	1		10	2480	0,16	0	0	0
5	Roszieg	4	25	1		10	1960	0,3	0	0	0
6	Roszieg	4	25	1		10	2600	0,14	0	0	0
7	Roszieg	4	25	1		10	2200	0,13	0	0	0
8	Roszieg	4	25	1		10	2480	0,19	0	0	0
9	Roszieg	4	25	1		10	2520	0,14	0	0	0
10	Roszieg	4	25	1		10	2320	0,17	0	0	0
11	Roszieg	4	25	1		20	2680	0,17	0	0	0
12	Roszieg	4	25	1		20	3360	0,16	23	0	0
14	Roszieg	4	25	1		20	2760	0,09	21	0	0
15	Roszieg	4	25	1		20	2160	0,14	0	0	0
16	Roszieg	4	25	1		20	2320	0,16	0	0	0
17	Roszieg	4	25	1		20	2720	0,13	15	0	0
18	Roszieg	4	25	1		20	2400	0,16	25	0	0
19	Roszieg	4	25	1		20	3480	0,08	21	0	0
20	Roszieg	4	25	1		20	3560	0,03	19	0	0
21	Roszieg	4	25		3	10	4440	0,14	0	0	0
22	Roszieg	4	25		3	10	3240	0,13	0	0	0
23	Roszieg	4	25		3	10	3840	0,38	0	0	0
24	Roszieg	4	25		3	10	3480	0,14	0	0	0
25	Roszieg	4	25		3	10	3480	0,16	0	0	0
26	Roszieg	4	25		3	10	4680	0,17	0	0	0
27	Roszieg	4	25		3	10	3120	0,23	0	0	0
28	Roszieg	4	25		3	10	3960	0,14	0	0	0
29	Roszieg	4	25		3	10	3720	0,16	0	0	0
30	Roszieg	4	25		3	10	3600	0,14	0	0	0
31	Roszieg	4	25		3	20	3480	0,16	0	0	0
32	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,17	0	0	0
33	Roszieg	4	25		3	20	3360	0,13	0	0	0
34	Roszieg	4	25		3	20	3840	0,11	0	0	0
35	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,14	0	0	0
36	Roszieg	4	25		3	20	3240	0,11	0	0	0
37	Roszieg	4	25		3	20	3720	0,14	0	0	0
38	Roszieg	4	25		3	20	3840	0,14	0	0	0
39	Roszieg	4	25		3	20	3360	0,09	0	0	0
40	Roszieg	4	25		3	20	3480	0,19	0	0	0
41	Roszieg	6	25	1		10	1650	1,31	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ4	İ5	İ6
42	Roszieg	6	25	1		10	1625	6,95	0	0	0
43	Roszieg	6	25	1		10	1450	1,31	20	0	0
44	Roszieg	6	25	1		10	1250	2,58	0	0	0
45	Roszieg	6	25	1		10	1650	3,33	0	0	0
46	Roszieg	6	25	1		10	1300	3,77	5	0	0
47	Roszieg	6	25	1		10	1700	6,28	0	0	0
48	Roszieg	6	25	1		10	1600	3,27	0	0	0
49	Roszieg	6	25	1		10	1525	3,61	0	0	0
50	Roszieg	6	25	1		10	1800	2,19	0	0	0
51	Roszieg	6	25	1		20	1400	2,66	0	0	0
52	Roszieg	6	25	1		20	1600	0,88	0	0	0
53	Roszieg	6	25	1		20	1825	0,75	25	12	0
54	Roszieg	6	25	1		20	1450	0,95	24	0	0
55	Roszieg	6	25	1		20	1800	2,5	6	0	0
56	Roszieg	6	25	1		20	1825	3,75	19	9	0
57	Roszieg	6	25	1		20	2175	2,08	24	12	0
58	Roszieg	6	25	1		20	1475	3,28	5	0	0
59	Roszieg	6	25	1		20	1775	3,09	25	6	0
60	Roszieg	6	25	1		20	1375	2,17	0	0	0
61	Roszieg	6	25		3	10	3075	1,05	0	0	0
62	Roszieg	6	25		3	10	3300	1,19	0	0	0
63	Roszieg	6	25		3	10	3600	1,73	0	0	0
64	Roszieg	6	25		3	10	3600	2,08	0	0	0
65	Roszieg	6	25		3	10	2550	1,17	0	0	0
66	Roszieg	6	25		3	10	3225	1,06	0	0	0
67	Roszieg	6	25		3	10	3375	1,55	0	0	0
68	Roszieg	6	25		3	10	3600	0,94	0	0	0
69	Roszieg	6	25		3	10	3375	1,31	0	0	0
70	Roszieg	6	25		3	10	3375	4,3	0	0	0
71	Roszieg	6	25		3	20	3375	1,2	0	0	0
72	Roszieg	6	25		3	20	3300	1,34	0	0	0
73	Roszieg	6	25		3	20	3525	1,58	0	0	0
74	Roszieg	6	25		3	20	3000	1,05	0	0	0
75	Roszieg	6	25		3	20	3450	1,33	0	0	0
76	Roszieg	6	25		3	20	3375	0,86	0	0	0
77	Roszieg	6	25		3	20	3525	0,97	0	0	0
78	Roszieg	6	25		3	20	3225	1,33	0	0	0
79	Roszieg	6	25		3	20	3525	1,17	0	0	0
80	Roszieg	6	25		3	20	3300	1,7	0	0	0

