GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI TİPTE İŞGÜCÜNE SAHİP MALİYET YÖNELİMLİ PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Serhan KÖKHAN

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2020

Serhan KÖKHAN tarafından hazırlanan "FARKLI TİPTE İŞGÜCÜNE SAHİP MALİYET YÖNELİMLİ PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……..

Başkan: Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Tez Savunma Tarihi: 30/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Serhan KÖKHAN

30/01/2020

FARKLI TİPTE İŞGÜCÜNE SAHİP MALİYET YÖNELİMLİ PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

(Doktora Tezi)

Serhan KÖKHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Değişen üretim dinamikleri ve müşteri beklentileri, özellikle üretim ortamlarında yeni teknolojilerin, üretim, yöntem, stratejilerin sahada etkin bir şekilde kullanılmasını gerekli kılmıştır. Bu sürecin bir çıktısı olarak yıkıcı teknolojiler başlığı altında özellikle üretim ortamlarında da değişimi zorlayan bu teknolojik gelişmeler, birçok yeni çalışma alanının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Doğru planlama ve etkin stratejiler ile yönetilmesi gereken bu değişim sürecinde özellikle üretim alanında etkin üretim modellerinin tasarlanması ve doğrulanması önem kazanmıştır. Bu çalışmada, özel bir montaj hattı dengeleme problemi sınıfı olan ve literatürde önemli ve yeni bir alan olan insan-robot etkileşimli maliyet yönelimli paralel montaj hattı için bir modelleme ve çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Çalışma kapsamında literatürde kullanılan mevcut paralel montaj hattı görev seti örnekleri ile problem yapısına uygun yeni görev setleri oluşturulmuştur. Daha sonra ele alınan problem karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle edilmiş ve 53 göreve kadar olurlu/eniyi sonuçlar elde edilmiştir. Problemin NP-Zor yapısından dolayı matematiksel modelle belli bir görev sayısından sonra çözüm bulunamaması nedeniyle büyük boyutlu problemler için temel bir sezgisel arama metodu olan COMSOAL çözüm algoritması sunulmuştur. Ayrıca daha etkin sonuçlar elde edilebilmesi için bir Tavlama Benzetimi algoritması kullanılmış ve diğer çözüm metodları ile karşılaştırılmıştır. Bu tez ile farklı tiplerde iş gücü ile maliyet yönelimli paralel montaj hattı dengeleme problemi ilk kez ele alınmıştır.

Bilim Kodu	:	90617
Anahtar Kelimeler	:	Endüstri 4.0, Maliyet yönelimli hat dengeleme, Paralel montaj hattı dengeleme
Sayfa Adedi	:	101
Danışman	:	Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

MODELING AND SOLUTION APPROACHES FOR COST-DRIVEN PARALLEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS WITH DIFFERENT TYPES OF WORKFORCES

(Ph. D. Thesis)

Serhan KÖKHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

Changes in production dynamics and customer expectations have made it necessary to use new technologies, production, methods, and strategies effectively in the field, especially in production environments. As an outcome of this process, these technological developments, which force change in the production environments, under the heading of disruptive technologies, have led to the emergence of many new fields of work. In this process of change, which should be managed with the right planning and effective strategies, it is important to design and verify effective production models especially in the field of production. In this study, a solution approach for human-robot interactive cost-driven parallel assembly line, as a special class of assembly line balancing problems and an important new field in the literature, is presented. Within the scope of the study, new test instances for the presented problem have been generated by using the existing parallel assembly line instances in the literature. Then a mixed integer linear programming model has been formulated, and problem instances up to 53 tasks and priorities have been solved optimally. Due to the NP-Hard nature of the problem, COMSOAL solution algorithm, a problem-specific basic heuristic search method has been developed for the large size problem instances. Besides, a Simulated Annealing algorithm has been developed to obtain more effective results. With this thesis, cost oriented parallel assembly line balancing problem with different types of workforces has been considered for the first time.

Science Code	:	90617
Key Words	:	Industry 4.0, Cost-driven line balancing, Parallel assembly line balancing
Page Number	:	101
Supervisor	:	Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

TEŞEKKÜR

Kıymetli fikirleri ve destekleriyle bu çalışmayı yapmamda önemli emeği olan, hem akademik alanda hem de özel yaşantımda örnek aldığım ve alacağım başta kıymetli ve değerli hocam sayın Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ'a, tez izleme komitelerinde değerli bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle bu süreçte önemli katkılarını aldığım sayın Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN ve Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN hocalarıma, yine bu süreç içerisinde farklı alanlarda desteklerini aldığım hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür eder, beni büyüten ve yetiştiren tüm aileme ve tez dönemim boyunca tüm sıkıntı anlarımda yanımda olan eşim Çağla KÖKHAN'a şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT..... v

TEŞEKKÜR..... vi

İÇİNDEKİLER..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... x

RESİMLERİN LİSTESİ..... xi

KISALTMALAR..... xii

1. GİRİŞ..... 1

2. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ VE ENDÜSTRİ 4.0 İLİŞKİSİ..... 3

2.1. Endüstri 4.0..... 3

2.1.1. Endüstri 4.0 bileşenleri..... 4

2.2. Montaj Hattı Dengeleme (MHD)..... 15

2.2.1. Montaj hatları ve özellikleri..... 15

2.2.2. Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP)..... 17

2.2.3. Basit MHDP (BMHDP)..... 20

2.2.4. Genelleştirilmiş MHDP (GMHDP)..... 22

2.2.5. MHDP'nin diğer eniyileme problemleri içerisindeki yeri..... 23

2.2.6. MHDP'nin sınıflandırılması..... 24

3. PARALEL MONTAJ HATLARI VE PARALEL MHDP..... 41

3.1. Paralel Montaj Hatları..... 41

3.1.1. Paralel montaj hattı yapıları..... 42

3.1.2. Paralel montaj hatlarının özellikleri..... 43

Sayfa

3.2. PMHDP……..... 45

3.3. PMHDP'ne Çözüm Yaklaşımları..... 50

3.3.1. PMHDP'nin 0 – 1 tamsayılı programlama modeli..... 50

3.3.2. PMHDP'nin çözümüne yönelik sezgisel yaklaşımlar..... 52

3.4. PMHDP Literatürü……..... 54

3.5. Maliyet Tabanlı MHDP Literatürü……..... 56

3.6. Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Problemleri (MPMHDP) …..... 59

4. PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MODEL..... 61

4.1. MPMHDP İçin Önerilen 0-1 Tamsayılı Matematiksel Model..... 63

4.1.1. Yeni veri setlerinin oluşturulması……..... 64

4.1.2. Matematiksel model çözüm ve sonuçları..... 67

4.2. MPMHDP Problemi İçin Önerilen COMSOAL Algoritması……..... 69

4.3. MPMHDP İçin Önerilen Tavlama Benzetimi (TB) Algoritması..... 75

4.3.1. Parametre eniyilemesi…..... 78

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 87

KAYNAKLAR..... 89

ÖZGEÇMİŞ..... 101

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. BMHDP türleri..... 21

Çizelge 2.2. Montaj hatlarının sınıflandırılması1..... 24

Çizelge 2.3. Montaj hatlarının sınıflandırılması2..... 25

Çizelge 4.1. Ana veri setleri..... 65

Çizelge 4.2. İşgücü maliyetlerinin hesaplanması..... 66

Çizelge 4.3. Veri setlerinin koşturum sonuçları-1..... 68

Çizelge 4.4. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-1..... 68

Çizelge 4.5. Veri setlerinin koşturum sonuçları-2..... 73

Çizelge 4.6. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-2..... 74

Çizelge 4.7. Yüzdesel fark ile diğer parametrelerin ilişkisi..... 79

Çizelge 4.8. Soğutma oranı ve yüzdesel fark ilişkisi..... 79

Çizelge 4.9. Başlangıç sıcaklığı ve yüzdesel fark ilişkisi..... 80

Çizelge 4.10. İterasyon Sayısı ve yüzdesel fark ilişkisi..... 81

Çizelge 4.11. İşlem zamanı ile diğer değişkenlerin ilişkisi..... 81

Çizelge 4.12. İşlem Zamanı ve soğutma oranı ilişkisi..... 82

Çizelge 4.13. İşlem zamanı ile başlangıç sıcaklığı ilişkisi..... 82

Çizelge 4.14. İşlem zamanı ile iterasyon sayısı ilişkisi..... 83

Çizelge 4.15. Veri setlerinin koşturum sonuçları-3..... 84

Çizelge 4.16. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-3..... 85

Çizelge 4.17. COMSOAL ve TB algoritması sonuçlarının karşılaştırılması..... 86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Montaj hattında üretilecek bir ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramı..... 18

Şekil 2.2. MHDP'nin sınıflandırılması..... 26

Şekil 2.3. Ürün sayısı ve türüne göre montaj hatları..... 28

Şekil 2.4. Hattın şekline göre montaj hatları..... 33

Şekil 3.1. Paralel montaj hattı konfigürasyonları..... 42

Şekil 3.2. Örnek problem için 3 ürünün öncelik ve operasyon zamanları..... 47

Şekil 3.3. Örnek problemde ürünlerin hatlarda bağımsız olarak dengelenmesi durumu için istasyon atamaları, istasyon zamanları ve hat dengeleri..... 48

Şekil 3.4. Örnek problemin ortak kaynak kullanımı ile PMHDP olarak çözümü……. 49

Şekil 4.1. İstasyonlara atanabilecek işgücü tipleri..... 61

Şekil 4.2. Görevlerin şebeke ile gösterimi..... 62

Şekil 4.3. Bowman-1 öncelik ilişki diyagramı..... 66

Şekil 4.4. Matematiksel model çözüm örneği..... 67

Şekil 4.5. COMSOAL akış algoritması..... 70

Şekil 4.6. TB algoritması..... 76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Siber fiziksel sistemler..... 4

Resim 2.2. Nesnelerin interneti..... 5

Resim 2.3. Yapay zeka..... 6

Resim 2.4. Sensör örnekleri..... 7

Resim 2.5. Rfid teknolojisi..... 7

Resim 2.6. Büyük veri..... 8

Resim 2.7. Endüstriyel büyük veri..... 9

Resim 2.8. Bulut bilişim..... 10

Resim 2.9. Siber güvenlik..... 10

Resim 2.10. Siber güvenlik..... 11

Resim 2.11. Sanal gerçeklik..... 12

Resim 2.12. 3D yazıcı..... 12

Resim 2.13. Akıllı fabrika..... 13

Resim 2.14. Robotlu imalat..... 14

Resim 2.15. İnsan-robot etkileşimi..... 14

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
BMHDP	Basit montaj hattı dengeleme problemi
COMSOAL	Computer method for sequencing operations for assembly lines
ÇMD	Çok modelli deterministik
ÇMS	Çok modelli stokastik
GMHDP	Genel montaj hattı dengeleme problemi
IoT	Nesnelerin interneti
MHD	Montaj hattı dengeleme
MHDP	Montaj hattı dengeleme problemi
MPMHDP	Maliyet tabanlı paralel montaj hattı dengeleme problemi
PMHDP	Paralel montaj hattı dengeleme problemi
TB	Tavlama benzetimi
TMD	Tek modelli deterministik
TMS	Tek modelli stokastik

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiler ve değişen müşteri beklentileri üretim ve hizmet alanlarında faaliyet gösteren firmalar için hem yeni fırsatların hem de yeni tehditlerin oluşmasına temel oluşturmuştur. Bu değişimlerin gerçekleşme sıklıkları her geçen gün azalarak devam etmektedir. Önceki dönemlerde yeni bir teknolojik ürün veya yeni teknoloji altyapısına sahip bir hizmet, müşterilerini de tatmin ederek onlarca yıl kullanılabilirken, günümüzde ürün ve hizmetler için bu zaman yıla hatta aylara kadar inmiş durumdadır. İşte bu hızlı değişim sürecine ayak uydurabilen firmalar yeni fırsatları yakalarken, ayak uyduramayan firmalar ise her gün yeni tehditlerle yüzleşmek zorunda kalmaktadırlar.

Üretim sektöründeki teknoloji yatırımlarının hizmet sektörüne göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Son yıllarda özellikle makine, robot ve otomasyon sistemleri konusunda yapılan doğru yatırımların sahadaki etkisi yadsınamayacak ölçüdedir. Yakın geçmişe kadar özellikle robotlar seri üretim süreçlerinde daha etkin rol almışlardır. Fakat özellikle güvenlik ve uzmanlık gibi kriterler nedeniyle insanlarla beraber çalışmaları çoğunlukla mümkün olmamıştır. Son dönemde gelişen sensör teknolojileri ve düşen robot maliyetleri ile insan ve robotların bir arada işbirlikçi şekilde çalışabilmesi imkanı doğmuştur. Bu da farklı çalışma modellerinin oluşmasına olanak tanımıştır. Üretim ortamlarında daha esnek üretim modelleri kurmak, işgücü çeşitlendirmesi, hataların daha etkin önlenebilmesi, iş kazası riski düşük üretim modellerinin kurulabilmesi bu modellere örnek olarak verilebilir.

Günümüzde literatürde kabul edilmiş farklı üretim modelleri bulunmaktadır. Proje tipi, atölye tipi, hücresel üretim, parti tipi üretim ve seri üretim başlıca üretim modellerindendir. Bu üretim modellerinden özellikle seri üretimde montaj ve demontaj süreçleri için hatlar tercih edilmektedir. İyi tasarlanmış hatlar verimliliği yükselterek maliyetleri düşürebilmektedirler. Literatürde montaj hatları olarak adlandırılan bu hatlarda kendi içerisinde farklı modellerde olabilmektedir. Düz, Paralel ve U-tipi montaj hatları en çok kullanılan ve literatürde üzerinde çalışma yapılan hat tipleridir.

Mevcut teknolojik gelişmeler sayesinde robotların insanlarla işbirlikçi şekilde çalışabilmesi özellikle montaj hatlarında verimlilik, hız ve kalite gibi konularda yeni ufuklar açmıştır. Bu gelişim tezin motivasyonunu oluşturmaktadır. Tez çalışmasında ele alınan maliyet yönelimli Paralel Montaj Hattı Problemi (PMHDP) için öncelikle bir matematiksel model önerilmiş

ve farklı görev ve önceliklere sahip veri setleri için model çalıştırılmış, elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. PMHDP'nin NP-Zor yapıda olması nedeniyle belli sayıda görevden sonra matematiksel model ile uygun çözüm elde edilemediğinden, orta ve büyük boyutlu problemler için öncelikle probleme uygun COMSOAL algoritması geliştirilmiş ve c# programlama diliyle kodlanmıştır. Ardından bir Tavlama Benzetim (TB) algoritması oluşturularak kodlanmış ve her iki çözüm metodu için problem setleri koşturulmuştur. Son olarak matematiksel model, COMSOAL ve TB algoritması sonuçları değerlendirilmiştir.