EK 1.3: M-MHİDA Problemi Çözümleri - Sawyer

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4
1	Sawyer	4	30	1		10	5670	0,36	18	29	16	0
2	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,91	28	29	0	0
3	Sawyer	4	30	1		10	5490	0,53	5	26	30	0
4	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,55	30	27	0	0
5	Sawyer	4	30	1		10	5850	1,09	30	5	30	0
6	Sawyer	4	30	1		10	6390	0,28	7	29	5	30
7	Sawyer	4	30	1		10	5220	0,28	28	30	0	0
8	Sawyer	4	30	1		10	5220	0,33	5	30	23	0
9	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,34	27	30	0	0
10	Sawyer	4	30	1		10	6210	0,34	29	10	30	0
11	Sawyer	4	30	1		20	7200	0,22	28	8	18	26
12	Sawyer	4	30	1		20	5580	0,5	5	2	28	27
13	Sawyer	4	30	1		20	6480	0,42	25	30	17	0
14	Sawyer	4	30	1		20	6210	0,55	30	30	9	0
15	Sawyer	4	30	1		20	7470	0,3	29	29	25	0
16	Sawyer	4	30	1		20	6750	0,16	15	30	30	0
17	Sawyer	4	30	1		20	5580	0,34	24	30	8	0
18	Sawyer	4	30	1		20	5220	0,17	3	23	2	30
19	Sawyer	4	30	1		20	6120	0,19	29	9	30	0
20	Sawyer	4	30	1		20	7380	0,36	28	24	30	0
21	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,47	10	29	8	0
22	Sawyer	4	30		3	10	13230	0,56	20	29	0	0
23	Sawyer	4	30		3	10	12960	0,28	19	29	0	0
24	Sawyer	4	30		3	10	11340	0,53	10	29	3	0
25	Sawyer	4	30		3	10	11880	0,59	14	30	0	0
26	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,42	18	29	0	0
27	Sawyer	4	30		3	10	13500	0,25	20	30	0	0
28	Sawyer	4	30		3	10	11070	0,28	13	28	0	0
29	Sawyer	4	30		3	10	14580	0,3	24	30	0	0
30	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,23	19	28	0	0
31	Sawyer	4	30		3	20	13500	0,25	20	30	0	0
32	Sawyer	4	30		3	20	14040	0,19	22	30	0	0
33	Sawyer	4	30		3	20	14850	0,41	25	30	0	0
34	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,33	23	30	0	0
35	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,59	23	30	0	0
36	Sawyer	4	30		3	20	12420	0,14	15	29	2	0
37	Sawyer	4	30		3	20	13770	0,17	30	21	0	0
38	Sawyer	4	30		3	20	12420	0,14	16	30	0	0
39	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,33	23	30	0	0
40	Sawyer	4	30		3	20	13230	0,2	30	5	14	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4
41	Sawyer	7	30	1		10	3572	131,11	18	30	28	0
42	Sawyer	7	30	1		10	3478	129,06	30	14	30	0
43	Sawyer	7	30	1		10	3995	200,16	29	25	1	30
44	Sawyer	7	30	1		10	3431	142,44	29	14	30	0
45	Sawyer	7	30	1		10	3525	275,75	26	7	28	14
46	Sawyer	7	30	1		10	3619	90,06	27	3	18	29
47	Sawyer	7	30	1		10	3196	133,14	28	10	27	3
48	Sawyer	7	30	1		10	3478	376,09	23	30	1	20
49	Sawyer	7	30	1		10	3572	228,61	21	29	26	0
50	Sawyer	7	30	1		10	3619	111,16	14	30	4	29
51	Sawyer	7	30	1		20	3854	213,09	24	30	28	0
52	Sawyer	7	30	1		20	3948	137,38	30	29	25	0
53	Sawyer	7	30	1		20	3196	125,95	26	29	13	0
54	Sawyer	7	30	1		20	4324	283,64	28	29	5	30
55	Sawyer	7	30	1		20	3901	100,09	26	27	30	0
56	Sawyer	7	30	1		20	3384	96,3	20	30	22	0
57	Sawyer	7	30	1		20	3666	86,2	20	29	29	0
58	Sawyer	7	30	1		20	3807	126,48	2	27	22	30
59	Sawyer	7	30	1		20	3572	89,36	27	21	28	0
60	Sawyer	7	30	1		20	3431	536,5	27	30	16	0
61	Sawyer	7	30		3	10	8883	276,61	29	13	21	0
62	Sawyer	7	30		3	10	9729	304,95	6	30	28	5
63	Sawyer	7	30		3	10	9306	579,39	30	12	24	0
64	Sawyer	7	30		3	10	9165	173,26	27	8	30	0
65	Sawyer	7	30		3	10	9024	179,02	30	7	27	0
66	Sawyer	7	30		3	10	10011	136,61	10	29	4	27
67	Sawyer	7	30		3	10	9165	106,97	5	30	29	1
68	Sawyer	7	30		3	10	7191	17,05	25	26	0	0
69	Sawyer	7	30		3	10	10011	129,73	24	17	30	0
70	Sawyer	7	30		3	10	10434	91,19	29	15	30	0
71	Sawyer	7	30		3	20	10152	233,77	27	18	27	0
72	Sawyer	7	30		3	20	9588	239,72	14	28	26	0
73	Sawyer	7	30		3	20	9024	182,88	4	28	10	22
74	Sawyer	7	30		3	20	10716	150,16	29	18	29	0
75	Sawyer	7	30		3	20	10575	59,98	16	30	29	0
76	Sawyer	7	30		3	20	8742	30,94	3	28	4	27
77	Sawyer	7	30		3	20	9024	181,02	6	28	28	2
78	Sawyer	7	30		3	20	9165	108,39	9	29	27	0
79	Sawyer	7	30		3	20	10998	27,16	30	23	25	0
80	Sawyer	7	30		3	20	9447	57,06	1	29	9	28

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ5	İ6	İ7
1	Sawyer	4	30	1		10	5670	0,36	0	0	0
2	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,91	0	0	0
3	Sawyer	4	30	1		10	5490	0,53	0	0	0
4	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,55	0	0	0
5	Sawyer	4	30	1		10	5850	1,09	0	0	0
6	Sawyer	4	30	1		10	6390	0,28	0	0	0
7	Sawyer	4	30	1		10	5220	0,28	0	0	0
8	Sawyer	4	30	1		10	5220	0,33	0	0	0
9	Sawyer	4	30	1		10	5130	0,34	0	0	0
10	Sawyer	4	30	1		10	6210	0,34	0	0	0
11	Sawyer	4	30	1		20	7200	0,22	0	0	0
12	Sawyer	4	30	1		20	5580	0,5	0	0	0
13	Sawyer	4	30	1		20	6480	0,42	0	0	0
14	Sawyer	4	30	1		20	6210	0,55	0	0	0
15	Sawyer	4	30	1		20	7470	0,3	0	0	0
16	Sawyer	4	30	1		20	6750	0,16	0	0	0
17	Sawyer	4	30	1		20	5580	0,34	0	0	0
18	Sawyer	4	30	1		20	5220	0,17	0	0	0
19	Sawyer	4	30	1		20	6120	0,19	0	0	0
20	Sawyer	4	30	1		20	7380	0,36	0	0	0
21	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,47	0	0	0
22	Sawyer	4	30		3	10	13230	0,56	0	0	0
23	Sawyer	4	30		3	10	12960	0,28	0	0	0
24	Sawyer	4	30		3	10	11340	0,53	0	0	0
25	Sawyer	4	30		3	10	11880	0,59	0	0	0
26	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,42	0	0	0
27	Sawyer	4	30		3	10	13500	0,25	0	0	0
28	Sawyer	4	30		3	10	11070	0,28	0	0	0
29	Sawyer	4	30		3	10	14580	0,3	0	0	0
30	Sawyer	4	30		3	10	12690	0,23	0	0	0
31	Sawyer	4	30		3	20	13500	0,25	0	0	0
32	Sawyer	4	30		3	20	14040	0,19	0	0	0
33	Sawyer	4	30		3	20	14850	0,41	0	0	0
34	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,33	0	0	0
35	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,59	0	0	0
36	Sawyer	4	30		3	20	12420	0,14	0	0	0
37	Sawyer	4	30		3	20	13770	0,17	0	0	0
38	Sawyer	4	30		3	20	12420	0,14	0	0	0
39	Sawyer	4	30		3	20	14310	0,33	0	0	0
40	Sawyer	4	30		3	20	13230	0,2	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ5	İ6	İ7
41	Sawyer	7	30	1		10	3572	131,11	0	0	0
42	Sawyer	7	30	1		10	3478	129,06	0	0	0
43	Sawyer	7	30	1		10	3995	200,16	0	0	0
44	Sawyer	7	30	1		10	3431	142,44	0	0	0
45	Sawyer	7	30	1		10	3525	275,75	0	0	0
46	Sawyer	7	30	1		10	3619	90,06	0	0	0
47	Sawyer	7	30	1		10	3196	133,14	0	0	0
48	Sawyer	7	30	1		10	3478	376,09	0	0	0
49	Sawyer	7	30	1		10	3572	228,61	0	0	0
50	Sawyer	7	30	1		10	3619	111,16	0	0	0
51	Sawyer	7	30	1		20	3854	213,09	0	0	0
52	Sawyer	7	30	1		20	3948	137,38	0	0	0
53	Sawyer	7	30	1		20	3196	125,95	0	0	0
54	Sawyer	7	30	1		20	4324	283,64	0	0	0
55	Sawyer	7	30	1		20	3901	100,09	0	0	0
56	Sawyer	7	30	1		20	3384	96,3	0	0	0
57	Sawyer	7	30	1		20	3666	86,2	0	0	0
58	Sawyer	7	30	1		20	3807	126,48	0	0	0
59	Sawyer	7	30	1		20	3572	89,36	0	0	0
60	Sawyer	7	30	1		20	3431	536,5	0	0	0
61	Sawyer	7	30		3	10	8883	276,61	0	0	0
62	Sawyer	7	30		3	10	9729	304,95	0	0	0
63	Sawyer	7	30		3	10	9306	579,39	0	0	0
64	Sawyer	7	30		3	10	9165	173,26	0	0	0
65	Sawyer	7	30		3	10	9024	179,02	0	0	0
66	Sawyer	7	30		3	10	10011	136,61	1	0	0
67	Sawyer	7	30		3	10	9165	106,97	0	0	0
68	Sawyer	7	30		3	10	7191	17,05	0	0	0
69	Sawyer	7	30		3	10	10011	129,73	0	0	0
70	Sawyer	7	30		3	10	10434	91,19	0	0	0
71	Sawyer	7	30		3	20	10152	233,77	0	0	0
72	Sawyer	7	30		3	20	9588	239,72	0	0	0
73	Sawyer	7	30		3	20	9024	182,88	0	0	0
74	Sawyer	7	30		3	20	10716	150,16	0	0	0
75	Sawyer	7	30		3	20	10575	59,98	0	0	0
76	Sawyer	7	30		3	20	8742	30,94	0	0	0
77	Sawyer	7	30		3	20	9024	181,02	0	0	0
78	Sawyer	7	30		3	20	9165	108,39	0	0	0
79	Sawyer	7	30		3	20	10998	27,16	0	0	0
80	Sawyer	7	30		3	20	9447	57,06	0	0	0

EK 1.4: M-MHİDA Problemi Çözümleri - Kilbridge

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4	İ5
1	Killbridge	6	45	1		10	11880	16,92	44	19	45	0	0
2	Killbridge	6	45	1		10	10890	35,86	45	17	37	0	0
3	Killbridge	6	45	1		10	11660	8,97	43	19	44	0	0
4	Killbridge	6	45	1		10	11110	62,72	9	45	2	45	0
5	Killbridge	6	45	1		10	12100	68,95	45	20	45	0	0
6	Killbridge	6	45	1		10	11110	174,17	44	14	43	0	0
7	Killbridge	6	45	1		10	10230	17,27	43	5	45	0	0
8	Killbridge	6	45	1		10	9900	15,81	45	5	39	1	0
9	Killbridge	6	45	1		10	9240	79,47	43	2	39	0	0
10	Killbridge	6	45	1		10	11660	57,91	45	23	38	0	0
11	Killbridge	6	45	1		20	11770	12,8	45	40	22	0	0
12	Killbridge	6	45	1		20	13090	23,5	45	43	31	0	0
13	Killbridge	6	45	1		20	10340	18,41	40	9	45	0	0
14	Killbridge	6	45	1		20	9240	30,56	42	3	39	0	0
15	Killbridge	6	45	1		20	10780	23,13	45	8	45	0	0
16	Killbridge	6	45	1		20	12760	23,86	29	45	42	0	0
17	Killbridge	6	45	1		20	12980	4,55	40	33	45	0	0
18	Killbridge	6	45	1		20	11000	13,17	42	14	44	0	0
19	Killbridge	6	45	1		20	12870	55,11	3	30	45	39	0
20	Killbridge	6	45	1		20	10890	43,16	1	44	9	45	0
21	Killbridge	6	45		3	10	25740	5,28	33	45	0	0	0
22	Killbridge	6	45		3	10	27390	7,48	45	38	0	0	0
23	Killbridge	6	45		3	10	27390	22,66	38	45	0	0	0
24	Killbridge	6	45		3	10	29370	5,05	44	45	0	0	0
25	Killbridge	6	45		3	10	27720	5,31	39	45	0	0	0
26	Killbridge	6	45		3	10	28050	28,33	44	41	0	0	0
27	Killbridge	6	45		3	10	28050	13,56	40	45	0	0	0
28	Killbridge	6	45		3	10	26400	7,19	38	42	0	0	0
29	Killbridge	6	45		3	10	28050	17,58	44	41	0	0	0
30	Killbridge	6	45		3	10	27720	2,67	41	43	0	0	0
31	Killbridge	6	45		3	20	27720	10,69	44	40	0	0	0
32	Killbridge	6	45		3	20	28380	6,11	41	45	0	0	0
33	Killbridge	6	45		3	20	29370	3,84	45	44	0	0	0
34	Killbridge	6	45		3	20	31680	16,64	44	7	45	0	0
35	Killbridge	6	45		3	20	28390	4,16	41	45	0	0	0
36	Killbridge	6	45		3	20	27720	17,75	45	39	0	0	0
37	Killbridge	6	45		3	20	25410	12,17	34	43	0	0	0
38	Killbridge	6	45		3	20	27060	12,86	42	40	0	0	0
39	Killbridge	6	45		3	20	25740	13,94	32	1	45	0	0
40	Killbridge	6	45		3	20	29040	4,25	43	45	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4	İ5
41	Killbridge	11	45	1		10	7425	21600	44	40	1	17	33
42	Killbridge	11	45	1		10	7590	21602	42	45	11	40	0
43	Killbridge	11	45	1		10	8140	21604	32	45	31	40	0
44	Killbridge	11	45	1		10	6490	21601	44	1	1	12	19
45	Killbridge	11	45	1		10	6765	21605	39	18	27	1	38
46	Killbridge	11	45	1		10	7095	21605	35	3	11	45	1
47	Killbridge	11	45	1		10	7315	21601	35	37	44	17	0
48	Killbridge	11	45	1		10	7535	21600	44	14	35	44	0
49	Killbridge	11	45	1		10	6655	21601	44	32	45	0	0
50	Killbridge	11	45	1		10	7810	21602	3	39	45	10	45
51	Killbridge	11	45	1		20	8305	21600	40	45	2	1	43
52	Killbridge	11	45	1		20	7040	21604	4	31	44	1	6
53	Killbridge	11	45	1		20	6765	21601	11	39	3	25	45
54	Killbridge	11	45	1		20	6545	21601	43	4	27	30	15
55	Killbridge	11	45	1		20	8580	21601	45	29	42	40	0
56	Killbridge	11	45	1		20	7590	21601	43	2	43	5	45
57	Killbridge	11	45	1		20	8580	21603	45	28	43	40	0
58	Killbridge	11	45	1		20	8030	21601	38	23	44	41	0
59	Killbridge	11	45	1		20	7700	21601	44	16	1	36	43
60	Killbridge	11	45	1		20	7920	21601	43	45	12	44	0
61	Killbridge	11	45		3	10	16335	21601	21	45	1	32	0
62	Killbridge	11	45		3	10	20955	21601	32	43	8	44	0
63	Killbridge	11	45		3	10	20955	21601	3	44	9	26	45
64	Killbridge	11	45		3	10	20130	21602	42	34	1	45	0
65	Killbridge	11	45		3	10	19140	21601	2	40	29	3	42
66	Killbridge	11	45		3	10	21780	21608	44	45	43	0	0
67	Killbridge	11	45		3	10	21615	21601	45	40	2	44	0
68	Killbridge	11	45		3	10	20625	21631	44	37	44	0	0
69	Killbridge	11	45		3	10	22110	21606	1	45	8	35	1
70	Killbridge	11	45		3	10	21285	21602	39	8	35	3	44
71	Killbridge	11	45		3	20	20955	21600	40	2	21	44	20
72	Killbridge	11	45		3	20	21450	21601	1	41	1	44	33
73	Killbridge	11	45		3	20	22605	21602	44	19	44	30	0
74	Killbridge	11	45		3	20	20790	21603	2	25	45	1	10
75	Killbridge	11	45		3	20	22110	21605	45	6	44	39	0
76	Killbridge	11	45		3	20	24750	21605	29	41	36	44	0
77	Killbridge	11	45		3	20	18645	21602	1	39	3	25	45
78	Killbridge	11	45		3	20	19800	21618	40	9	1	1	24
79	Killbridge	11	45		3	20	20790	21601	2	45	41	38	0