Literatürde PMHDP'nde heterojen yapıda işgücüne sahip olan çok az sayıda çalışmaya rastlandığından, yapılan çalışmanın literatüre ve endüstri 4.0 kavramı altında kurulması düşünülen montaj hatları için yeni bir bakış açısı sağlayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada montaj hatlarının özel bir hali olan paralel montaj hatlarında insan robot etkileşimli bir model tasarlanmıştır. Yapılan çalışmaya en yakın çalışmada heterojen işgücü tipi paralel montaj hatlarında çevrim süresi enküçüklenmesi hedeflenirken, diğer bir yakın çalışmada maliyet tabanlı paralel montaj hatları işlenmiştir (Çil, Mete, Özceylan ve Ağpak, 2017). Temel olarak tez çalışmasında anılan diğer çalışmalardan farklı olarak maliyet tabanlı paralel montaj hatlarında heterojen işgücüne sahip bir problem için türetilen yeni veri setleri ile probleme özgü farklı çözümler önerilmiştir.

Tez çalışmasının 2. Bölümünde endüstri 4.0 ve teknolojik altyapı bileşenleri kısaca anlatılmış, endüstri 4.0 ile montaj hatları ilişkisine yer verilmiştir. Yine aynı Bölümde montaj hatları ve MHDP konusu irdelenmiş, 3. Bölümde tez çalışmasının odak konusu olan paralel montaj hatları ve maliyet tabanlı montaj hatları konusu incelenmiş ve bu alandaki literatür aktarılmıştır. Problem tanımı ve problem çözümü için önerilen metodlar ve çözüm analizleri ise 4. Bölümde açıklanmıştır. Sonuçların tartışılması ve yeni çalışmalar için öneriler ise tezin son bölümü olan 5. Bölümde yer almaktadır.

2. MHDP VE ENDÜSTRİ 4.0 İLİŞKİSİ

Bu bölümde ilk olarak yeni sanayi devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0 kavramı ve alt bileşen teknolojileri açıklanmış. Ardından MHDP kavramı detaylı olarak açıklanmış ve literatürde kullanılan temel problem yapılarına değinilmiştir.

2.1. Endüstri 4.0

İlk sanayi devrimi dönemin gelişen teknolojileri ve bilgi birikimleriyle 18. ve 19. yüzyıllar arası gerçekleşmiştir. Bu dönemde enerji kaynağı olarak verimli olması açısından kömür tercih edilmiş, buhar gücünün hareket organlarına aktarılması ile de makinaların devrimi başlamıştır.

2. sanayi devriminin temelleri, elektriğin icadı ve bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğinin anlaşılmasıyla atılmıştır. Zamanla geliştirilen elektrikle çalışan motor teknolojisi sayesinde devrim hız kazanmış ve bu teknolojinin kullanımı hızla yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu sayede de sanayi gelişimi büyük bir ivme kazanmıştır. Bu dönemde Henry Ford ilk seri üretim bandını kurarak hayata geçirmiş ve ilk montaj hatları kullanılmaya başlanmıştır.

3. sanayi devrimi ise 1970'li yıllarda başlamış ve günümüze değin sürmüştür. 2. Dünya Savaşı sonrası dönemde elektronik, bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler ile PLC'lerin kullanılmaya başlanmasıyla üretimde otomasyon devri başlamıştır. Bu dönemde alternatif enerji kaynağı olarak da yenilenebilir enerji kaynakları görülmeye başlanmıştır.

Günümüzde Doğu'nun ürettiği ürünlerin kalitesindeki önemli atılımlar, üretim rakamları ve güçlenen ekonomisi Batı için bir tehdit haline gelmiştir. Bu tehdit özellikle Almanya'nın başı çektiği Batılı ülkeleri, ürünlerin pazara çıkış hızını arttırarak, daha esnek bir üretim yapısına sahip olarak, kişiselleştirilmiş ürünler üretebilen ve üretimde verimliliği arttırmaya yönelik akıllı imalat ve akıllı fabrikalar gibi çözümler arayama itmiştir.

Akıllı imalatı; tüm eylemlerin üretkenliği, enerji kullanımını, ekonomik performansını eniyilemeyi amaçlayan, durumsal farkındalığı olan, gerçek zamanlı karar alabilen, esnek davranabilen, kendi erken teşhis ve tedavi yeteneği bulunan, çevresiyle ve diğer sistemlerle

bağlantılı çalışan üretim yapısı olarak tanımlayabiliriz. Literatürde bazı tanımları olsa da, Endüstri 4.0 bu akıllı imalatı olanaklı kılan teknolojilerin bütününe verilen isim olarak kısaca açıklayabiliriz.

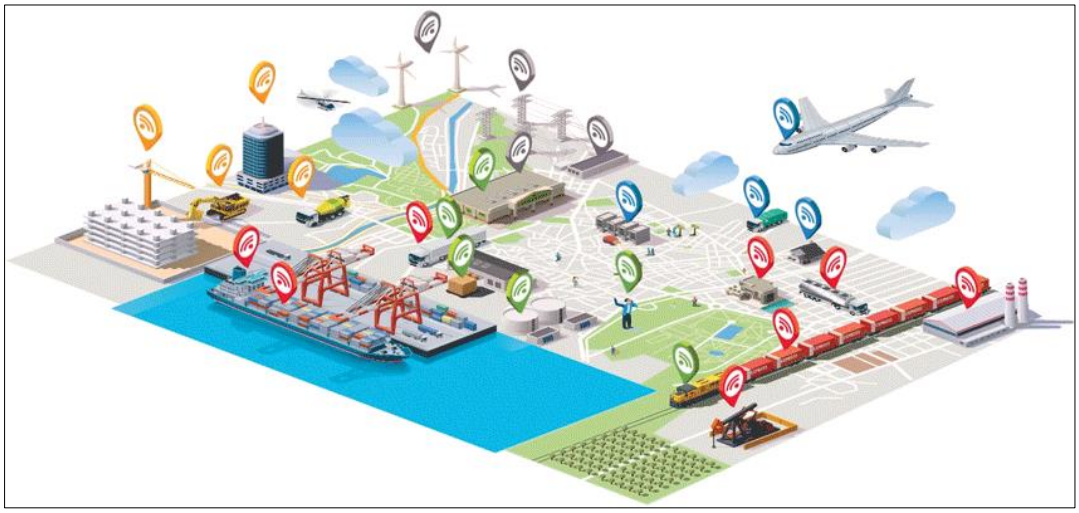
2.1.1. Endüstri 4.0 bileşenleri

İçerisinde başlıca; arttırılmış gerçeklik, yapay zeka, işbirlikçi robotlar, nesnelerin interneti, 3D yazıcı teknolojisi, simülasyon yazılımları ve dijital prototiplemeyi, bulut teknolojileri vb. başlıkları barındırmaktadır.

Siber-fiziksel sistemler

Yaşamımızın önemli bir parçası olan elektronik cihazlarımızın işlevlerinin düzenlenmesi, izlenmesi ve kontrolünde kullanılan işlemciler dünyadaki ürünlerin yaklaşık %90'ında yer almaktadır.

Otomobilden telefona, beyaz eşyadan satış makinalarına kadar pek çok ürün bu cihazlara örnek olarak verilebilir. Bu ürünlerdeki işlemciler gömülü sistemler olarak adlandırılmaktadır. İşlemcilerin dış dünya ile ilişkileri sensör ve aktüatörler aracılığıyla yapılmaktadır.

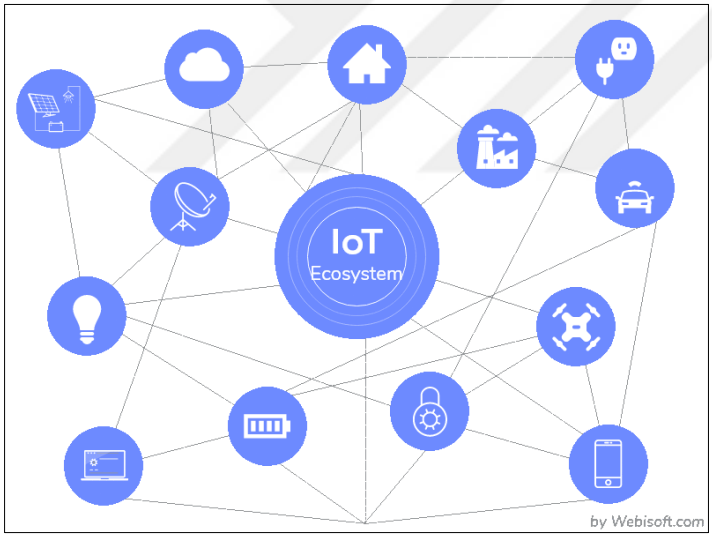


Resim 2.1. Siber fiziksel sistemler (www.pngfuel.com)

Endüstri 4.0 içinde Siber-fiziksel sistemler etkin olarak kullanılmaktadır. “Siber fiziksel sistemler fiziksel dünyanın sanal yapı ile bütünleşmesi sonucu ortaya çıkan ağlardır” denebilir. Ağı oluşturan gerçek nesneler dijital iletişim kanalları sayesinde birbirleri ile haberleşir ve etkileşirler. Haberleşme eşten eşe bağlantı şeklinde olabileceği gibi en büyük ağ olan internet üzerinden de gerçekleşebilir.

Nesnelerin interneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) ilk olarak 1999 yılında hazırladığı bir sunumda Kevin Ashton tarafından ortaya atılan bir terimdir. Benzersiz bir şekilde adreslenebilir nesnelerin kendi aralarında oluşturduğu, dünya çapında yaygın bir ağ ve bu ağdaki nesnelerin belirli bir protokol ile birbirleriyle iletişim içinde olmaları olarak tanımlanmaktadır.



Resim 2.2. Nesnelerin interneti (www.cybermagonline.com)

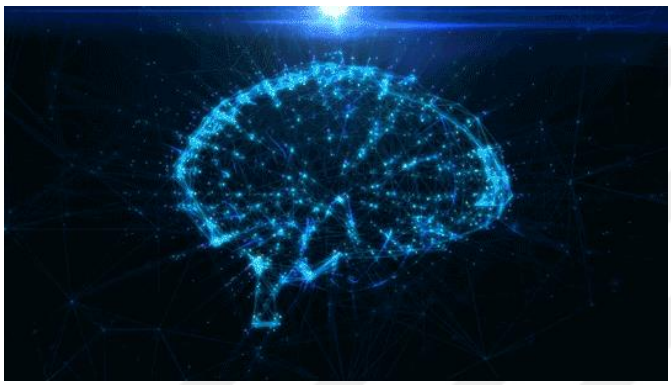
Günlük yaşantımızda; tarım alanında, akıllı şehir ve ev konseptinde, binalarda, enerji tüketiminde, güvenlik ve sağlık gibi alanlarda bu yapının kullanımının her geçen gün artacağı düşünülmektedir.

Yapılan araştırmalara göre bugün internete 10-11 milyar cihazın bağlı olduğu tahmin edilmekte ve bu rakamın 2020 yılına gelindiğinde 50 milyar cihaz seviyesine çıkması öngörülmektedir. Aynı araştırmalara göre; 2003 yılında dünyada kişi başına düşen birbirleriyle bağlantılı cihaz oranı 0,08 iken bu oranın 2020 tahmini ise 6,48 olması

öngörülmektedir. Ayrıca 2020 yılında, 20 adet tipik ev cihazının üreteceği bilgi trafiğinin, 2008 yılında üretilen tüm internet trafiğinden daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle Nesnelerin İnterneti ifadesinin bugün artık yerini Herşeyin İnterneti ifadesine bıraktığı söylenebilir.

Yapay zekâ

Yapay zeka, bilgisayarların insan zekasına özgü öğrenme, algılama, düşünme, iletişim kurma ve karar verme becerilerinin benzeşim yeteneği olarak tanımlanabilir.

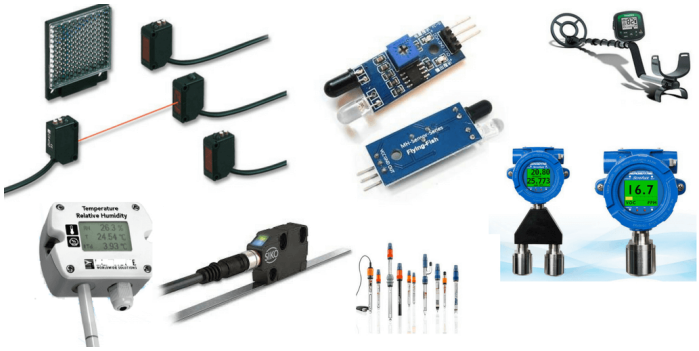


Resim 2.3. Yapay zeka (www.templeilluminatus.com)

Yapay zekâ kullanımı sayesinde, insanının işleyebileceği veriden çok daha büyük ölçekteki veriyi insanın düşünme becerilerine yakın olarak, analiz ederek sonuçlar üretebilmektedir. Yapay zekaya sahip akıllı robotlar da, insanların sahip oldukları düşünme yeteneğini belli algoritmalar ve metotlar ile öğrenerek simüle etmeyi başarabilmektedir.

Sensörler

Algılayıcı olarak da tanımlanabilen sensörler, otomatik kontrol sistemlerinin duyu organlarına verilen genel bir addır. Sensörler, hem makine/robot hem de üretim süreci hakkında verileri temin etmesi nedeniyle Endüstri 4.0'ın önemli bir teknolojik parametresidir. Bu nedenle bu parametrenin Endüstri 4.0'ın devriminin hızlı ve başarılı bir şekilde sürdürülebilmesi ve yaygınlaştırılabilmesi için gelişmeye ihtiyacı bulunmaktadır.



Resim 2.4. Sensör örnekleri (www.theautomization.com)

Günümüzde sensörlerin kullanımında bazı teknolojik kısıtlamalar bulunmaktadır. Piyasadaki sensörlerin büyük bir çoğunluğu üretim ortamına doğrudan entegre edilememekte ve online veri iletimi özelliği de bulunmamaktadır. Entegrasyon ve online veri iletimini sağlayan yeni nesil sensörlerin piyasa fiyatları ise şimdilik pahalı durumdadırlar. Bu nedenle yapılan ar-ge çalışmaları ile algılanan verilerin doğrudan analiz edilmesini sağlayan, kolay adapte olabilen ve daha düşük fiyatlı akıllı sensörlerin geliştirilmesi için yoğun olarak çalışılmaktadır.

RFID teknolojisi

Endüstri dünyasının penceresinden bakacak olursak; üretimde hız ve verimlilik odaklı bir üretim sürecinde, birbirleri ile iletişim halindeki makine, robot ve komponentlerden oluşan yapıdan alınan verinin yorumlanması ve üretimin hangi aşamasındaki olunduğu, üretim içerisindeki hareketlerin kolayca takip edilebilmesi önemlidir. İşte tam bu noktada, RFID teknolojisi devreye gider.

Resim 2.5. Rfid teknolojisi (www.lipidigital.com)

RFID otomatik nesne tanımlama teknolojisi olarak tanımlanabilir. RFID, mikro işlemci ile donatılmış etiket (tag) taşıyan bir nesnenin, bu etikette taşıdığı bilgiler ile hareketlerinin izlenebilmesi imkanını veren, radyo frekansları ile çalışan otomatik tanıma sistemidir.