80	Killbridge	11	45		3	20	18315	21601	39	22	5	45	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ6	İ7	İ8	İ9	İ10	İ11
1	Killbridge	6	45	1		10	11880	16,92	0	0	0	0	0	0
2	Killbridge	6	45	1		10	10890	35,86	0	0	0	0	0	0
3	Killbridge	6	45	1		10	11660	8,97	0	0	0	0	0	0
4	Killbridge	6	45	1		10	11110	62,72	0	0	0	0	0	0
5	Killbridge	6	45	1		10	12100	68,95	0	0	0	0	0	0
6	Killbridge	6	45	1		10	11110	174,17	0	0	0	0	0	0
7	Killbridge	6	45	1		10	10230	17,27	0	0	0	0	0	0
8	Killbridge	6	45	1		10	9900	15,81	0	0	0	0	0	0
9	Killbridge	6	45	1		10	9240	79,47	0	0	0	0	0	0
10	Killbridge	6	45	1		10	11660	57,91	0	0	0	0	0	0
11	Killbridge	6	45	1		20	11770	12,8	0	0	0	0	0	0
12	Killbridge	6	45	1		20	13090	23,5	0	0	0	0	0	0
13	Killbridge	6	45	1		20	10340	18,41	0	0	0	0	0	0
14	Killbridge	6	45	1		20	9240	30,56	0	0	0	0	0	0
15	Killbridge	6	45	1		20	10780	23,13	0	0	0	0	0	0
16	Killbridge	6	45	1		20	12760	23,86	0	0	0	0	0	0
17	Killbridge	6	45	1		20	12980	4,55	0	0	0	0	0	0
18	Killbridge	6	45	1		20	11000	13,17	0	0	0	0	0	0
19	Killbridge	6	45	1		20	12870	55,11	0	0	0	0	0	0
20	Killbridge	6	45	1		20	10890	43,16	0	0	0	0	0	0
21	Killbridge	6	45		3	10	25740	5,28	0	0	0	0	0	0
22	Killbridge	6	45		3	10	27390	7,48	0	0	0	0	0	0
23	Killbridge	6	45		3	10	27390	22,66	0	0	0	0	0	0
24	Killbridge	6	45		3	10	29370	5,05	0	0	0	0	0	0
25	Killbridge	6	45		3	10	27720	5,31	0	0	0	0	0	0
26	Killbridge	6	45		3	10	28050	28,33	0	0	0	0	0	0
27	Killbridge	6	45		3	10	28050	13,56	0	0	0	0	0	0
28	Killbridge	6	45		3	10	26400	7,19	0	0	0	0	0	0
29	Killbridge	6	45		3	10	28050	17,58	0	0	0	0	0	0
30	Killbridge	6	45		3	10	27720	2,67	0	0	0	0	0	0
31	Killbridge	6	45		3	20	27720	10,69	0	0	0	0	0	0
32	Killbridge	6	45		3	20	28380	6,11	0	0	0	0	0	0
33	Killbridge	6	45		3	20	29370	3,84	0	0	0	0	0	0
34	Killbridge	6	45		3	20	31680	16,64	0	0	0	0	0	0
35	Killbridge	6	45		3	20	28390	4,16	0	0	0	0	0	0
36	Killbridge	6	45		3	20	27720	17,75	0	0	0	0	0	0
37	Killbridge	6	45		3	20	25410	12,17	0	0	0	0	0	0
38	Killbridge	6	45		3	20	27060	12,86	0	0	0	0	0	0
39	Killbridge	6	45		3	20	25740	13,94	0	0	0	0	0	0
40	Killbridge	6	45		3	20	29040	4,25	0	0	0	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ6	İ7	İ8	İ9	İ10	İ11
41	Killbridge	11	45	1		10	7425	21600	0	0	0	0	0	0
42	Killbridge	11	45	1		10	7590	21602	0	0	0	0	0	0
43	Killbridge	11	45	1		10	8140	21604	0	0	0	0	0	0
44	Killbridge	11	45	1		10	6490	21601	2	39	0	0	0	0
45	Killbridge	11	45	1		10	6765	21605	0	0	0	0	0	0
46	Killbridge	11	45	1		10	7095	21605	34	0	0	0	0	0
47	Killbridge	11	45	1		10	7315	21601	0	0	0	0	0	0
48	Killbridge	11	45	1		10	7535	21600	0	0	0	0	0	0
49	Killbridge	11	45	1		10	6655	21601	0	0	0	0	0	0
50	Killbridge	11	45	1		10	7810	21602	0	0	0	0	0	0
51	Killbridge	11	45	1		20	8305	21600	20	0	0	0	0	0
52	Killbridge	11	45	1		20	7040	21604	42	0	0	0	0	0
53	Killbridge	11	45	1		20	6765	21601	0	0	0	0	0	0
54	Killbridge	11	45	1		20	6545	21601	0	0	0	0	0	0
55	Killbridge	11	45	1		20	8580	21601	0	0	0	0	0	0
56	Killbridge	11	45	1		20	7590	21601	0	0	0	0	0	0
57	Killbridge	11	45	1		20	8580	21603	0	0	0	0	0	0
58	Killbridge	11	45	1		20	8030	21601	0	0	0	0	0	0
59	Killbridge	11	45	1		20	7700	21601	0	0	0	0	0	0
60	Killbridge	11	45	1		20	7920	21601	0	0	0	0	0	0
61	Killbridge	11	45		3	10	16335	21601	0	0	0	0	0	0
62	Killbridge	11	45		3	10	20955	21601	0	0	0	0	0	0
63	Killbridge	11	45		3	10	20955	21601	0	0	0	0	0	0
64	Killbridge	11	45		3	10	20130	21602	0	0	0	0	0	0
65	Killbridge	11	45		3	10	19140	21601	0	0	0	0	0	0
66	Killbridge	11	45		3	10	21780	21608	0	0	0	0	0	0
67	Killbridge	11	45		3	10	21615	21601	0	0	0	0	0	0
68	Killbridge	11	45		3	10	20625	21631	0	0	0	0	0	0
69	Killbridge	11	45		3	10	22110	21606	44	0	0	0	0	0
70	Killbridge	11	45		3	10	21285	21602	0	0	0	0	0	0
71	Killbridge	11	45		3	20	20955	21600	0	0	0	0	0	0
72	Killbridge	11	45		3	20	21450	21601	10	0	0	0	0	0
73	Killbridge	11	45		3	20	22605	21602	0	0	0	0	0	0
74	Killbridge	11	45		3	20	20790	21603	43	0	0	0	0	0
75	Killbridge	11	45		3	20	22110	21605	0	0	0	0	0	0
76	Killbridge	11	45		3	20	24750	21605	0	0	0	0	0	0
77	Killbridge	11	45		3	20	18645	21602	0	0	0	0	0	0
78	Killbridge	11	45		3	20	19800	21618	45	0	0	0	0	0
79	Killbridge	11	45		3	20	20790	21601	0	0	0	0	0	0
80	Killbridge	11	45		3	20	18315	21601	0	0	0	0	0	0