Büyük veri

Büyük veri devasa, uçsuz bucaksız, tanımlı veya tanımlı olmayan verilere verilen genel isimdir. Büyük veri içerisine; işletmeler arasındaki alışverişler, işlemler, e-mailler, facebook vb. sosyal medya paylaşımları gibi birçok veri girmektedir.

Bugün dünyadaki verilerin %90'ı son iki yılda tek başına oluşturulmuştur. Şu anki veri çıkışımız kabaca günde 2.5 quintillion (kentilyon) byte. Dünya giderek artan sayıda elektronik cihazla daha da bağlantılı hale geldikçe, bu verinin önümüzdeki yıllarda daha da büyüyeceği öngörülmektedir.

Resim 2.6. Büyük veri (www.newgenapps.com)

Bir bütün olarak, internet nüfusu 2016'dan bu yana yüzde 7,5 oranında artmıştır ve şu anda 3,7 milyardan fazla insanı içermektedir. Ortalama olarak, ABD sadece her dakika 2.657.700 gigabite internet verisi oluşturmaktadır.

İşte tüm bu verilerin analiz edilmesi, anlamlandırılması, belli paternlerin ve trendlerin oluşturulması şirketlerin gelecekleriyle ilgili stratejik planlar yapmalarında, problemleri

etkili bir şekilde çözmelerinde, ürün ve hizmetlerini müşterilerinin ihtiyaç ve tercihleri doğrultusunda geliştirmelerinde büyük rol oynamaktadır. Çünkü günümüzde ölçülebilen veri 21. yüzyılın en büyük gücü haline gelmiştir.

Endüstriyel büyük veri

Günümüzde akıllı makinelere bağlı sensörlerden milyonlarca bit'lik veri akışı gerçekleşmektedir. Toplanan bu veriler anlamlandırılmadığı sürece veri yığınından öteye geçmemektedir. İşletmeler için toplanan bu verinin hızlı bir şekilde analiz edilebilmesi ve bilgiye dönüştürülmesi büyük önem tanışmaktadır.

Resim 2.7. Endüstriyel büyük veri (www.yed.org.tr)

Fabrikadan toplanan bu verilerle üretim planlaması, bakım planlaması, maliyet analizi, verimlilik gibi birçok konuda kararlar alınmaktadır. En önemlisi de bu süreçte plansız fabrika duruşlarının önüne geçilmesi konusunda ciddi avantajları olmaktadır. Geriye dönük analizler birçok sorunun nedenlerine ışık tutuğu gibi, bu veriye dayalı kestirimler birçok sorunun gerçekleşmeden önce tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu denli geniş analizlerin etkin uygulanması işletmeler, zamandan ve maliyetten tasarruf edebilmektedirler. Sonuç olarak büyük veri konu başlığının Endüstri 4.0 içerisinde önemli bir yer teşkil ettiği söylenebilir.

Bulut bilişim

Bulut bilişim dosya saklama ve dosyalara ulaşım gibi problemlerin ortadan kalkmasını sağlayan bir teknolojidir. Bu yapı hayatımıza giren akıllı teknolojilerin daha aktif ve verimli

kullanılması mümkün kılmaktadır. Dosya ve veri kayıplarının ortadan kalkması, verilere kesintisiz olarak 7/24 ulaşılabilmesi, üstelik bunun herhangi bir cihaza bağımlı şekilde söz konusu olmaması, bulut bilişimin en büyük özelliğidir.

Resim 2.8. Bulut bilişim (www.mobileappdaily.com)

Bulut bilişim hizmetlerine yatırım yapan firmalar, genellikle maliyet ve donanımsal gereksinimlerden ötürü bu hizmetten kiralama şeklinde yararlanabilmektedir. Public Cloud veya Private Cloud diye ayrılan bilişim bulut hizmetleri, bilgilerin herkese açık olmasını sağladığı gibi, tersi yönde yalnızca yetkili kişilerin ulaşabildikleri yapıya da sahip olabilmektedir.

Siber güvenlik

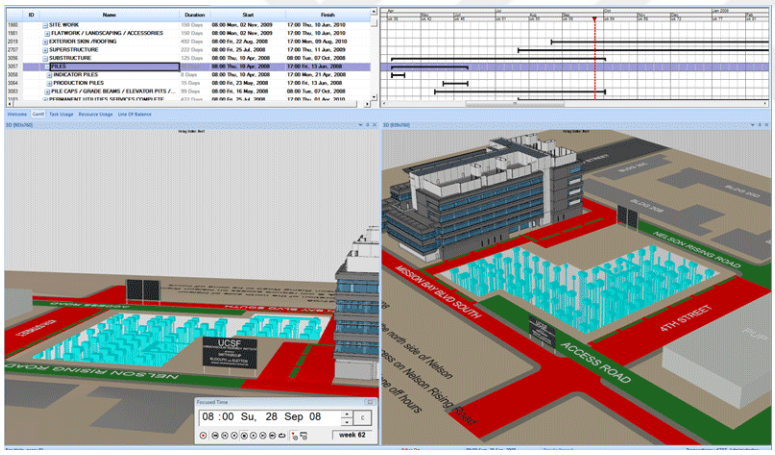
Günümüzde Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) ve diğer Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşmaya devam etmesi, artan cihaz sayıları ve artan ağ bağlantıları bu bağlantılı yapının her geçen gün büyümesine sebep olmaktadır. Bu trendin itici güç ise, başta endüstriyel sistem sahiplerinin verimliliği arttırma isteği olmaktadır.

Resim 2.9. Siber güvenlik (www.kaspersky.com.tr)

Ancak, iletişim verimliliğini arttırmak kolayca ulaşılan, sorunsuz bir süreç değildir. IIoT, siber güvenlik tehditlerinin yol açtığı risklerin dikkate alınmasını zorunlu kılmıştır. Temmuz 2016'da Avrupa Parlamentosu siber saldırılara karşı korunmak için izlenmesi gereken adımları öneren bir yönerge yayımlamıştır. Sistem sahipleri de, endüstriyel uygulamalarda güvenli cihaz ve ağlar kurmalarını sağlayacak siber güvenlik çözümlerine ciddi ihtiyaç olduğu konusunda birleşmişlerdir.

Benzetim (Simülasyon)

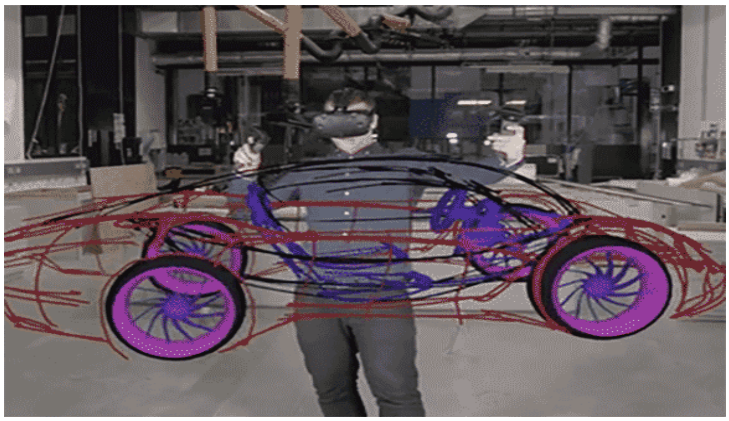
Benzetim, gerçek hayattaki bir sistemin veya tasarlanan bir sürecin çalışmasının bilgisayar ortamında taklit edilmesidir. Benzetim, sistemin yapay geçmişinin üretilmesine ve gerçek sistemin karakteristik özelliklerine dair çıkarımlar yapmak üzere bu geçmişin gözlemlenmesine olanak vermektedir.



Resim 2.10. Siber güvenlik (www.aparee.com)

Sanal gerçeklik

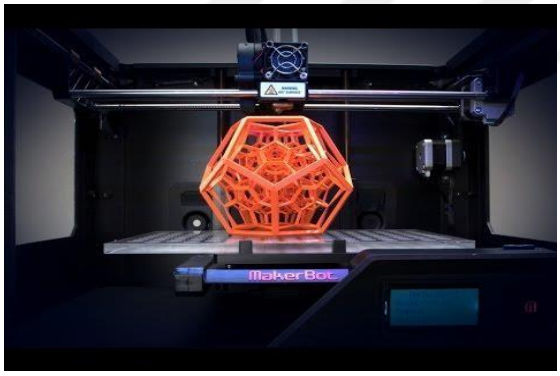
Sanal gerçeklik kullanıcıların tasarlanan ortamda bulunma hissini yaşadığı bilgisayar kaynaklı 3 boyutlu ortamlar için kullanılan bir terimdir. Endüstri 4.0'da benzetim ve sanallaştırma akıllı fabrikaların sanal bir kopyalarının oluşturulmasında, sistemlerden gelen sensör verilerinin sanal tesis ve simülasyon modelleri ile bağlanmasıyla oluşur. Yakın gelecekte bu teknolojilerin özellikle fabrika ve depo mimarisini iyileştirmek ve akıllı envanter yönetimi için kullanılacağı öngörülmektedir.



Resim 2.11. Sanal gerçeklik (www.core77.com)

3D yazıcı teknolojisi

3D yazıcılar sahip oldukları teknoloji ile bireysel kullanıcıların evlerinde tasarladıkları ürünleri üretebilmelerine, üreticilerin ise mevcut üretim teknolojileri ile üretilemeyen veya maliyetli olan ürünleri tasarlayıp üretmesine olanak sağlamaktadır.

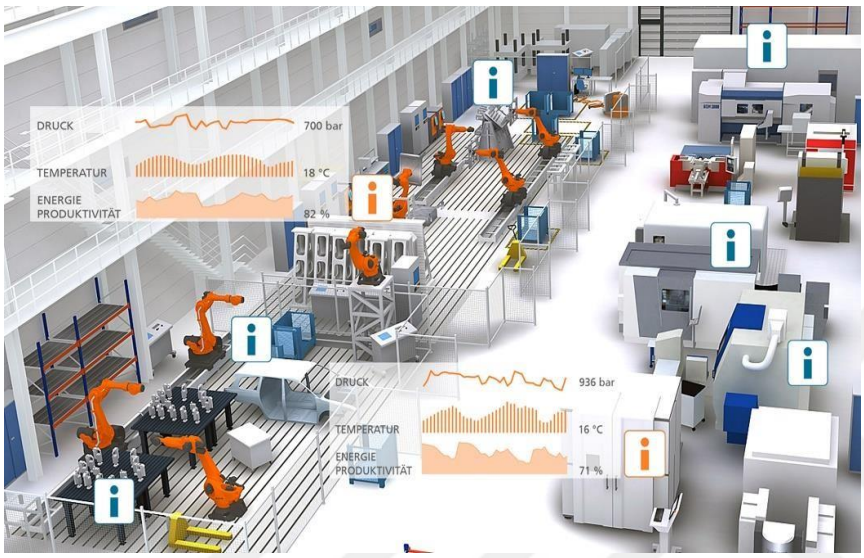


Resim 2.12. 3D yazıcı (www.tecky.eu)

Plasik türevleri, metal, mantar, reçine ahşap gibi birçok farklı maddeyi yapım malzemesi (hammadde) olarak kullanabilen 3D yazıcılar; uzay ve havacılıkta, askeri uygulamalarda, endüstriyel imalat, tıp ve sağlık alanlarında, enerji, mimarlık, makine imalatı, gıda imalatı gibi birçok alanda kullanılabilmektedir.

Akıllı fabrikalar

Akıllı fabrikalar, sahadaki endüstriyel bilgisayarlar vasıtasıyla üretimi tamamen merkezcil bir yapıdan ve aynı zamanda uzaktan kontrol edebilen, bunun yanı sıra kendi yönetimini kendisi gerçekleştirebilen sistemlerin bütünü olarak açıklanabilir.



Resim 2.13. Akıllı fabrika (www.haptic.ro)

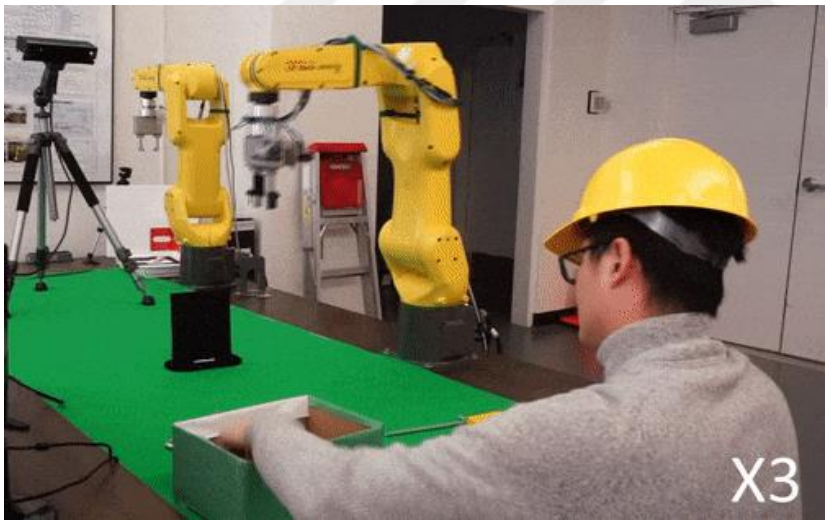
Akıllı fabrikaların geleneksel fabrikalardan en önemli farkı, insan gücü ile gerçekleştirilen manuel operasyonlardaki hataların ortadan kaldırılmasıdır. Ayrıca makineler ve robotlar tarafından gerçekleştirilen otomatik kontroller sayesinde, üretimin her safhasında verimliliği yüksek ve üst seviyede kaliteli ürün üretilmesidir. Günümüzde akıllı fabrikalar hızla geleneksel fabrikaların yerini almaya başlamıştır. Bu yapıyla da daha az insan gücü kullanarak ve çalışma alanlarını küçülterek maliyetleri büyük ölçüde azaltarak, üretim ile birlikte karlılığı arttırarak, müşteri memnuniyetini yüksek kalitede ürün üreterek üst seviyede tutmayı hedeflemektedir.

Robot teknolojileri

Fabrikaların üretim süreçlerinde hayati önemi olan robotlar, sağladıkları hız ve kolaylıklarla her geçen gün sanayide daha çok rol almış ve günümüzde çok olağan bir işgücü haline gelmiştir.

Resim 2.14. Robotlu imalat (www.madlab.cc)

3. sanayi döneminde genelde kısıtlı seviyede insanlarla çalışabilen robotların 4. sanayi döneminde birbirleriyle konuşur hale geleceği ve aynı zamanda insanla birlikte çalışan insansı robotların da ortaya çıkıp yaygınlaşacağı öngörülmektedir.