EK 1.5: M-MHİDA Problemi Çözümleri - Hahn

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4	İ5	İ6
1	Hahn	7	53	1		10	256960	688,92	5	53	52	0	0	0
2	Hahn	7	53	1		10	247616	176,23	53	53	0	0	0	0
3	Hahn	7	53	1		10	277984	162,83	53	50	16	0	0	0
4	Hahn	7	53	1		10	357408	29,61	53	48	52	0	0	0
5	Hahn	7	53	1		10	390112	70,23	53	49	15	50	0	0
6	Hahn	7	53	1		10	350400	90,59	47	51	52	0	0	0
7	Hahn	7	53	1		10	334048	37,25	53	37	53	0	0	0
8	Hahn	7	53	1		10	336384	111,41	53	47	44	0	0	0
9	Hahn	7	53	1		10	296672	162,31	26	53	48	0	0	0
10	Hahn	7	53	1		10	266304	80,97	12	51	51	0	0	0
11	Hahn	7	53	1		20	362080	615,28	34	53	48	20	0	0
12	Hahn	7	53	1		20	350400	269,8	49	50	51	0	0	0
13	Hahn	7	53	1		20	345728	180,86	51	44	53	0	0	0
14	Hahn	7	53	1		20	471872	64,31	52	33	52	15	50	0
15	Hahn	7	53	1		20	247616	78,06	53	53	0	0	0	0
16	Hahn	7	53	1		20	242944	30,17	2	49	53	0	0	0
17	Hahn	7	53	1		20	380768	58,59	13	46	51	53	0	0
18	Hahn	7	53	1		20	341056	236,92	5	53	53	35	0	0
19	Hahn	7	53	1		20	324704	285,22	1	50	35	53	0	0
20	Hahn	7	53	1		20	366752	69,48	52	44	53	8	0	0
21	Hahn	7	53		3	10	749856	274,11	52	3	52	0	0	0
22	Hahn	7	53		3	10	770880	538,66	51	7	52	0	0	0
23	Hahn	7	53		3	10	974112	188,88	33	53	53	0	0	0
24	Hahn	7	53		3	10	791904	179,47	8	52	53	0	0	0
25	Hahn	7	53		3	10	756864	34,83	47	49	12	0	0	0
26	Hahn	7	53		3	10	728832	42,86	4	52	48	0	0	0
27	Hahn	7	53		3	10	756864	80,7	49	53	6	0	0	0
28	Hahn	7	53		3	10	777888	57,84	11	52	48	0	0	0
29	Hahn	7	53		3	10	883008	200,61	22	51	53	0	0	0
30	Hahn	7	53		3	10	721824	16,59	52	51	0	0	0	0
31	Hahn	7	53		3	20	756864	91,7	4	52	52	0	0	0
32	Hahn	7	53		3	20	735840	249,5	52	53	0	0	0	0
33	Hahn	7	53		3	20	1030176	371,97	52	49	46	0	0	0
34	Hahn	7	53		3	20	1058208	79,11	46	53	52	0	0	0
35	Hahn	7	53		3	20	658752	37,3	50	44	0	0	0	0
36	Hahn	7	53		3	20	784896	49,75	52	7	53	0	0	0
37	Hahn	7	53		3	20	707808	122,77	2	52	47	0	0	0
38	Hahn	7	53		3	20	721824	31,39	50	53	0	0	0	0
39	Hahn	7	53		3	20	925056	161,75	52	53	27	0	0	0
40	Hahn	7	53		3	20	798912	32,75	12	49	53	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ1	İ2	İ3	İ4	İ5	İ6
41	Hahn	13	53	1		10	222000	21600	52	44	50	2	0	0
42	Hahn	13	53	1		10	234000	21600	50	4	49	53	0	0
43	Hahn	13	53	1		10	234000	21603	53	53	50	0	0	0
44	Hahn	13	53	1		10	253500	21601	50	48	2	16	53	0
45	Hahn	13	53	1		10	249000	21601	19	42	52	53	0	0
46	Hahn	13	53	1		10	256500	21600	41	48	32	50	0	0
47	Hahn	13	53	1		10	226500	21600	52	44	50	0	0	0
48	Hahn	13	53	1		10	297000	21601	51	49	6	23	52	17
49	Hahn	13	53	1		10	265500	21601	4	11	52	3	4	4
50	Hahn	13	53	1		10	240000	21600	53	49	51	7	0	0
51	Hahn	13	53	1		20	295500	21608	9	49	51	36	52	0
52	Hahn	13	53	1		20	276000	21603	41	49	50	44	0	0
53	Hahn	13	53	1		20	286500	21603	50	53	38	50	0	0
54	Hahn	13	53	1		20	255000	21601	52	6	53	5	1	1
55	Hahn	13	53	1		20	264000	21601	51	53	53	19	0	0
56	Hahn	13	53	1		20	305000	21601	52	4	51	50	44	0
57	Hahn	13	53	1		20	253500	21600	5	16	52	44	52	0
58	Hahn	13	53	1		20	270000	21604	31	49	53	47	0	0
59	Hahn	13	53	1		20	219000	21600	48	51	47	0	0	0
60	Hahn	13	53	1		20	279000	21603	33	1	4	53	49	46
61	Hahn	13	53		3	10	693000	21600	53	51	50	0	0	0
62	Hahn	13	53		3	10	688500	21600	1	52	20	3	53	24
63	Hahn	13	53		3	10	643500	21601	12	49	53	29	0	0
64	Hahn	13	53		3	10	657000	21603	49	52	45	0	0	0
65	Hahn	13	53		3	10	684000	21601	7	46	49	50	0	0
66	Hahn	13	53		3	10	639000	21602	32	3	53	43	11	0
67	Hahn	13	53		3	10	621000	21601	8	52	25	53	0	0
68	Hahn	13	53		3	10	693000	21603	49	53	52	0	0	0
69	Hahn	13	53		3	10	733500	21605	13	2	2	49	1	1
70	Hahn	13	53		3	10	796500	21601	28	51	53	45	0	0
71	Hahn	13	53		3	20	823500	21604	47	53	53	30	0	0
72	Hahn	13	53		3	20	868500	21605	13	53	20	27	50	0
73	Hahn	13	53		3	20	634500	21600	51	48	42	0	0	0
74	Hahn	13	53		3	20	751500	21600	6	52	52	53	0	0
75	Hahn	13	53		3	20	661500	21602	48	4	33	5	1	47
76	Hahn	13	53		3	20	778500	21601	24	50	2	53	44	0
77	Hahn	13	53		3	20	670500	21600	38	8	53	50	0	0
78	Hahn	13	53		3	20	697500	21601	20	6	48	53	28	0
79	Hahn	13	53		3	20	738000	21605	21	51	44	48	0	0
80	Hahn	13	53		3	20	634500	21601	42	52	1	46	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ7	İ8	İ9	İ10	İ11	İ12	İ13
1	Hahn	7	53	1		10	256960	688,92	0	0	0	0	0	0	0
2	Hahn	7	53	1		10	247616	176,23	0	0	0	0	0	0	0
3	Hahn	7	53	1		10	277984	162,83	0	0	0	0	0	0	0
4	Hahn	7	53	1		10	357408	29,61	0	0	0	0	0	0	0
5	Hahn	7	53	1		10	390112	70,23	0	0	0	0	0	0	0
6	Hahn	7	53	1		10	350400	90,59	0	0	0	0	0	0	0
7	Hahn	7	53	1		10	334048	37,25	0	0	0	0	0	0	0
8	Hahn	7	53	1		10	336384	111,41	0	0	0	0	0	0	0
9	Hahn	7	53	1		10	296672	162,31	0	0	0	0	0	0	0
10	Hahn	7	53	1		10	266304	80,97	0	0	0	0	0	0	0
11	Hahn	7	53	1		20	362080	615,28	0	0	0	0	0	0	0
12	Hahn	7	53	1		20	350400	269,8	0	0	0	0	0	0	0
13	Hahn	7	53	1		20	345728	180,86	0	0	0	0	0	0	0
14	Hahn	7	53	1		20	471872	64,31	0	0	0	0	0	0	0
15	Hahn	7	53	1		20	247616	78,06	0	0	0	0	0	0	0
16	Hahn	7	53	1		20	242944	30,17	0	0	0	0	0	0	0
17	Hahn	7	53	1		20	380768	58,59	0	0	0	0	0	0	0
18	Hahn	7	53	1		20	341056	236,92	0	0	0	0	0	0	0
19	Hahn	7	53	1		20	324704	285,22	0	0	0	0	0	0	0
20	Hahn	7	53	1		20	366752	69,48	0	0	0	0	0	0	0
21	Hahn	7	53		3	10	749856	274,11	0	0	0	0	0	0	0
22	Hahn	7	53		3	10	770880	538,66	0	0	0	0	0	0	0
23	Hahn	7	53		3	10	974112	188,88	0	0	0	0	0	0	0
24	Hahn	7	53		3	10	791904	179,47	0	0	0	0	0	0	0
25	Hahn	7	53		3	10	756864	34,83	0	0	0	0	0	0	0
26	Hahn	7	53		3	10	728832	42,86	0	0	0	0	0	0	0
27	Hahn	7	53		3	10	756864	80,7	0	0	0	0	0	0	0
28	Hahn	7	53		3	10	777888	57,84	0	0	0	0	0	0	0
29	Hahn	7	53		3	10	883008	200,61	0	0	0	0	0	0	0
30	Hahn	7	53		3	10	721824	16,59	0	0	0	0	0	0	0
31	Hahn	7	53		3	20	756864	91,7	0	0	0	0	0	0	0
32	Hahn	7	53		3	20	735840	249,5	0	0	0	0	0	0	0
33	Hahn	7	53		3	20	1030176	371,97	0	0	0	0	0	0	0
34	Hahn	7	53		3	20	1058208	79,11	0	0	0	0	0	0	0
35	Hahn	7	53		3	20	658752	37,3	0	0	0	0	0	0	0
36	Hahn	7	53		3	20	784896	49,75	0	0	0	0	0	0	0
37	Hahn	7	53		3	20	707808	122,77	0	0	0	0	0	0	0
38	Hahn	7	53		3	20	721824	31,39	0	0	0	0	0	0	0
39	Hahn	7	53		3	20	925056	161,75	0	0	0	0	0	0	0
40	Hahn	7	53		3	20	798912	32,75	0	0	0	0	0	0	0

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	Amaç Fonksiyonu	Zaman	İ7	İ8	İ9	İ10	İ11	İ12	İ13
41	Hahn	13	53	1		10	222000	21600	0	0	0	0	0	0	0
42	Hahn	13	53	1		10	234000	21600	0	0	0	0	0	0	0
43	Hahn	13	53	1		10	234000	21603	0	0	0	0	0	0	0
44	Hahn	13	53	1		10	253500	21601	0	0	0	0	0	0	0
45	Hahn	13	53	1		10	249000	21601	0	0	0	0	0	0	0
46	Hahn	13	53	1		10	256500	21600	0	0	0	0	0	0	0
47	Hahn	13	53	1		10	226500	21600	0	0	0	0	0	0	0
48	Hahn	13	53	1		10	297000	21601	0	0	0	0	0	0	0
49	Hahn	13	53	1		10	265500	21601	51	48	0	0	0	0	0
50	Hahn	13	53	1		10	240000	21600	0	0	0	0	0	0	0
51	Hahn	13	53	1		20	295500	21608	0	0	0	0	0	0	0
52	Hahn	13	53	1		20	276000	21603	0	0	0	0	0	0	0
53	Hahn	13	53	1		20	286500	21603	0	0	0	0	0	0	0
54	Hahn	13	53	1		20	255000	21601	52	0	0	0	0	0	0
55	Hahn	13	53	1		20	264000	21601	0	0	0	0	0	0	0
56	Hahn	13	53	1		20	305000	21601	0	0	0	0	0	0	0
57	Hahn	13	53	1		20	253500	21600	0	0	0	0	0	0	0
58	Hahn	13	53	1		20	270000	21604	0	0	0	0	0	0	0
59	Hahn	13	53	1		20	219000	21600	0	0	0	0	0	0	0
60	Hahn	13	53	1		20	279000	21603	0	0	0	0	0	0	0
61	Hahn	13	53		3	10	693000	21600	0	0	0	0	0	0	0
62	Hahn	13	53		3	10	688500	21600	0	0	0	0	0	0	0
63	Hahn	13	53		3	10	643500	21601	0	0	0	0	0	0	0
64	Hahn	13	53		3	10	657000	21603	0	0	0	0	0	0	0
65	Hahn	13	53		3	10	684000	21601	0	0	0	0	0	0	0
66	Hahn	13	53		3	10	639000	21602	0	0	0	0	0	0	0
67	Hahn	13	53		3	10	621000	21601	0	0	0	0	0	0	0
68	Hahn	13	53		3	10	693000	21603	0	0	0	0	0	0	0
69	Hahn	13	53		3	10	733500	21605	4	52	39	0	0	0	0
70	Hahn	13	53		3	10	796500	21601	0	0	0	0	0	0	0
71	Hahn	13	53		3	20	823500	21604	0	0	0	0	0	0	0
72	Hahn	13	53		3	20	868500	21605	0	0	0	0	0	0	0
73	Hahn	13	53		3	20	634500	21600	0	0	0	0	0	0	0
74	Hahn	13	53		3	20	751500	21600	0	0	0	0	0	0	0
75	Hahn	13	53		3	20	661500	21602	9	0	0	0	0	0	0
76	Hahn	13	53		3	20	778500	21601	0	0	0	0	0	0	0
77	Hahn	13	53		3	20	670500	21600	0	0	0	0	0	0	0
78	Hahn	13	53		3	20	697500	21601	0	0	0	0	0	0	0
79	Hahn	13	53		3	20	738000	21605	0	0	0	0	0	0	0
80	Hahn	13	53		3	20	634500	21601	0	0	0	0	0	0	0

EK -2.1: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları - Heskia

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
1	Heskia	4	28	1		10	3	3
2	Heskia	4	28	1		10	2	2
3	Heskia	4	28	1		10	3	3
4	Heskia	4	28	1		10	2	2
5	Heskia	4	28	1		10	2	2
6	Heskia	4	28	1		10	3	3
7	Heskia	4	28	1		10	3	3
8	Heskia	4	28	1		10	2	3
9	Heskia	4	28	1		10	2	2
10	Heskia	4	28	1		10	2	3
11	Heskia	4	28	1		20	3	3
12	Heskia	4	28	1		20	3	3
13	Heskia	4	28	1		20	3	3
14	Heskia	4	28	1		20	3	3
15	Heskia	4	28	1		20	3	4
16	Heskia	4	28	1		20	3	3
17	Heskia	4	28	1		20	3	3
18	Heskia	4	28	1		20	3	3
19	Heskia	4	28	1		20	2	2
20	Heskia	4	28	1		20	3	3
21	Heskia	4	28		3	10	2	2
22	Heskia	4	28		3	10	2	2
23	Heskia	4	28		3	10	2	2
24	Heskia	4	28		3	10	2	2
25	Heskia	4	28		3	10	2	2
26	Heskia	4	28		3	10	2	2
27	Heskia	4	28		3	10	2	2
28	Heskia	4	28		3	10	2	2
29	Heskia	4	28		3	10	2	2
30	Heskia	4	28		3	10	2	2
31	Heskia	4	28		3	20	2	3
32	Heskia	4	28		3	20	2	2
33	Heskia	4	28		3	20	2	2
34	Heskia	4	28		3	20	2	2
35	Heskia	4	28		3	20	2	2
36	Heskia	4	28		3	20	2	2
37	Heskia	4	28		3	20	2	2
38	Heskia	4	28		3	20	2	2
39	Heskia	4	28		3	20	2	2
40	Heskia	4	28		3	20	2	2
41	Heskia	7	28	1		10	3	3

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
42	Heskia	7	28	1		10	3	3
43	Heskia	7	28	1		10	3	3
44	Heskia	7	28	1		10	2	2
45	Heskia	7	28	1		10	3	3
46	Heskia	7	28	1		10	3	4
47	Heskia	7	28	1		10	3	3
48	Heskia	7	28	1		10	3	3
49	Heskia	7	28	1		10	3	4
50	Heskia	7	28	1		10	3	3
51	Heskia	7	28	1		20	3	4
52	Heskia	7	28	1		20	4	4
53	Heskia	7	28	1		20	3	4
54	Heskia	7	28	1		20	3	3
55	Heskia	7	28	1		20	3	4
56	Heskia	7	28	1		20	3	3
57	Heskia	7	28	1		20	3	3
58	Heskia	7	28	1		20	3	3
59	Heskia	7	28	1		20	3	4
60	Heskia	7	28	1		20	3	3
61	Heskia	7	28		3	10	2	2
62	Heskia	7	28		3	10	2	2
63	Heskia	7	28		3	10	2	3
64	Heskia	7	28		3	10	2	2
65	Heskia	7	28		3	10	2	3
66	Heskia	7	28		3	10	2	2
67	Heskia	7	28		3	10	2	2
68	Heskia	7	28		3	10	2	2
69	Heskia	7	28		3	10	2	2
70	Heskia	7	28		3	10	2	2
71	Heskia	7	28		3	20	2	2
72	Heskia	7	28		3	20	2	2
73	Heskia	7	28		3	20	2	2
74	Heskia	7	28		3	20	3	3
75	Heskia	7	28		3	20	3	3
76	Heskia	7	28		3	20	2	2
77	Heskia	7	28		3	20	2	2
78	Heskia	7	28		3	20	2	2
79	Heskia	7	28		3	20	2	2
80	Heskia	7	28		3	20	2	3