Resim 2.15. İnsan-robot etkileşimi (www.bair.berkeley.edu)

Endüstri 4.0'da yeni üretim yöntemleri, akıllı süreç optimizasyonları ve yanı sıra daha yüksek makine ulaşılabilirliği ve üretim verimi elde edilebilmek istenmektedir. Akıllı ürünler, veri analiz becerileri, veri-süreç-ürün entegrasyonu ve iyileştirilmiş bir insan-robot etkileşimi ile akıllı fabrika ve tedarik zincirine doğru dönüşümü hedeflemektedir. İnsan-robot etkileşimli sistemlerin akıllı imalat sistemlerinde yerlerini almaya başlamaları ile üstesinden gelinmesi gereken yeni problemlerle yüzyüze kalınacağı öngörülebilir. Örneğin insan-robot ergonomisi, güvenlik, ortak çalışma alanlarının oluşturulması gibi temel

konularda sahaya yansıyabilecek akademik çalışmaların gerekliliği ortaya çıkmıştır. Tez çalışmasında bu başlıklar içerisinde yer alan insan-robot etkileşimli maliyet yönelimli paralel montaj hatları konusu üzerinde durulmuştur.

2.2. Montaj Hattı Dengeleme

Birden çok parçanın daha önceden belirlenmiş bir sıra ile bir ürünün üretilmesi için toplanarak birleştirilmesi sürecine montaj denilmektedir. Farklı bir tanım olarak, üretimi yapılacak ürün veya yarı mamülleri oluşturan hammadde, yarı mamül veya mamüllerin bir üretim sürecinde bir araya getirilerek nihai ürün veya yarı mamülün oluşturulması işlemine montaj denir.

Montaj faaliyetini oluşturan, ürünü meydana çıkaracak görevlerin bir veya birkaçının birlikte yapıldığı iş merkezlerine istasyon ve tüm sisteme de montaj hattı denir. Montaj hattında sıralı şekilde konumlandırılmış istasyonlarda tüm ürünlerin aynı ortak zaman birimi kadar işlem görecek şekilde ürünü oluşturan görevlerin istasyonlarda gruplandırılmasına çalışılır. Böylece montaj hatlarının temel özelliği olan yüksek hızda ve dolayısıyla yüksek hacimde üretim gerçekleştirilmeye çalışılır.

2.2.1. Montaj hatları ve özellikleri

Montaj hattı; istasyon olarak adlandırılan, operasyonları gerçekleştiren üretken birimlerin seri şekilde konumlandırıldığı akış odaklı bir üretim sistemidir. Görev adı verilen ve daha küçük alt parçalara bölünemeyen iş parçaları montaj hatlarında konveyör bandı gibi bir taşıma sistemi ile hat boyunca ilerleyerek istasyonları birbirini ardına ziyaret eder. Her bir iş istasyonunda önceden belirli bir dizi görev, çevrim zamanı dikkate alınarak gerçekleştirilir ve son ürün hattın sonundan elde edilir.
Tüm işlemlerin tek bir iş istasyonunda gerçekleştirildiği geleneksel süreçlerden farklı olarak montaj hatları firmalara yüksek üretkenlik seviyelerini yakalama imkânı sunarlar.

Montaj hatları ürünlerin büyük oranda standartlaştırıldığı ve tüketimin yüksek olduğu endüstrilerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük seviyede standartlaştırılmış ürünleri veya özelleştirilmiş ürünleri küçük miktarlarda üretmek için de kullanılmaktadırlar (Becker ve Scholl, 2006).

Aslında montaj hatları, standartlaştırılmış ürünlerin maliyet etkin kitle üretimi için geliştirilmiş ve yüksek özellikli işgücü ve öğrenme etkilerini kullanmak üzere tasarlanmıştır (Shtub ve Dar-El, 1989; Scholl, 1999). Seri üretimin ilk örneklerinden olan Henry Ford ve T-modeli üretiminden bugüne tüketici ihtiyaçları ve üretim sistemleri büyük oranda değişmiştir. Firmalar birim maliyetlerini en küçükleyen seri üretim uygulamalarını kullanırken çeşitlenmiş müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilmek için de ürünlerinin kişiselleştirilmesine izin vermek zorunda kalmışlardır. Otomatik aparat değiştirmeli çok amaçlı makineler gibi çeşitli teçhizatlarla, kabul edilebilir hazırlık zamanı ve maliyetlerle seçmeli üretim sırasına izin verilerek, firmaların hızlı ve büyük miktarlarda kişiselleştirilmiş ürünleri üretmelerine imkân sağlanabilmiştir. Bu durum verimli akış hattı sistemlerini sipariş üretiminde düşük hacimli montaj için de uygun hale getirmektedir (Mather, 1989) ve kitlesel özelleştirme gibi modern üretim stratejilerini mümkün kılmaktadır (Pine, 1993). Bu da montaj sistemlerinin planlanması ve uygulanması sürecinde pratikle yüksek ilişki içinde olunacağını göstermektedir.

Üretim hızı ve ürünlerin standartlaştırılması montaj hatları için önemli faktörlerdir. Maliyet etkin bir üretim sistemi için montaj hatlarının kurulumu ve/veya yeniden tasarlanmasında kritik yatırım kararlarının verilmesi gerekmektedir. Montaj hattı tasarımı, son ürünü üretecek üretken birimlere dair; makine teçhizat kullanımı, üretim sürecindeki faaliyetlerin sıralanması, montaj görevlerinin, çevrim zamanının ve istasyonların belirlenmesi gibi tüm faaliyet ve kararları içerir.

Montaj hatları yatırım maliyeti ve verimlilik hedefleri doğrultusunda uzun vadeli planlama kapsamında değerlendirilir. Dolayısıyla montaj hatlarının dengelenmesi ve uygun şekilde çalıştırılması sistemin mümkün olduğunca yüksek verimde çalışması için büyük önem arz etmektedir (Becker ve Scholl, 2006). Montaj hattını dengelemede üretkenliği ve verimliliği arttırmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu hedeflere; imalat zamanının azaltılmasıyla ve/veya iş istasyonu sayısının azaltılmasıyla ulaşılabilir.

Montaj hatları; çevrim zamanı, üretim hızı ve çıktı miktarı gibi çeşitli faktörlere göre düzenlenerek istasyonların eş zamanlı çalışması ve taşıyıcı sisteminin eş zamanlı olarak ilerlemesi sağlanabilmektedir. İstasyon zamanlarının aynı c çevrim zamanı değerine sahip olduğu, istasyonların operasyonlarına aynı zamanda başlayıp aynı zamanda bitirdiği montaj hatları, zaman kısıtlı veya düzenlenmiş (paced) montaj hatları olarak adlandırılabilir.

Literatürde montaj hattı olarak anılan üretim sistemlerinin büyük bölümü düzenlenmiş montaj hatları olarak değerlendirilmektedir. Düzenlenmemiş veya zaman kısıtı olmayan hatlar ise iş parçasının hareketine göre iki farklı durumla nitelendirilirler. Gerekli operasyonlar tamamlandıktan sonra iş parçasının bekleme olmaksızın hemen hareket ettiği senkronize hatlarda, iş yükü en fazla olan istasyonların beklenmesi söz konusu olabilmektedir. Senkronize olmayan hatlarda ise bir iş parçasının ilgili operasyonları istasyonda tamamladıktan sonra ve öncesinde montajlanan başka bir iş parçası tarafından engellenmedikçe, diğer istasyonlardan bağımsız olarak hareket ettirilir. Böyle bir durumda ise istasyonlarda darboğaz oluşumu veya boş kalması/açlığı durumları ortaya çıkabilecektir. Tampon stok bölgelerinin kullanılmasıyla bu tıkanma ve açlıklar dengelenmeye çalışılır.

2.2.2. Montaj hattı dengeleme problemi (MHDP)

MHDP bir veya daha fazla sayıda amacın dikkate alınarak montaj işlerinin (bir ürünün üretilebilmesi için yapılması gereken görevler/operasyonlar) eniyileyecek şekilde iş istasyonlarına paylaştırılması kararıdır.

Literatürde MHD terimi altında karar vericinin verimli montaj sistemleri tasarlamasını desteklemeyi amaçlayan birçok eniyileme modeli geliştirilmiş ve tartışılmıştır. Salveson (1955) tarafından MHD probleminin ilk matematiksel formülasyonundan beri akademik çalışmalar genelde görevlerin istasyonlara atanması problemi olan konfigürasyon temel problemine odaklanmıştır. Ancak sonraki çalışmalar problemi U-tipi hatlar, paralel istasyonlar veya işlem alternatifleri gibi pratikle ilgili sınırları entegre ederek daha da genelleştirmeye çalışmışlardır (Becker ve Scholl, 2006).

Tüm bu çabalara rağmen konfigürasyon planlaması probleminin matematiksel bir algoritma ile çözüm yaklaşımı, çok az sayıdaki firma tarafından kullanılmaktadır. 1970'li yıllardan günümüze kadar (Chase, 1974; Schöniger ve Spingler, 1989) yapılan ampirik çalışmalardan hareketle, bilimsel tartışmalar ve pratik uygulamalar arasında önemli bir uçurum olduğu söylenebilir. MHD algoritmaları ile ilgili daha güncel bilimsel çalışmaların gerçek dünya uygulamalarındaki eksikliği, bu farkın hâlâ var olduğunu veya daha da genişlediğini göstermektedir. Teorik ve pratik arasındaki bu farklılığın sebepleri olarak (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007);

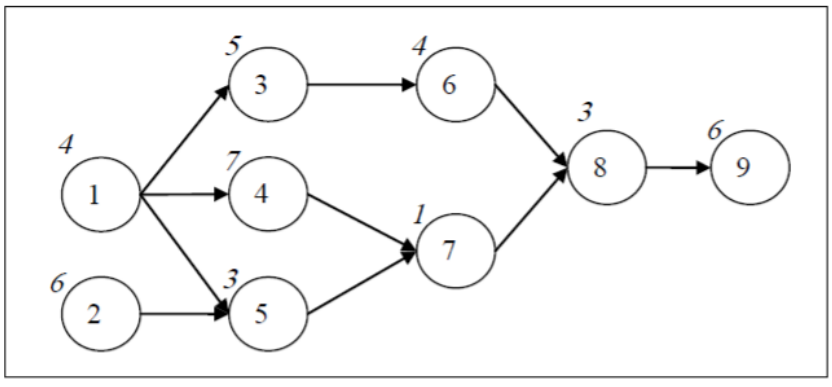
- Araştırmacıların uygulamada karşılaşılan gerçek problemleri ele almaması,
- Dikkate alınan problemlerin tatmin edici şekilde çözülememesi,
- Elde edilen bilimsel bilginin genel pratik uygulamaya dönüştürülememesi gösterilebilir.

Bu sorunların ortaya çıkmasının temel nedenleri ise çok çeşitli sayıdaki MHD problemleri için ortak bir dil ve tanımlamanın kullanılmamasının yanı sıra araştırmalardan elde edilen bilginin pratik uygulamalara transfer edilememesi olarak özetlenebilir (Becker ve Scholl, 2006).

Montaj hatlarında üretimin gerçekleştirilebilmesi için gerekli faaliyetler, daha küçük alt birimlere bölünemeyen, görev adı verilen temel operasyonlara indirgenirler.

Bir j (j=1,2,…,n) görevinin gerçekleştirilebilmesi t_j görev zamanını ve belirli bir makine/teçhizat ve/veya işgücünü gerektirir (Becker ve Scholl, 2006).

Teknolojik ve organizasyonel koşullardan dolayı görevler arasında öncelik ilişkileri söz konusudur. Şekil 2.1'deki öncelik ilişkileri grafiğinde bir montaj hattını oluşturan görevler düğümlerle, görevlerin süreleri düğümler üzerindeki ağırlıklarla ve görevler arasındaki öncelik ilişkileri de oklarla gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Montaj hattında üretilecek bir ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramı

Montaj hatlarının verimli bir şekilde çalışması için hattın dengelenmesi şarttır. Montaj hattının dengelenmesi; öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı gibi kısıtlar dikkate alınarak montaj hattında gerçekleştirilecek görevlerin istasyonlara atanmasıdır. k istasyon numarasını ($k=1, ..., m$)göstermek üzere, k istasyonuna atanan görevler kümesi $S_k=\{1, \ldots, n_k\}$olarak

gösterilebilir ve bu istasyona atanan görevlerin zamanları toplamı istasyon zamanı olarak adlandırılır (Eş. 2.1).

$$t(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j \tag{2.1}$$

Montaj hatlarında, istasyon zamanı, *çevrim zamanı (c)* ile sınırlandırılmıştır. Çevrim zamanı, hattın sonundan çıkan ardışık iki ürünün üretim zamanları arasındaki zaman farkını (her bir ürün alındığında geçen zaman) gösterir ve en büyük zamanlı görevin süresinden daha küçük olamaz (Eş. 2.2). İstasyon zamanının çevrim zamanından küçük olduğu durumlarda istasyon boş zamanı oluşur ve her bir çevrimde $c–t(S_k)$ kadar zamanın kullanılmadığını gösterir.

$$c \geq (t_{\max} = \max(t_j / j = 1,...,n)) \tag{2.2}$$

Montaj hattı tasarlanırken hattın dengeleme kriteri olarak firmanın stratejik hedeflerine yönelik amaçlar dikkate alınmalıdır. İşletmelerin temel amaçlarından olan maliyet ve kârın tahmin edilmesini esas alan amaçlar uzun dönemli planlama şartlarında zorlaşmakta ve hataya açık hale gelmektedir. Bütün bunların yerine kullanılabilecek, hat kullanımının enbüyüklemesini amaçlayan hat verimliliği/dengesi (*E*) ise daha genel bir amaç olarak kullanılabilmektedir (Eş. 2.3). Temel olarak hat verimliliği; görevlerin toplam zamanının, toplam istasyonlar zamanına (istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı) oranı olarak tanımlanır (Becker ve Scholl, 2006).

$$E = \sum t_j /(m*c) \tag{2.3}$$

Şekil 2.1'de gösterilen montaj hattı örneğinde *c=10* ve *m=4* için eniyi istasyon atamalarından birisi S_1={1,2}, S_2={4,5}, S_3={3,6}, S_4={7,8,9} olarak bulunmuştur. Böylece hattın dengesi E=39/(4x10)= 0,975 (%97,5) olarak hesaplanmıştır.

Verilen örnek montaj hattı çözümünde; 1, 2 ve 4. istasyonlarda boş zaman bulunmazken 3. istasyonda 10–(4+5)=1 birim boş zaman bulunmaktadır.

2.2.3. Basit MHDP (BMHDP)

Genel anlamdaki MHD probleminin temelini BMHD karar problemi oluşturur. BMHDP içerdiği kısıtlamalardan dolayı gerçek dünya problemlerinin karmaşıklığını yansıtmaktan uzak olsa da montaj hatlarının temel özelliklerini dikkate almasından dolayı temel problem olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Nitekim daha az sayıda kısıt içeren daha genel problemlerin birçoğu BMHDP'nin bir tür genelleştirmesi olmakta veya karar probleminin bir aşamasında problemin BMHDP olarak çözümüne ihtiyaç duyulabilmektedir (Scholl ve Becker, 2006). MHD konusunda yapılan araştırmaların çoğu BMHDP'ni modellemeye ve çözmeye yöneliktir. BMHDP'nin temel özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Baybars, 1986; Scholl, 1999; Scholl ve Becker, 2006):

- Tek bir ürünün kitle üretimi,
- Önceden bilinen üretim süreci,
- Deterministik görev zamanları (t_j),
- Önceden belirlenmiş sabit bir c çevrim zamanı,
- Görevlerin sırasını belirleyen öncelik ilişkileri kısıtlarından başka atama kısıtının bulunmaması,
- Bir görevin birden fazla istasyon arasında paylaştırılamaması (görevlerin bölünemezliği),
- Tek yönde m istasyonlu seri hat yerleşim düzeni,
- Tüm istasyonların makine ve çalışanlar açısından eşit şekilde donatılması, öncelik ilişkilerine bağlı olarak herhangi bir görevin herhangi bir istasyonda gerçekleştirilebilmesi,
- Hat verimliliğinin enbüyüklenmesi (enb E) amaçlanır.

BMHDP'nin yukarıda açıklanan özellikleri, problemi gerçek dünya uygulamalarından oldukça uzaklaştırmaktadır. Örneğin, üretim sürecinin sabit ve önceden biliniyor olması ile istasyonların eşit şekilde donatılması varsayımları; bir görevin farklı kaynaklarla gerçekleştirilebilmesini, daha güçlü ve hızlı makineler kullanılarak görevlerin daha çabuk gerçekleştirilmesini ve dolayısıyla üretim hızının artmasını engelleyen bir varsayımdır. Diğer taraftan, daha güçlü ve hızlı makineler kullanılması ise makine ve teçhizat satın alma maliyetlerinin yükselmesine neden olacaktır. Zaman ve maliyet arasındaki karşılıklı çelişki durumu, BMHDP'nin dengeleme kararını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu gibi faktörleri

dikkate almadan, verilen varsayımların kabulü durumunda ise işçi, makine, malzeme gibi kaynakların detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gereksiz hale gelmekte ve karar problemi sadece görevlerin istasyonlara atanması problemine dönüşmektedir. Aksi durumda ise kullanılacak kaynakların istasyonlara atanması karar probleminin, hat dengeleme problemine dahil edilmesi gerekecektir (Boysen ve diğerleri, 2007).

Amaçları açısından BMHDP'nin çeşitli versiyonları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Baybars, 1986; Scholl, 1999);

- BMHD-1 (TİP1) problemi verilen çevrim zamanında istasyon sayısının enküçüklenmesinin amaçlandığı problem türüdür.
- BMHD-2 (TİP1) problemi verilen istasyon sayında çevrim zamanının enküçüklendiği (üretim oranını enbüyüklenmesi için) BMHD problemidir.
- BMHD-E (TİP3) problemi ise çevrim zamanı ve istasyon sayısının eş zamanlı olarak enküçüklendiği problem türüdür.

BMHD-F problemi, verilen *m* istasyon sayısı ve *c* çevrim zamanı için uygun bir çözüm arar. Bu temel problemler için mevcut çözüm süreçleri en güncel haliyle Scholl ve Becker (2006) tarafından özetlenmiştir. (Baybars, 1986; Shtub ve Dar-El, 1989; Ghosh ve Gagnon, 1989; Erel ve Sarin, 1998; Scholl, 1999; Rekiek, Dolgui, Delchambre, 2002).

Çizelge 2.1. BMHDP türleri

		c - çevrim zamanı	
		Biliniyor	Amaç En Küçüklemek
M istasyon sayısı	Biliniyor	BMHD-F	BMHD-2
	Amaç En Küçüklemek	BMHD-1	BMHD-E

BMHDP'de ikincil bir amaç olarak istasyon yüklerinin (zamanlarının) düzgünleştirilmesi (eşit dağıtımı, yatay dengeleme) (Merengo, Nava, Pozetti, 1999) amacının kullanımı, problemin diğer türlerine ulaşılmasını sağlar. Eş. 2.4 ile hesaplanan düzgünleştirme (düzgünlük) indeksinin (*SI*) enküçüklenmesi ile *m* istasyon sayısı ve *c* çevrim zamanı ikilisinden oluşan (*m*, *c*) kombinasyonunun hat verimliliği açısından eniyi değere ulaşacağı öngörülmektedir (Moodie ve Young, 1965; Rachamadugu ve Talbot, 1991).

$$SI = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} (c - t(Sk)^2)} \quad (2.4)$$

BMHDP'nin NP-Zor yapıda bir eniyileme problemi olduğu, Karp (1972) tarafından ispatlanmıştır. BMHD-F problemi NP-Tam uygunluğunda olduğundan, BMHD probleminin eniyileme biçimleri NP-Zor problem sınıfındadır (Wee ve Magazine, 1982; Scholl, 1999). Dolayısıyla problemin ilgili tüm genelleştirilmiş varyasyonları aynı özelliklere sahiptir.

2.2.4. Genelleştirilmiş MHDP (GMHDP)

BMHDP'nin bazı varsayımlarının değiştirilmesi ve genişletilmesiyle elde edilecek GMHDP genel özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir (Boysen ve diğerleri, 2007):

- Üretimi yapılacak bir veya daha fazla sayıdaki ürünler tümüyle bilinmektedir
- İşlem alternatifleri önceden bilinmektedir
- Hattın akış yönü ileri ve geri yönde çift yönlüdür
- Görevlerin işlem sıraları öncelik ilişkilerine bağlıdır
- Belirli bir planlama dönemi için üretim miktarı hedefi karşılanacak şekilde hat düzenlenmiştir.

BMHDP'nin temel varsayımı olan tek bir ürünün üretilmesi varsayımının esnetilmesiyle çok modelli ve/veya karma modelli MHDP elde edilir. Ayrıca, belirli bir görev grubunun aynı istasyona atanmasını engelleyen alan kısıtları ve benzer şekilde belirli bazı görevlerin birlikte aynı istasyonda gerçekleştirilmesi gerekliliğini belirten görev birliktelik kısıtları da probleme yeni ve farklı kısıtlar ekleyen diğer varsayımlardır.

Paralel istasyonlar, pozisyona bağlı kısıtlamalar ve tampon stok alanları kullanımı gibi alternatif süreçler de BMHDP'ni genişleten diğer faktörlerdir. Besleme hatları, transfer hatları ve geri dönüşlü hatlar ise hattın akış yönünün tek yanlı olması varsayımını değiştiren diğer uygulamalardır.

BMHDP, gerçek dünya problemleriyle küçük miktarda benzerlik gösteren basitleştirilmiş bir modeldir. Bu yüzden daha gerçekçi özellikler (çoklu veya karışık modelli hatlar, aparat seçme problemleri, paralel istasyonlar, U-tipi hatlar, stokastik zamanlar vb.) içeren ve

BMHDP modelinin kısıtlamalarının üstesinden gelen GMHDP konusunda çalışmalar artmaktadır.

GMHDP modelinde yaygın olarak kullanılan amaç, montaj hattı maliyetinin enküçüklenmesi ve kârın enbüyüklenmesidir. Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1983) çalışmasında görevlerin istasyona atanmasında süreç alternatiflerinin dikkate alınarak sabit maliyetlerin ve işçilik maliyetlerinin en küçüklenmesine çalışmışlardır. Amen'in (2000b; 2006) çalışmalarında MHD problemlerindeki maliyetler detaylı bir şekilde tartışılmıştır. GMHDP ile ilgili literatür ise Becker ve Scholl (2006) tarafından özetlenmiştir.

2.2.5. MHDP'nin diğer eniyileme problemleri içerisindeki yeri

Çok çeşitli türdeki MHDP'nin temelini oluşturan BMHDP, sıralama ve çizelgeleme genel problem sınıfında yer almaktadır (Baker, 1974). Sıralama ve çizelgeleme problemleri arasındaki temel fark, çizelgeleme sürecinin bir zaman ölçeğinde gerçekleştirilmesidir. Dolayısıyla sıralama problemleri de bir tür çizelgeleme problemi olarak değerlendirilebilir ve zaman ölçeği olmasa da görevler arasındaki öncelik ilişkileri ile karmaşık bir çizelgeleme problemi haline gelebilmektedir. Bu türdeki problemlere en güzel örneklerden birisi tek makineli çizelgeleme problemidir.

Örneğin, BMHDP'deki öncelik ilişkileri kısıtları yerine, her bir görevin hemen önceki öncül görevi mümkün olan en erken istasyona atanması şartı getirilirse, problem tek kaynak kısıtlı çizelgeleme problemi haline gelecektir (Baybars, 1986).

BMHDP olarak değerlendirilebilecek diğer bir problem sınıfı da Kutu Paketleme (Bin Packing) problemidir. Verilen sınırlı sayıdaki parçanın (görevin), her biri belirli kapasiteye sahip enküçük sayıdaki kutuya atanması problemi olan Kutu Paketleme problemi, öncelik ilişkileri olmayan BMHDP olarak değerlendirilebilmektedir.

Birçok bilimsel araştırmada ele alınan kutu paketleme problemi, üst sezgisel (hyper heuristics) alanında yapılan çalışmaların da ilk uygulama alanlarından olmuştur. Kutu paketleme problemiyle ve dolayısıyla BMHDP ile benzer özelliklere sahip ve literatürde çok iyi bilinen bir diğer problem sınıfı ise tek bir kutu ve paketlenecek belirli boyutlardaki parçaların belirli bir amacı en iyileyecek şekilde seçilmesi problemi olan Sırt Çantası

(Knapsack) problemidir. Bu problem türlerine ilave olarak, verilen belirli sayıdaki parçaların belirli bir amaca göre gruplandırılması/bölümlendirilmesi problemi de BMHDP ile büyük benzerlikler taşımaktadır.

Yukarıda açıklanan problem sınıflarının birbirleriyle olan benzerlikleri nedeniyle, bir problemin çözümünde kullanılabilen bir çözüm yaklaşımının diğer problemlerin de çözümünde veya çözümünün bir parçası olarak kullanılması mümkün olabilmektedir.

2.2.6. MHDP'nin sınıflandırılması

Literatürde montaj hatlarının; paralel iş istasyonları ve görevler, maliyetler, operasyon alternatifleri, bölgesel kısıtlamalar, stokastik ve sıraya bağlı operasyon zamanları ve u-tipi montaj hatları gibi çok sayıda farklı yönü ele alınmıştır. Montaj hatları ile ilgili güncel bilgiler ve montaj hatlarının sınıflandırması ile ilgili detaylı bilgiler Becker ve Scholl (2006) ile Boysen ve diğerleri (2007) çalışmalarında bulunabilir. Çizelge 2.2'de montaj türleri; model sayısına, hattın kontrolüne, yapılan işin sıklığına, otomasyon seviyesine ve yapılan işe göre sınıflandırılmıştır. Yine Çizelge 2.3'de benzer bir sınıflandırma görülmektedir.

Çizelge 2.2. Montaj hatlarının sınıflandırılması 1

Montaj Hatları Sınıflandırma Kriteri				
Model Sayısı	Hat Kontrolü	İşin Sıklığı	Otomasyon Seviyesi	İş Türü
Tek Model	Sabit Hızlı	İlk Defa Montajlama	Manuel Hatlar	Otomobil Üretimi
Karışık Model	Değişken Hızlı Eşzamansız	Yeniden Montajlama	Otonom Hatlar	Diğer Örnekler
Çoklu Model	Değişken Hızlı Eşzamanlı			

Çizelge 2.3. Montaj hatlarının sınıflandırılması 2

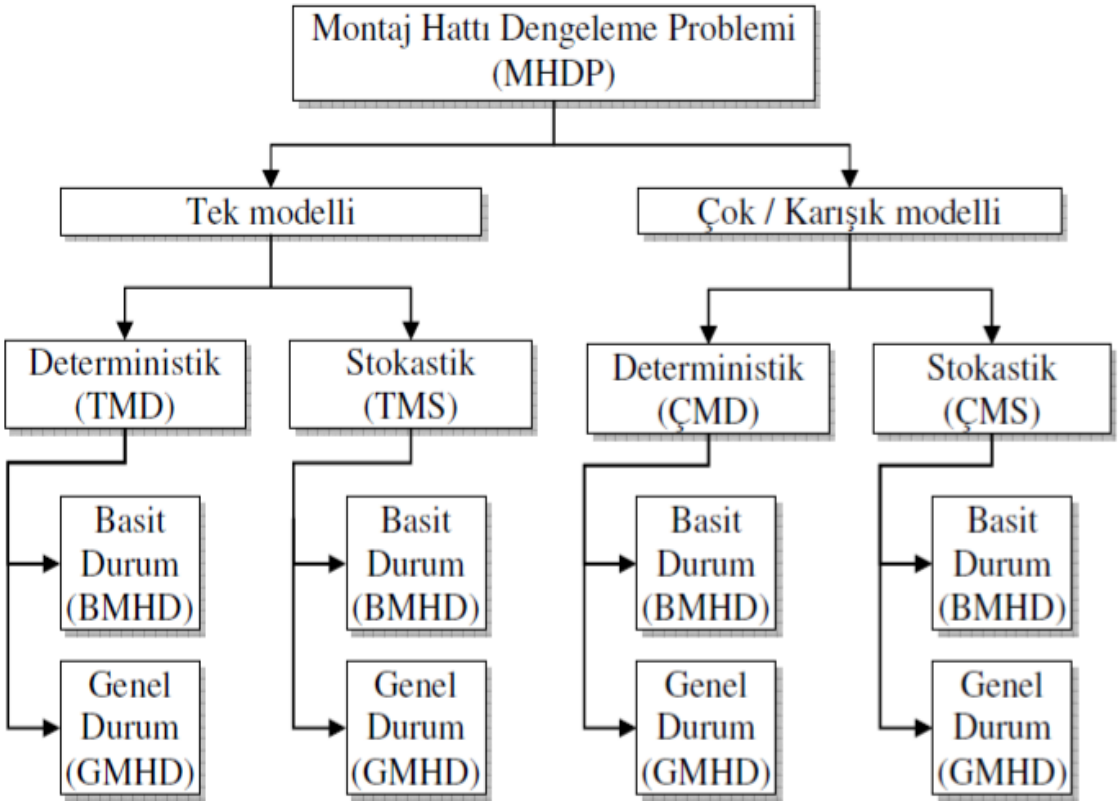
Sınıflandırma Faktörleri	Hat Çeşitleri		
Model Sayısına Göre	Tek Modelli	Karışık Modelli	Çok Modelli
Kontrol Yapısına Göre	Gecikmeli	Gecikmesiz	
Otomasyon Seviyesine Göre	Manuel	Otomatik	
Yerleşim Şekline Göre	Düz	U-Tipi	Paralel

MHD konusunun yapılandırılmasına yönelik güncel bir girişim de Boysen ve diğerleri (2007) tarafından önerilen sınıflandırma şemasıdır. Bu şema makine çizelgeleme için kullanılan [α | β | γ] üçlü notasyonunun MHD'ye bir uyarlamasıdır. Belirli bir montaj sistemi ilgili tüm uzantıları ile birlikte üçlü olarak karakterize edilebilir.