EK -2.2: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Roszieg

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
1	Roszieg	4	25	1		10	3	3
2	Roszieg	4	25	1		10	3	3
3	Roszieg	4	25	1		10	2	3
4	Roszieg	4	25	1		10	3	3
5	Roszieg	4	25	1		10	3	3
6	Roszieg	4	25	1		10	3	3
7	Roszieg	4	25	1		10	3	3
8	Roszieg	4	25	1		10	3	3
9	Roszieg	4	25	1		10	3	3
10	Roszieg	4	25	1		10	3	3
11	Roszieg	4	25	1		20	3	3
12	Roszieg	4	25	1		20	4	4
14	Roszieg	4	25	1		20	4	4
15	Roszieg	4	25	1		20	3	3
16	Roszieg	4	25	1		20	3	3
17	Roszieg	4	25	1		20	4	4
18	Roszieg	4	25	1		20	3	4
19	Roszieg	4	25	1		20	4	4
20	Roszieg	4	25	1		20	4	4
21	Roszieg	4	25		3	10	2	2
22	Roszieg	4	25		3	10	2	2
23	Roszieg	4	25		3	10	2	2
24	Roszieg	4	25		3	10	2	2
25	Roszieg	4	25		3	10	2	2
26	Roszieg	4	25		3	10	2	2
27	Roszieg	4	25		3	10	2	2
28	Roszieg	4	25		3	10	2	2
29	Roszieg	4	25		3	10	2	2
30	Roszieg	4	25		3	10	2	2
31	Roszieg	4	25		3	20	2	2
32	Roszieg	4	25		3	20	2	2
33	Roszieg	4	25		3	20	2	2
34	Roszieg	4	25		3	20	2	2
35	Roszieg	4	25		3	20	2	3
36	Roszieg	4	25		3	20	2	2
37	Roszieg	4	25		3	20	2	2
38	Roszieg	4	25		3	20	2	3
39	Roszieg	4	25		3	20	2	3
40	Roszieg	4	25		3	20	2	2
41	Roszieg	6	25	1		10	3	3
42	Roszieg	6	25	1		10	3	3

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
43	Roszieg	6	25	1		10	3	4
44	Roszieg	6	25	1		10	2	2
45	Roszieg	6	25	1		10	3	3
46	Roszieg	6	25	1		10	3	4
47	Roszieg	6	25	1		10	3	3
48	Roszieg	6	25	1		10	3	3
49	Roszieg	6	25	1		10	3	3
50	Roszieg	6	25	1		10	3	3
51	Roszieg	6	25	1		20	3	3
52	Roszieg	6	25	1		20	3	3
53	Roszieg	6	25	1		20	5	5
54	Roszieg	6	25	1		20	3	4
55	Roszieg	6	25	1		20	4	4
56	Roszieg	6	25	1		20	4	5
57	Roszieg	6	25	1		20	4	5
58	Roszieg	6	25	1		20	4	4
59	Roszieg	6	25	1		20	4	5
60	Roszieg	6	25	1		20	3	3
61	Roszieg	6	25		3	10	2	2
62	Roszieg	6	25		3	10	2	2
63	Roszieg	6	25		3	10	2	3
64	Roszieg	6	25		3	10	2	2
65	Roszieg	6	25		3	10	2	2
66	Roszieg	6	25		3	10	2	2
67	Roszieg	6	25		3	10	2	2
68	Roszieg	6	25		3	10	2	2
69	Roszieg	6	25		3	10	2	2
70	Roszieg	6	25		3	10	2	2
71	Roszieg	6	25		3	20	2	2
72	Roszieg	6	25		3	20	2	2
73	Roszieg	6	25		3	20	2	2
74	Roszieg	6	25		3	20	2	2
75	Roszieg	6	25		3	20	2	2
76	Roszieg	6	25		3	20	2	2
77	Roszieg	6	25		3	20	2	2
78	Roszieg	6	25		3	20	2	2
79	Roszieg	6	25		3	20	2	2
80	Roszieg	6	25		3	20	2	2

EK -2.3: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları – Sawyer

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
1	Sawyer	4	30	1		10	3	3
2	Sawyer	4	30	1		10	2	2
3	Sawyer	4	30	1		10	3	3
4	Sawyer	4	30	1		10	2	2
5	Sawyer	4	30	1		10	3	3
6	Sawyer	4	30	1		10	3	4
7	Sawyer	4	30	1		10	2	2
8	Sawyer	4	30	1		10	2	3
9	Sawyer	4	30	1		10	2	2
10	Sawyer	4	30	1		10	3	3
11	Sawyer	4	30	1		20	4	4
12	Sawyer	4	30	1		20	3	4
13	Sawyer	4	30	1		20	3	3
14	Sawyer	4	30	1		20	3	3
15	Sawyer	4	30	1		20	3	3
16	Sawyer	4	30	1		20	3	3
17	Sawyer	4	30	1		20	3	3
18	Sawyer	4	30	1		20	3	4
19	Sawyer	4	30	1		20	3	3
20	Sawyer	4	30	1		20	3	3
21	Sawyer	4	30		3	10	2	3
22	Sawyer	4	30		3	10	2	2
23	Sawyer	4	30		3	10	2	2
24	Sawyer	4	30		3	10	2	3
25	Sawyer	4	30		3	10	2	2
26	Sawyer	4	30		3	10	2	2
27	Sawyer	4	30		3	10	2	2
28	Sawyer	4	30		3	10	2	2
29	Sawyer	4	30		3	10	2	2
30	Sawyer	4	30		3	10	2	2
31	Sawyer	4	30		3	20	2	2
32	Sawyer	4	30		3	20	2	2
33	Sawyer	4	30		3	20	2	2
34	Sawyer	4	30		3	20	2	2
35	Sawyer	4	30		3	20	2	2
36	Sawyer	4	30		3	20	2	3
37	Sawyer	4	30		3	20	2	2
38	Sawyer	4	30		3	20	2	2
39	Sawyer	4	30		3	20	2	2
40	Sawyer	4	30		3	20	2	3
41	Sawyer	7	30	1		10	3	3
42	Sawyer	7	30	1		10	3	3

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
43	Sawyer	7	30	1		10	4	4
44	Sawyer	7	30	1		10	3	3
45	Sawyer	7	30	1		10	3	4
46	Sawyer	7	30	1		10	3	4
47	Sawyer	7	30	1		10	3	4
48	Sawyer	7	30	1		10	3	4
49	Sawyer	7	30	1		10	3	3
50	Sawyer	7	30	1		10	3	4
51	Sawyer	7	30	1		20	3	3
52	Sawyer	7	30	1		20	3	3
53	Sawyer	7	30	1		20	3	3
54	Sawyer	7	30	1		20	4	4
55	Sawyer	7	30	1		20	3	3
56	Sawyer	7	30	1		20	3	3
57	Sawyer	7	30	1		20	3	3
58	Sawyer	7	30	1		20	3	4
59	Sawyer	7	30	1		20	3	3
60	Sawyer	7	30	1		20	3	3
61	Sawyer	7	30		3	10	3	3
62	Sawyer	7	30		3	10	3	4
63	Sawyer	7	30		3	10	3	3
64	Sawyer	7	30		3	10	3	3
65	Sawyer	7	30		3	10	3	3
66	Sawyer	7	30		3	10	3	5
67	Sawyer	7	30		3	10	3	4
68	Sawyer	7	30		3	10	2	2
69	Sawyer	7	30		3	10	3	3
70	Sawyer	7	30		3	10	3	3
71	Sawyer	7	30		3	20	3	3
72	Sawyer	7	30		3	20	3	3
73	Sawyer	7	30		3	20	3	4
74	Sawyer	7	30		3	20	3	3
75	Sawyer	7	30		3	20	3	3
76	Sawyer	7	30		3	20	3	4
77	Sawyer	7	30		3	20	3	4
78	Sawyer	7	30		3	20	3	3
79	Sawyer	7	30		3	20	3	3
80	Sawyer	7	30		3	20	3	4