Bu üçlü gösterimin birinci parametresi olan α öncelik ilişkileri grafiğine bağlı özellikleri işaret etmektedir. Öncelik ilişkileri grafiği ile belirlenen özellikler; ürüne bağlı öncelik grafikleri (tek model, çok model, karma model), öncelik ilişkileri grafiğinin yapısı (doğrusal, yayılımlı, yakınsayan, ıraksayan, döngüsel ve döngüsel olmayan), görev zamanlarının türü (deterministik, stokastik ve dinamik değişen görev zamanları), sıralamaya bağlı görev zamanı artışları (görev zamanlarındaki ardışık direkt ilişkilerden kaynaklanan artışlar, dolaylı ilişkilerden kaynaklanan artışlar, sıralamadan bağımsız görev zamanları), atama kısıtları (bazı görevlerin aynı istasyona atanması/atanmaması, belirli görevlerin belirli istasyonlara atanması/atanmaması, bazı görevler arasındaki mesafenin enk/enb olması, hiçbir atama kısıtının bulunmaması) ve üretim süreci alternatiflerine göre (öncelik ilişkileri arasındaki alternatifler, görev zamanları arasındaki alternatifler, süreç maliyetleri arasındaki alternatifler) 6 farklı kriter açısından değerlendirilmiştir.

İkinci parametre olan β istasyon ve hat özelliklerini işaret etmektedir. İstasyon ve hat özellikleri ile ilgili 6 kriter; iş parçasının hareketi, hattın yerleşim düzeni, paralellik durumu (hat, görev veya istasyon açısından), kaynakların kullanım ve ataması, istasyona bağlı zaman artışları ve hat konfigürasyonunun diğer özellikleri (tampon bölgeler, besleyici hatlar ve hat yönünün değişimi) olarak değerlendirilmiştir.

Üçüncü ve son parametre olan γ parametresi MHD probleminin çözümü esnasında ulaşılmak istenen amaçlarla ilgilidir. MHD problemlerinde sıklıkla kullanılan amaçlar; istasyon sayısının enküçüklenmesi (enk *m)*, çevrim zamanının enküçüklenmesi *(*enk *c)*, hat dengesinin enbüyüklenmesi *(*enb *E)*, maliyet fonksiyonunun enküçüklenmesi *(*enk *Co)*, kâr fonksiyonunun enbüyüklenmesi *(*enb *Pr)* ve istasyon yüklerinin düzgünleştirilmesi olarak nitelendirilebilir. Çok amaçlı eniyilenmesi durumunda ise bu tek amaçlardan kullanılacak olanlar seçilerek bir küme oluşturulabilir.



Şekil 2.2. MHDP'nin sınıflandırılması (Ghosh ve Gagnon, 1989)

Kaynaklardaki bir başka sınıflandırmaya göre, MHD problemleri, 4 gruba ayrılır: Tek Modelli Deterministik (TMD), Tek Modelli Stokastik (TMS), Çok/Karışık Modelli Deterministik (ÇMD), Çok/Karışık Modelli Stokastik (ÇMS) dengeleme problemleri (Ghosh ve Gagnon, 1989). MHD problemlerinin sınıflandırılması Şekil 2.2'de verilmiştir.

Amaçları açısından MHDP

BMHDP varsayımları altında MHD'de amaç, üretim hızını veya çıktı miktarını arttırmaya yarayan çevrim zamanının veya istasyon sayısının en küçüklenmesi olarak belirlenmektedir.

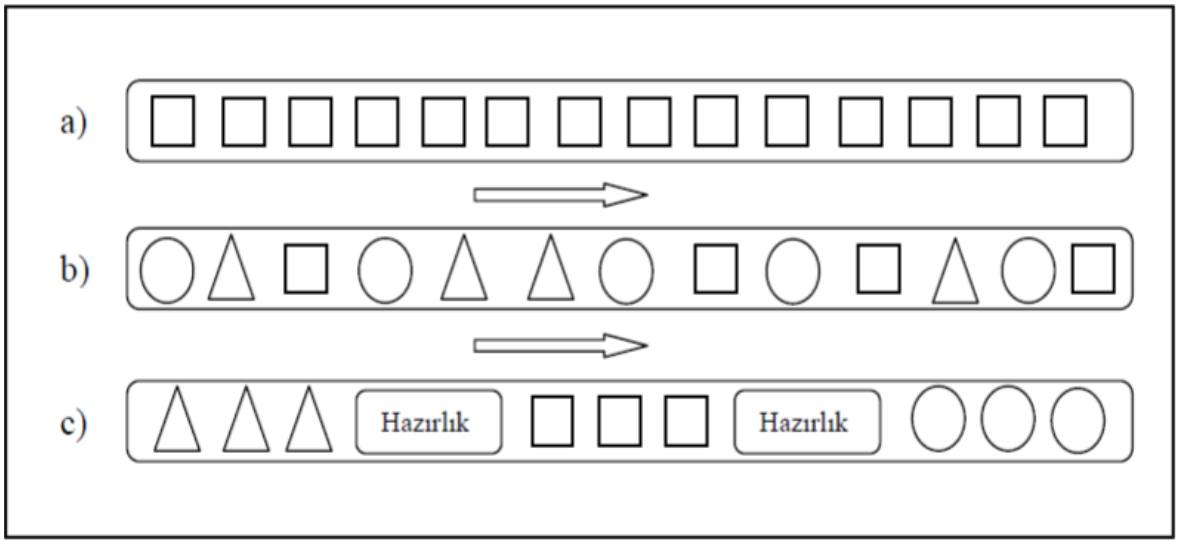
Ancak MHDP için genel bir amaç tanımlanacak olursa, sadece çıktı miktarını arttıran çevrim zamanı veya istasyon sayısının değil aynı zamanda tüm süreci etkileyen faktörlerin de dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Özellikle de montaj hatlarının seri üretimin önemli bir aracı olması, üretim hedeflerinin yanında maliyet faktörlerini de hatırlatmaktadır. MHD problemlerini amaçları açısından, maliyet odaklı ve kâr odaklı olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Maliyet odaklı modellerde; bir istasyonun çalıştırılmasıyla, ilgili istasyonda gerçekleştirilen farklı ücret oranlarına sahip görevlerden en büyük ücret oranına sahip olan görevin ücretinin, istasyonun işletme maliyeti olduğu varsayılır. Bu varsayımın temelinde, istasyona atanan en kritik görevin operatörlerin taşıması gereken yeterlilik seviyesini belirlemesi yatmaktadır. Burada amaç, tüm istasyonlardaki toplam ücret oranının enküçüklenmesidir (Rosenberg ve Ziegler, 1992). Belirlenen bu ücret oranının çevrim zamanı ile çarpılmasıyla ürün başına üretim maliyetleri elde edilir. Eğer tüm görevler aynı ücret oranına sahipse değerlendirilecek amaç istasyon sayısının enküçüklenmesi haline dönüşür. Sonuçta problem BMHD-1 modelinin direkt olarak genelleştirilmesidir.

Kâr odaklı modellerde, maliyet ve kâr kavramları birbiri yerine kullanılabilen araçlar olarak değerlendirilmektedir. Bilinen maliyetleri dikkate alan ve bu maliyetin belirli bir oranının üzerindeki kabul edilebilecek değerler, kâr için bir ölçüt olabilmektedir.

Model (ürün) sayısı ve türüne göre montaj hatları

Tek bir ürünün montajının yapıldığı tek modelli hatlardan başka birden fazla ürünün karışık şekilde üretildiği montaj hatları da söz konusudur. Birimlerin karışık olarak üretilmesinde iki çeşit montaj hattı ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.3). Karma modelli hatlarda, farklı modellere ait birimler önceden belirlenmiş karma bir sıralamada montaj hattı üzerinde işlem görürler (Bukchin, Dar-El, Rubinovitz, 2002). Çok modelli hatlarda ise her biri sadece bir model veya benzer modeller grubunun birimlerini içeren, aralarda hazırlık işlemleri olan partiler sırasında üretim yapılır.



Şekil 2.3. Ürün sayısı ve türüne göre montaj hatları

Tek modelli MHDP

Tek modelli montaj hatlarında tüm iş parçaları benzersizdir ve ilgili ürünün üretiminde görev alırlar. Geleneksel formunda montaj hatları tek bir ürünün büyük hacimli üretiminde kullanılmıştır. Günümüzde, yeterli çeşidi olmayan ürünler, montaj sisteminin kârlı bir kullanımını sağlayabilecek şekilde nadiren yeterli talebe sahip olabilmektedir. İleri üretim teknolojileri, kabul edilebilir hazırlık zamanları ve maliyetler ile hazırlık operasyonlarını mümkün kılmaktadır. Böylece aynı hatta birden fazla ürün montaj edilirken, montaj sistemi tek modelli bir hat olarak ele alınabilmekte ve hazırlık zamanlarının göz ardı edilebileceği kabul edilmektedir (Boysen ve diğerleri, 2007). Tek modelli üretim ve BMHDP ile ilgili çalışmalar Scholl ve Becker (2006) ile Becker ve Scholl (2006) tarafından özetlenmiştir.

Karma modelli MHDP

Karma modelli montaj hatları, standartlaştırılmış bir ürünün çeşitli modellerini karışık bir sırada üretir. Karma modelli üretimde tüm modellerin aynı temel ürünün varyasyonları olduğu varsayılır ve sadece opsiyonlar olarak isimlendirilebilen spesifik ürün özelliklerinin farklılaştığı kabul edilir. Nispeten farklı özelliklere sahip bu modellerin hazırlık zamanlarının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayılır.

Modeller; boyut, renk, kullanılan malzeme veya teçhizat, gerektirdiği farklı görevler, görev zamanları ve öncelik ilişkileri gibi faktörlere bağlı olarak kendi aralarında farklılık

gösterebilir. Örneğin, otomobil üretiminde manuel cam kaldırma mekanizması ile elektrikli cam kaldırma mekanizmasının montaj zamanları farklılık gösterecektir. Bu şekilde daha büyük görev zamanı gerektiren modeller ardı ardına işlem görecek olursa çevrim zamanının aşılması ve dolayısıyla hattın durması, fazladan işçi kullanımı, fazladan işlem ihtiyacı gibi faaliyetler ve maliyet unsurları söz konusu olabilecektir (Wild, 1972; Boysen, Fliedner ve Scholl, 2008).

Öte yandan yüksek görev zamanlı görevler ve daha düşük görev zamanlı işlemlerin sırasıyla işlem görebileceği bir üretim sırası bulunabilirse istasyonların aşırı yüklenmesi engellenebilecektir. Böylece hat dengeleme probleminden başka *sıralama* problemi de ortaya çıkmaktadır (Yano ve Bolat, 1989; Sumichrast ve Russell, 1990; Sumichrast, Russell ve Taylor, 1992; Bard, Dar-El, Shtub, 1992; Merengo ve diğerleri, 1999; Tsai, 1995). Görev zamanlarındaki bu farklılıklar hattın verimliliği için modellerin sıralamasının önemini arttırmaktadır.

Model ne olursa olsun iş yüklerinin, aynı istasyon zamanını ve teçhizatı gerektirdiği bir hat dengesi bulmak oldukça zordur. Bu yüzden montaj hattı, yerel çevrim zamanı kısıtlamaları açısından olduğu kadar operatörün özellikleri ve teçhizat açısından da yeterince esnek olmalıdır. Ayrıca tek modelli montaj hattı durumundan farklı olarak çevrim zamanı, her bir istasyondaki görevlerin en büyük görev zamanına göre değil ortalama zaman (istenilen üretim oranına bağlı olarak tanımlanan) açısından değerlendirilmektedir. Farklı modellerin istasyon zamanlarının her bir istasyon için düzgünleştirilmeye (yatay dengeleme) çalışılmasından dolayı, karma modelli dengeleme problemi BMHDP'den daha zor bir problemdir (Merengo ve diğerleri, 1999).

Karma modelli MHDP'nin modellenmesi ve çözümü için iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Birincisi; problemin tek modelli MHDP'ne indirgenmesi, ikincisi ise karma model kapsamındaki sıralama problemine yatay dengelemeyle çözüm aranmasıdır.
Karma modelli problemin tek modele indirgenmesi için birleştirilmiş öncelik diyagramı kullanılır (Thomopoulos, 1970; Macaskill, 1972; Van Zante-de Fokert ve de Kok, 1997). Burada belirli modellerdeki çeşitli görev zamanlarının ortalaması, tahmin edilen model karışımında görevlerin ayrı ayrı ortaya çıkmasına bağlıdır ve tek bir öncelik grafiği oluşturmak üzere birleştirilir. Eğer öncelik ilişkileri modeller arasında farklıysa bu süreç

düğümlerin gerekli sayıda tekrarlanmasıyla (aynı görev için birden fazla düğümün oluşturulması) çözülebilecek çatışmalara neden olabilir (Ahmadi ve Wurgaft, 1994).

Birleştirilmiş öncelik diyagramının kullanılması, farklı modellerde gerçekleştirilecek benzer görevlerin her zaman aynı istasyona atanmasını gerektirir. Bu düşüncenin gerekçesi ise benzer görevlerin genellikle belirli kaynakları gerektirmesidir. Aksi takdirde aynı hat üzerindeki farklı istasyonlarda gerçekleştirilecek aynı görevler için aynı kaynakların satın alınması ve kurulmasına ihtiyaç duyulacaktır (Thomopoulos, 1967; Boysen ve diğerleri, 2008).

Karma modelli sıralama problemi, kısa dönemli planlamada verilen üretim programındaki tüm modellerin taleplerini karşılayacak şekilde bazı amaçları eniyileyen model birimlerinin sıralamasının bulunması olarak tanımlanabilir. Ortaya çıkan sıralama problemi için tüm modellerde istasyonların iş yüklerini eşit olarak dengelemeye çalışan yatay dengeleme amacı kullanılır (Scholl, 1999). Yatay dengelemede tüm modeller için istasyon zamanlarındaki varyansın en küçüklenmesi (Merengo ve diğerleri, 1999) yanında farklı amaçlar da kullanılabilir (Scholl, 1999; Matanachai ve Yano, 2001).

Dengeleme ve sıralama problemleri önemli ölçüde birbiriyle bağlantılıdır. Hat dengesi, görevlerin istasyonlara atanmasını ve dolayısıyla her bir istasyonun ve modelin iş yükünü belirlerken; verilen model karışımının üretim sıralaması istasyonların aşırı yüklemesini enküçükleyecek şekilde ayarlanmaya çalışılır. Ulaşılan hat dengesi için aşırı yüklemenin miktarı başlı başına bir verimlilik ölçüsüdür. Bu yüzden bazı araştırmacılar bu her iki planlama probleminin eş zamanlı değerlendirilmesini tercih etmektedirler (McMullen ve Frazier, 1998; Kim, Kim, Kim, 2000b; 2000c; 2006).

Çok modelli montaj hatları

Çok modelli montaj hatlarında farklı ürünler partiler halinde üretilirler. Her bir parti sonunda farklı modele geçerken hazırlık zamanı ihtiyacı ortaya çıkar. Dolayısıyla çok modelli MHDP sadece sıralama problemiyle değil aynı zamanda Parti Büyüklüğü Belirleme problemi ile de bağlantılıdır (Burns ve Daganzo, 1987; Dobson ve Yano, 1994). Sıralama ve parti büyüklüğü belirleme problemlerinin her ikisi de kısa dönemli planlama problemi olarak ele alınabilecek karar problemleridir.

Çok modelli montaj hatları esasen karma modelli montaj hatlarıyla birlikte değerlendirilmesine karşın bunlar arasında dikkate değer farklılıklar da bulunmaktadır. Bu farklılıkların başında, karma modelli montaj hatlarında üretilen ürünlerin parti büyüklüğünün bir birim olması gelmektedir. Ayrıca bu tek birimler arasındaki hazırlık zamanları ihmal edilebilirdir. Çok modelli montaj hatlarında ise üretilen ürünlerin parti büyüklüğü oldukça büyüktür ve bu partiler arasındaki hazırlık zamanları göz ardı edilemeyecek kadar önemli bir maliyet unsurudur. Diğer bir farklılık ise karma modelli üretimde çoğu zaman istasyon boş zamanının en küçüklenmesine çalışılırken, çok modelli hatlarda amaç değişim ve hazırlık zamanlarını da dikkate alan bir maliyet fonksiyonunun en küçüklenmesidir (Buxey, Slack ve Wild, 1973; Fokkert ve Kok, 1995).

Çok modelli montaj hatlarının dengelenmesi için Buxey ve diğerleri (1973) iki yaklaşım önermişlerdir. Birinci yaklaşım yeterince büyük parti büyüklüğü olması durumunda uygulanmakta ve her bir modelin ayrı ayrı değerlendirilmesini esas almaktadır. İkinci yaklaşımda ise hat öncelikle en sık üretilen ürüne göre dengelenmekte sonra diğer ürünlere yönelik revizyonlar yapılmaktadır.

Görev zamanlarının değişkenliğine göre montaj hatları

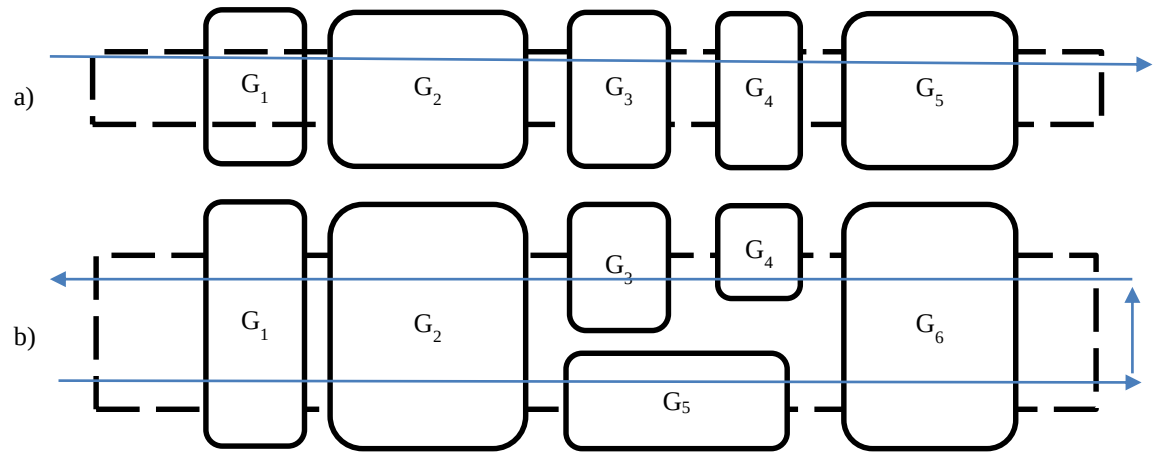
Montaj hatlarının sınıflandırılmasında dikkate alınan diğer bir önemli özellik de görev zamanlarının değişkenliğidir. Görev zamanlarındaki değişkenliğin yeterince küçük olduğu durumlarda görev zamanlarının deterministik olduğu kabul edilebilir (Johnson, 1983). İnsanın çalışma oranındaki düzensizlikler, yetenek, motivasyon ve karmaşık sistemlerin arıza duyarlılığı gibi faktörlerden kaynaklanabilen görev zamanlarındaki önemli sayılabilecek değişkenlikler, stokastik görev zamanlarının dikkate alınmasını gerektirebilmektedir (Buzacott, 1990; Robinson, McClaion, Thomas, 1990; Hillier ve So, 1991; Pike ve Martin, 1994). Bir çevrimden diğerine üretim zamanlarındaki değişkenliğin diğer nedenleri olarak da çalışanların yorgunluğu, dikkatlerinin dağılması, çalışma esnasında oyalanma, iş tatminsizliği, makine ve teçhizatın bakımsızlığı, ham madde kusurları ve montajı yanlış yapılmış parçalar gösterilebilir. Stokastik zaman değişkenliğinin haricinde, öğrenme etkisinden veya üretim sürecindeki başarılı iyileştirmelerden kaynaklı görev zamanlarında sistematik azalışlar söz konusu olabilmektedir (Boucher, 1987; Chakravarty, 1988).

BMHDP'nin temel varsayımlarından olan "görev zamanlarının sabit ve önceden biliniyor olması" varsayımı, problemi gerçeklikten uzaklaştıran temel faktörlerdendir. Montaj hatlarında kullanılan zamanların deterministik olduğu kabulü, transfer hatları gibi daha otomatize olmuş sistemler için geçerli olabilmektedir. Operatörlerin insan ağırlıklı olduğu montaj sistemlerinde ise görev zamanları bir çevrimden diğerine farklılıklar gösterebileceğinden (Buzacott, 1990; Scholl, 1999), görev zamanlarının stokastik olarak ele alınmasıyla elde edilecek sonuçların gerçeğe daha yakın olması sağlanabilecektir.

Hattın şekline göre montaj hatları

Akış tipi üretim sistemlerinde yerleşim düzeni genellikle malzemenin akışına göre önceden belirlenir. Geleneksel yerleşim düzeninde montaj istasyonları, malzeme taşıma sistemi boyunca doğrusal seri bir hat olarak konumlandırılmıştır (Şekil 2.4). Bu tip yerleşimler sınırlı bir esnekliğe sahiptirler. Montaj hattının iki ucunun birbirine yakın aynı tarafta bulunduğu ve "U" şeklinde bir yapıya sahip hatlara ise u-tipi montaj hatları denilmektedir. Bu tip hatlarda istasyonlar birbirlerine dönük olarak hattın iki yüzünde eşzamanlı olarak çalışabilmektedir. İş zenginleştirme ve genişletme çalışmalarıyla elde edilecek iyileştirmelerle ve daha fazla sayıda görev – istasyon kombinasyonuyla U-tipi hat tasarımında daha iyi istasyon yük dengesi elde edilebilmektedir (Miltenburg ve Wijngaard, 1994; Monden, 1998; Scholl ve Klein, 1999).

U-tipi MHDP'nin BMHDP'den en büyük farklılığı, *k* istasyonunun sadece tüm öncül görevleri tamamlanmış görevleri değil aynı zamanda tüm ardıl görevleri tamamlanmış görevleri de içerebiliyor olmasıdır. İki farklı çevrimde de aynı iş parçası üzerinde işlem yapan istasyonlar çapraz/karşıya geçişli istasyon olarak adlandırılır. Şekil 2.4-b'de istasyon 1, istasyon 2 ve istasyon 6 örnek olarak verilebilir. U-tipi montaj hatları sundukları daha fazla sayıdaki görev–istasyon kombinasyonu ile daha yüksek seviyede hat dengeleri elde edilmesi imkânı sunarlar.



Şekil 2.4. Hattın şekline göre montaj hatları

U-tipi MHDP ile ilgili olarak birçok araştırma yapılmıştır. Verilen çevrim zamanında istasyon sayısını en küçüklemeyi amaçlayan u-tipi MHDP için genetik algoritmalar (Ajenblit ve Wainwright, 1998), tamsayılı programlama ve CPLEX (Urban, 1998) ve TB (Erel, Sabuncuoğlu ve Aksu, 2001) yaklaşımları kullanılmıştır. Scholl ve Klein (1999) çalışmalarında, BMHDP için geliştirilen SALOME1 (Scholl ve Klein, 1997) prosedürünün genişletilmiş versiyonu olan ULINO yaklaşımını açıklayarak U-tipi MHDP'ne uygulamışlardır.

İstasyon sayısının önceden belirli olduğu ve görev zamanlarının rastgele değişkenlerle ifade edildiği stokastik U-tipi MHDP için Nakade, Ohno ve Shanthikumar (1997) sınırlar geliştirmiş ve çevrim zamanını yaklaşık olarak hesaplamıştır. Urban ve Chiang (2006) ise çalışmalarında stokastik görev zamanlı u-tipi MHDP için şans kısıtlı, doğrusal parçalı tamsayılı programlama modeli geliştirmiş ve küçük boyutlu problemler için CPLEX ile çözümler elde etmiştir.

Üretim hattında arıza meydana geldiğinde hattın şeklinin hat etkinliği üzerindeki etkileri Miltenburg (1998) tarafından araştırılmıştır. İstasyonlar arasındaki tüm bağlantı noktalarına tampon stok alanları oluşturulduğunda, u-tipi hat yapısının düz hat yapına eşit veya daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu durum U-tipi hat yapısındaki karşıya geçişli istasyonların düz hatlara göre daha fazla bağlantı noktası ve dolayısıyla daha fazla tampon stok alanı sağlamasıyla açıklanmış ancak bu tampon stok alanlarının oluşturma ve kullanılma maliyetleri dikkate alınmamıştır.

Miltenburg (1998) ise verilen çevrim zamanında N adet U-tipi montaj hattının dengelenmesini ele almıştır. Burada amaç her bir istasyonun en fazla iki adet komşu hattan görevler içerecek şekilde belirlenmesidir. Önerilen dinamik programlama algoritmasıyla küçük boyutlu problemler için eniyi sonuçlar elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Sparling (1998) 3 montaj hattından görevleri içerebilecek çok hatlı istasyonların bulunmasına yönelik bir algoritma geliştirmiştir.

Paralel hatlar, istasyonlar ve görevler

Her biri belirli bir ürün veya ürün grubunun üretimini gerçekleştiren tümüyle paralel hatlar, yüksek üretkenlikle beraber olası hatalara ve arızalara karşı daha esnek üretim imkânları sunarlar (Becker ve Scholl, 2006). Birden fazla hattın kullanımı durumunda, paralel hat sayısının belirlenmesi ve hangi ürünlerin hangi hatta üretileceğinin belirlenmesine dair yeni karar problemleri ortaya çıkar (Lehman, 1969; Geoffrion ve Graves, 1976; Globerson ve Tamir, 1980; Ahmadi ve diğerleri, 1992). Aslında tek bir hatta da paralelleştirmenin avantajları paralel istasyonlar (iş parçalarının aynı işi yapan birden fazla sayıda operatöre paylaştırılması) kurulmasıyla elde edilebilir. Aynı işi yapan birden fazla çalışan demek aynı işi yapan birden fazla makine kullanılması anlamına da gelmektedir (Becker ve Scholl, 2006). Paralel istasyonların avantajlarından birisi de istenilen çevrim zamanından daha büyük zamanlı görev(ler) söz konusu olduğu durumlarda global çevrim zamanının azaltılmasını sağlamasıdır (Freeman ve Jucker, 1967; Buxey, 1974; Pinto ve diğerleri, 1981; Sarker ve Shanthikumari, 1983; Bard, 1989; Daganzo ve Blumenfeld, 1994).

Çevrim zamanını en büyük zamanlı görevin süresinden daha aşağıya çekmenin bir yolu da paralel görevler kullanmaktır (Arcus, 1966; Pinto, Dannenbring, Khumawala, 1975; Inman ve Leon, 1994). Sıralı görevler, tamamıyla farklı iş parçaları üzerinde döngüsel olarak gerçekleştirilecek şekilde, seri hattın farklı istasyonlarına atanır.

Belirlenen çevrim zamanından daha büyük süreye sahip görev bulunması durumunda, montaj hatlarının genel varsayımlarından olan "en büyük zamanlı görevin süresi çevrim zamanını aşamaz" varsayımı ihlal edilmiş olacaktır. Paralel istasyonlar istasyon zamanının arttırılmasına imkân sağlayarak ortaya çıkacak "çevrim zamanından büyük görev zamanlarının bulunması" durumuna çözüm getirebilmektedir (Buxey, 1974).

Paralel yapının en basit örneği olan istasyonların tekrarı durumunda, aynı görevleri gerçekleştiren ve aynı teçhizatla donatılmış özdeş iki istasyon bulunur. Tekrarlı istasyonlar mevcut geçerli çevrim zamanının iki katı olan yerel bir çevrim zamanına sahiptir. Bu artan çevrim zamanından dolayı, uygun atanabilir görevlerin sayısı paralel istasyonlar için büyük ölçüde artmaktadır (Becker ve Scholl, 2006).

Paralel istasyon yapısının beraberinde getireceği basit maliyetlerdeki artıştan dolayı, paralel istasyonlara sahip montaj hatlarının değerlendirilmesinde maliyet odaklı amaç fonksiyonları daha uygun olmaktadır. İstasyonların tekrarına izin verilen bir çözüm yaklaşımı, Pinto ve diğerleri (1981) tarafından gösterilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak; istasyon tekrarının sabit maliyeti ile normal çalışma işçi ücretlerinden ve fazla mesai maliyetlerinden oluşan işçilik maliyetleri kullanılmıştır.

Diğer bir uygulama olarak, uzun görev zamanına sahip görevlerin daha kısa zamanlı ancak aynı öncelik ilişkilerine sahip görevlere ayrıştırılabilir olduğunun varsayıldığı, paralel görev kavramı Pinto ve diğerleri (1975) tarafından ele alınmıştır. Görevlerin bölünemezliği ilkesine göre ise orijinal görev her bir çevrimde yalnızca tek bir istasyonda gerçekleştirilebilirken; bu varsayımla, istenen çevrim zamanında geçerli ve uygun bir hat dengesi elde edebilmek için ayrıştırılan bu görevlerin farklı istasyonlara atanabilmesi imkânı doğmaktadır. Problemin değerlendirilmesinde ise tesis ve işçilik maliyetlerinden oluşan toplam maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Yazarlar problemin matematiksel gösterimini açıklayarak dal sınır tekniği ile çözüm elde etmişlerdir. Kullanılan çözüm tekniğinde, paralel görevlerin ikiden fazla istasyona atanmadığı ve görev zamanının eşit şekilde bölündüğü kabul edilmiştir.