EK -2.4: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları - Kilbridge

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
1	Killbridge	6	45	1		10	3	3
2	Killbridge	6	45	1		10	3	3
3	Killbridge	6	45	1		10	3	3
4	Killbridge	6	45	1		10	3	4
5	Killbridge	6	45	1		10	3	3
6	Killbridge	6	45	1		10	3	3
7	Killbridge	6	45	1		10	3	3
8	Killbridge	6	45	1		10	3	4
9	Killbridge	6	45	1		10	3	3
10	Killbridge	6	45	1		10	3	3
11	Killbridge	6	45	1		20	3	3
12	Killbridge	6	45	1		20	3	3
13	Killbridge	6	45	1		20	3	3
14	Killbridge	6	45	1		20	3	3
15	Killbridge	6	45	1		20	3	3
16	Killbridge	6	45	1		20	3	3
17	Killbridge	6	45	1		20	3	3
18	Killbridge	6	45	1		20	3	3
19	Killbridge	6	45	1		20	3	4
20	Killbridge	6	45	1		20	3	4
21	Killbridge	6	45		3	10	2	2
22	Killbridge	6	45		3	10	2	2
23	Killbridge	6	45		3	10	2	2
24	Killbridge	6	45		3	10	2	2
25	Killbridge	6	45		3	10	2	2
26	Killbridge	6	45		3	10	2	2
27	Killbridge	6	45		3	10	2	2
28	Killbridge	6	45		3	10	2	2
29	Killbridge	6	45		3	10	2	2
30	Killbridge	6	45		3	10	2	2
31	Killbridge	6	45		3	20	2	2
32	Killbridge	6	45		3	20	2	2
33	Killbridge	6	45		3	20	2	2
34	Killbridge	6	45		3	20	3	3
35	Killbridge	6	45		3	20	2	2
36	Killbridge	6	45		3	20	2	2
37	Killbridge	6	45		3	20	2	2
38	Killbridge	6	45		3	20	2	2
39	Killbridge	6	45		3	20	2	3
40	Killbridge	6	45		3	20	2	2
41	Killbridge	11	45	1		10	4	5
42	Killbridge	11	45	1		10	4	4

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
43	Killbridge	11	45	1		10	4	4
44	Killbridge	11	45	1		10	4	7
45	Killbridge	11	45	1		10	4	5
46	Killbridge	11	45	1		10	4	6
47	Killbridge	11	45	1		10	4	4
48	Killbridge	11	45	1		10	4	4
49	Killbridge	11	45	1		10	3	3
50	Killbridge	11	45	1		10	3	5
51	Killbridge	11	45	1		20	4	6
52	Killbridge	11	45	1		20	4	6
53	Killbridge	11	45	1		20	3	5
54	Killbridge	11	45	1		20	4	5
55	Killbridge	11	45	1		20	4	4
56	Killbridge	11	45	1		20	3	5
57	Killbridge	11	45	1		20	4	4
58	Killbridge	11	45	1		20	4	4
59	Killbridge	11	45	1		20	3	5
60	Killbridge	11	45	1		20	4	4
61	Killbridge	11	45		3	10	3	4
62	Killbridge	11	45		3	10	4	4
63	Killbridge	11	45		3	10	3	5
64	Killbridge	11	45		3	10	3	4
65	Killbridge	11	45		3	10	3	5
66	Killbridge	11	45		3	10	3	3
67	Killbridge	11	45		3	10	4	4
68	Killbridge	11	45		3	10	3	3
69	Killbridge	11	45		3	10	3	6
70	Killbridge	11	45		3	10	4	5
71	Killbridge	11	45		3	20	4	5
72	Killbridge	11	45		3	20	4	6
73	Killbridge	11	45		3	20	3	4
74	Killbridge	11	45		3	20	4	6
75	Killbridge	11	45		3	20	3	4
76	Killbridge	11	45		3	20	4	4
77	Killbridge	11	45		3	20	3	5
78	Killbridge	11	45		3	20	4	6
79	Killbridge	11	45		3	20	3	4
80	Killbridge	11	45		3	20	3	4

EK -2.5: M-MHDİA VE MHDİA İstasyon Sayıları - Hahn

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
1	Hahn	7	53	1		10	3	3
2	Hahn	7	53	1		10	2	2
3	Hahn	7	53	1		10	3	3
4	Hahn	7	53	1		10	3	3
5	Hahn	7	53	1		10	4	4
6	Hahn	7	53	1		10	3	3
7	Hahn	7	53	1		10	3	3
8	Hahn	7	53	1		10	3	3
9	Hahn	7	53	1		10	3	3
10	Hahn	7	53	1		10	3	3
11	Hahn	7	53	1		20	4	4
12	Hahn	7	53	1		20	3	3
13	Hahn	7	53	1		20	3	3
14	Hahn	7	53	1		20	4	5
15	Hahn	7	53	1		20	2	2
16	Hahn	7	53	1		20	3	3
17	Hahn	7	53	1		20	4	4
18	Hahn	7	53	1		20	3	4
19	Hahn	7	53	1		20	3	4
20	Hahn	7	53	1		20	4	4
21	Hahn	7	53		3	10	3	3
22	Hahn	7	53		3	10	3	3
23	Hahn	7	53		3	10	3	3
24	Hahn	7	53		3	10	3	3
25	Hahn	7	53		3	10	3	3
26	Hahn	7	53		3	10	3	3
27	Hahn	7	53		3	10	3	3
28	Hahn	7	53		3	10	3	3
29	Hahn	7	53		3	10	3	3
30	Hahn	7	53		3	10	2	2
31	Hahn	7	53		3	20	3	3
32	Hahn	7	53		3	20	2	2
33	Hahn	7	53		3	20	3	3
34	Hahn	7	53		3	20	3	3
35	Hahn	7	53		3	20	2	2
36	Hahn	7	53		3	20	3	3
37	Hahn	7	53		3	20	3	3
38	Hahn	7	53		3	20	2	2
39	Hahn	7	53		3	20	3	3
40	Hahn	7	53		3	20	3	3
41	Hahn	13	53	1		10	4	4
42	Hahn	13	53	1		10	3	3

Sıra	Problem adı	İşçi Sayısı	Görev Sayısı	Düşük	Yüksek	Uyuşmazlık %	MHDİA İstasyon Sayısı	MMHDİA Istasyon Sayısı
43	Hahn	13	53	1		10	3	3
44	Hahn	13	53	1		10	4	5
45	Hahn	13	53	1		10	3	4
46	Hahn	13	53	1		10	4	4
47	Hahn	13	53	1		10	4	3
48	Hahn	13	53	1		10	4	6
49	Hahn	13	53	1		10	4	8
50	Hahn	13	53	1		10	4	4
51	Hahn	13	53	1		20	4	5
52	Hahn	13	53	1		20	4	4
53	Hahn	13	53	1		20	4	4
54	Hahn	13	53	1		20	3	7
55	Hahn	13	53	1		20	4	4
56	Hahn	13	53	1		20	4	5
57	Hahn	13	53	1		20	4	5
58	Hahn	13	53	1		20	4	4
59	Hahn	13	53	1		20	3	3
60	Hahn	13	53	1		20	4	6
61	Hahn	13	53		3	10	3	3
62	Hahn	13	53		3	10	4	6
63	Hahn	13	53		3	10	3	4
64	Hahn	13	53		3	10	3	3
65	Hahn	13	53		3	10	4	4
66	Hahn	13	53		3	10	4	5
67	Hahn	13	53		3	10	3	4
68	Hahn	13	53		3	10	3	3
69	Hahn	13	53		3	10	4	9
70	Hahn	13	53		3	10	4	4
71	Hahn	13	53		3	20	4	4
72	Hahn	13	53		3	20	4	5
73	Hahn	13	53		3	20	3	3
74	Hahn	13	53		3	20	4	4
75	Hahn	13	53		3	20	4	7
76	Hahn	13	53		3	20	4	5
77	Hahn	13	53		3	20	3	4
78	Hahn	13	53		3	20	4	5
79	Hahn	13	53		3	20	4	4
80	Hahn	13	53		3	20	4	4