Bard (1989) çalışmasında, paralel görev ve paralel istasyon durumları ile beraber kullanılmayan (boş) zaman durumunu ele almıştır. Boş zaman; iş parçalarının bir istasyondan diğerine taşınırken ihtiyaç duyulan, hiçbir işlemin gerçekleştirilemediği zaman olarak tanımlanmaktadır. Seri bir hat için boş zaman, kullanılabilir çevrim zamanını azaltmaktadır. Çalışmada, paralel istasyonların kullanımı ile çevrim zamanının üretken olmayan parçasının azaltılabileceği (her bir paralel istasyon için aynı boş zaman geçerli olacağından, tüm hat düşünüldüğünde paralel istasyonlar için yalnızca tek bir boş zaman söz konusu olacaktır) gösterilmiştir (Becker ve Scholl, 2006).

Bir istasyona birden fazla operatör atanması da paralelleştirme uygulamalarına dair diğer bir örnektir. Verilen çevrim zamanında istasyon sayısını ve operatör sayısını en küçüklemeyi amaçlayan Shtub (1984) çalışmasında, Buxey (1974) sezgiseline benzer bir sezgisel açıklamıştır. Problem Wilson (1986) tarafından yeniden formüle edilip sadeleştirilerek standart karma tamsayılı programlama ile çözülmüştür. Ayrıca Chakravarty ve Shtub (1986b) çalışmalarında öğrenme etkilerine bağlı olarak problemdeki dinamik değişimleri incelemişlerdir.

İstasyon paralelleştirme ile benzer etkilere sahip diğer bir yaklaşım da istasyonları operatör takımlarının çalıştığı daha büyük birimler oluşturacak şekilde bir araya getirmektir. Bütünleştirilen istasyonlar orijinal çevrim zamanının katları olacak şekilde kullanılabilir zamana sahip olabilmekte ve operatörlerin iş tatmininin artmasını sağlayabilmektedir. Bu konuda yapılan diğer araştırmalar Johnson (1991), Bukchin, Dar-El ve Rubinovitz (1997) ile Bukchin ve Masin (2004) çalışmalarında incelenebilir.

Süreç alternatifine veya kullanılan makine/teçhizata göre montaj hatları

Bir ürünün imalatının en önemli bileşenlerinden birisi kullanılan makine ve insan gücüdür. Kullanılacak teçhizatın seçimini etkileyen temel faktör ise ilgili istasyona atanan görev ve bu görevin operasyonel gerekliliklerdir. Literatürde sıkça montaj hattı tasarım problemi (MHTP) olarak kullanılan kavram, görevlerin farklı teçhizatlarla veya farklı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebildiği süreç alternatiflerinin söz konusu olması durumunda, dengeleme probleminin teçhizat veya süreç seçim problemi ile bağlantısını göstermektedir (Baybars, 1986). Dengeleme problemi ile süreç alternatiflerini birleştirerek ele alan model Pinto ve diğerleri (1983) tarafından incelenmiştir. Modelde, her biri bazı görevleri gereksiz kılan veya görev zamanlarını azaltan, her bir kombinasyonu farklı öncelik ilişkileri diyagramına sahip olabildiği bir veya daha fazla sayıda süreç alternatifi, maliyet açısından değerlendirilmiştir. Graves ve Holmes (1988) ile Graves ve Lamar (1983) çalışmalarında, kurulacak istasyonların, farklı teçhizatlara sahip özdeş olmayan istasyon alternatifleri arasından seçildiği bir veya daha fazla sayıda ürün modelini ele almışlardır. Bu çalışmalarda sabit görev sırası varsayımı ile dengeleme problemi basitleştirilmiştir.

Verilen çevrim zamanı için toplam teçhizat maliyetini en küçükleyen teçhizat alternatifleri, Bukchin ve Tzur (2000) çalışmalarında incelemişlerdir. Araştırmada, her bir istasyonunun

teçhizat alternatifleri kümesinden seçilen yalnızca bir tür teçhizatla donatıldığı; her bir tür teçhizatın bağımsız bir maliyetinin ve görev süresi üzerinde farklı bir etkisinin olduğu varsayılmıştır. Kurulacak montaj hattında, istasyon sayısının ve hangi tür teçhizatla donatılacağının tespiti ve istasyona bağlı kısıtlamalar dikkate alınarak görevlerin istasyonlara atanması problemi olmak üzere iki karar problemi incelenmiştir. Problemin çözümü için dal-sınır prosedürüne dayanan kesin çözüm algoritması ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için de sezgisel çözüm algoritması önerilmiştir. Aynı problem Nicosia, Pacciarelli ve Pacifici (2002) tarafından incelenmiş, temeli Schrage ve Baker (1978) ile Kao ve Queyranne (1982) çalışmalarına dayanan dinamik programlama prosedürü ile FABLE ve OptPack programlarına bağlı dal sınır yaklaşımı önerilmiştir. Falkenauer (1997) çalışmasında da benzer şekilde kaynaktan bağımsız görev zamanları içeren problem için gruplama genetik algoritması sunulmuştur. Tüm teçhizat alternatiflerinin belirli kurulum maliyetlerinin olduğu, problemin biraz daha kısıtlanmış bir versiyonu, Rubinovitz ve Bukchin (1993) tarafından ele alınmıştır. Basit ve genelleştirilmiş MHT probleminin çözümü için dal – kesme algoritması Pinnoi ve Wilhelm (1997;1998) tarafından önerilmiştir. Her bir görev için görev zamanlarını ve teçhizat maliyetlerini tanımlayan operasyon yönteminin seçimi problemi ise Rekiek, de Lit ve Delchambre (2002a) tarafından ele alınmıştır.

Bir istasyona atanan görevlerin gerçekleştirilebilmesi için istasyonun gerekli yetenek ve teknolojiye sahip operatör ve makinelerle donatılması gerekir. İstasyona bağlı atama kısıtlarından dolayı, özellikle de karmaşık üretim süreçlerine sahip ürünlerin üretiminde, tüm istasyonların eşit olarak donatılması genellikle mümkün olamamaktadır (Kilbridge ve Wester, 1961; Bukchin ve Tzur, 2000). Ayrıca görevlerin ataması, görevler arasında uyumsuzluk, zaman veya alan mesafeleri gibi nedenlerden dolayı göreve bağlı kısıtlamalarla sınırlandırılabilir (Ignall, 1965; Deckro, 1989; Agnetis, Ciancimino, Lucertini, 1995).

Diğer bir tür atama kısıtı ise operatöre bağlı atama kısıtlarıdır. Operatörlerin farklı seviyelerde becerileri olduğu için bir operatör belirli bir istasyona atandığında sadece belirli görev kombinasyonlarını gerçekleştirmesi söz konusu olabilecektir. Ayrıca iş tatmininin operatör üzerindeki etkileri de gözlemlenmiştir (Agrawal, 1985; Iskander ve Chou, 1990).

Bir istasyonda tek bir makine/teçhizatın kullanımı yerine birden fazla makine teçhizatın kullanılmasına imkân sağlayan ve teçhizat seçim probleminin özel bir örneği olarak ele

alınabilecek paralel istasyon problemi, Bukchin ve diğerleri (2002) tarafından ele alınmıştır. Teçhizat seçim problemiyle olan benzerliği nedeniyle modelde değişiklik yapılmadan aynı çözüm prosedürleri ile probleme çözüm üretilebilmektedir.

Teçhizat seçim probleminin, işçilerin üretim hızı veya kalitesi anlamında farklı yeteneklere sahip olduğu ve bu özelliklerine göre ücretlendirildiği işçi seçim/atama problemine denk olduğu (Akagi, Osaki, Kikuchi, 1983; Wilson, 1986; Lutz, Davis, Turner, 1994) çalışmalarında incelenmiştir.

Atama kısıtlarına göre montaj hatları

Montaj hatlarında görevlerin istasyonlara atamasını sınırlayan çok çeşitli faktörler söz konusu olabilir. Sağ ve sol yönlü istasyonlarda çalışabilme ihtiyacı pozisyona *bağlı* kısıtlamalar olarak nitelendirilebilir. Özellikle de kamyon ya da otobüs gibi büyük ve ağır iş parçalarının söz konusu olduğu durumlarda, iş parçasının etrafını dolanmanın mümkün olmadığı veya çok yüksek maliyetli olduğu durumlarda görevlerin hattın sadece tek bir yönünde gerçekleştirilecek şekilde istasyonlar oluşturulması faydalı olabilmektedir. Bu şekildeki sağ ve sol yönlü görevlerin bir araya getirilmemesi gereken durumlar göreve bağlı kısıtlamalar olarak da nitelendirilebilir. Aynı istasyona atanmaması gereken görevler ise uyumsuz/zıt yönlü olarak isimlendirilir (Becker ve Scholl, 2006).

Montaj hattının sağ ve sol yönüne karşılıklı olarak konumlandırılan iş istasyonlarından oluşan çift taraflı montaj hatları, Bartholdi (1993) tarafından gösterilmiştir. Çift taraflı montaj hatlarında, bir çevrimde her bir karşılıklı istasyon çifti tek bir iş parçası üzerinde aynı anda çalışırlar. Burada görevler, üzerinde çalıştıkları aracın yönüne göre gruplandırılırlar. Dolayısıyla sağ yönlü görevler, sol yönlü görevler, çift yönlü görevler (sağ veya sol her iki yöndeki istasyonlardan birisi tarafından yapılabilecek görevler) ve her iki taraftaki istasyonlarca ortak yapılabilecek görevler söz konusu olabilecektir.

Bartholdi (1993) çift taraflı montaj hatlarının verilen *c* çevrim zamanında öncelik ilişkilerine de bağlı olarak, geleneksel tek yönlü hatlardan daha fazla istasyon gerektirmeyeceğini belirtmiştir. Zıt yönlü istasyon çiftleri için dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta boş zamanların oluşmasıdır. Görevler, aynı zıt yönlü istasyon çiftlerinde olsalar bile öncelik ilişkilerinden dolayı istasyonlarda boş zamanların oluşmasına neden olabileceklerdir.

Bartholdi (1993) çift taraflı MHDP çözümü için öncelik kurallarını temel alan uyarlanmış bir sezgisel kullanmıştır. Yaptığı değişikliklerle kullanıcıya bazı görevlerin belli istasyonlara sabitlenmesi imkânı sağlanmaktadır. Görevler arasında uyumsuzluk ve bazı sabit görev – istasyon kombinasyonları içeren problemler için dinamik programlama yaklaşımı Agnetis ve diğerleri (1995) tarafından sunulmuştur. Çalışmada kullanılan amaç, verilen istasyon sayısı için iş yüklerinin düzgünleştirilmesidir.

Çift taraflı MHDP için istasyon sayısını en küçüklemeye çalışan genetik algoritma yaklaşımı Kim, Kim ve Kim (2000a) tarafından sunulmuştur. Bu problem için Lee, Kim ve Kim (2001) tarafından iki alternatif amaç açıklanmıştır. Bu amaçların birincisinde öncelik ilişkileri açısından birbiriyle direkt olarak ilişkili görevlerin aynı istasyona atanması amaçlanırken; ikincisinde ise birbiriyle ilişkili görevlerin zıt istasyonlara atanmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Eğer bu mümkün olmazsa öncül görevin tamamlanma zamanı ile zıt istasyondaki ardıl görevin başlangıç zamanı arasındaki boş zamanın mümkün olduğunca büyük olmasına çalışılır. Problemin çözümü için öncelik kurallı çözüm yaklaşımını temel alan birbiriyle ilişkili görevlerin gruplandırılmasına dayanan yaklaşım önerilmiştir (Becker ve Scholl, 2006).

Farklı atama kısıtlarının kullanıldığı, istasyon sayısının önceden belirlendiği ve tek yönlü bir hattın ele alındığı gerçek dünya problemi, Pastor ve Corominas (2000) tarafından ele alınmıştır. Göreve bağlı atama kısıtlarında bazı görevlerin aynı istasyona atanması gerektiği ve dolayısıyla tek bir görev altında birleştirildiği varsayılmıştır. Pozisyona bağlı atama kısıtları olarak ise büyük ve taşınamaz bir iş parçası üzerindeki bazı görevlerin sadece sol veya sağ yönlü operasyonlarla ve bazı görevlerin de iş parçasının üzerinden veya altından gerçekleştirilebileceği varsayılmıştır. Tüm bu işlemlerin çift taraflı montaj hatları kullanılmadan ve bu özelliklerdeki görevlerin aynı istasyonlara atanmadan gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve iki aşamalı sezgisel yaklaşım önerilmiştir. İki aşamalı sezgisel yaklaşımın birinci aşamasında budanmış bir dinamik programlama yaklaşımı kullanılmakta, ikinci aşamada ise elde edilen çözümün tabu arama algoritması ile geliştirilmesine çalışılmaktadır. Bautista, Suarez, Mateo (2000) görev grupları arasında uyumsuzlukların olduğu ve ikincil amaç olarak da en küçük istasyon sayısı bulunduktan sonra çevrim zamanının azaltılmasını amaçlayan BMHD-1 problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için açgözlü uyarlanabilir arama algoritması ve genetik algoritma geliştirmişlerdir. Görev

uyumsuzlukları ve mesafe kısıtları ile genişletilmiş BMHD-2 problemi Park, Park ve Kim (1997) tarafından ele alınmış ve problemin çözümü için bir yerel arama sezgiseli geliştirilmiştir.

Hattın kontrol düzenine göre montaj hatları

Bir montaj hattının *c* çevrim zamanı gibi belirli bir zaman düzeninde hareket edip etmemesine göre değerlendirilmesi mümkündür. Çevrim zamanı gibi belirli bir zamana bağlı olarak iş parçasının hareket ettiği hatlar zaman temelinde düzenlenmiş – gecikmesiz (paced) hatlar ve zaman temelinde düzenlenmemiş–gecikmeli (unpaced) hatlar olarak sınıflandırılabilirler.

Gecikmesiz hatlarda çevrim zamanı, iş parçasının her bir istasyonda geçireceği süreyi kısıtlayarak belirli bir üretim hızına karşılık gelir. Bu kısıtlama, tek modelli hatlarda katı bir kural olurken, çok modelli hatlarda, bazı paralelleştirme uygulamalarında ve stokastik görev zamanı durumlarında ortalama olarak karşılanması gereken bir kural haline gelmektedir (Boysen ve diğerleri, 2007).

Bir görevin istasyondaki operasyonlarının tamamlanmasıyla veya bir sonraki istasyonun boşalmasıyla iş parçasının belirli bir zaman gözetmeksizin hareket ettirilmesi, zaman temelinde düzenlenmemiş – gecikmeli montaj sistemleri olarak nitelendirilir. Gecikmeli hatlarda *senkronize* ve *senkronize olmayan* iki durum söz konusudur. Senkronize olmayan durumda iş parçasının operasyonları istasyonda tamamlanır tamamlanmaz sonraki istasyona ya da sonraki istasyonun önündeki tampon bölgeye gönderilir (Boysen ve diğerleri, 2007).

Bu durumda tampon bölgelerin konumu ve boyutuyla ilgili yeni bir karar problemi ortaya çıkar (Hillier ve So, 1993; Malakooti, 1994). Senkronize durumda ise operasyonları tamamlanan iş parçasının hareketi sonraki istasyon ile koordineli şekilde gerçekleştirilir. İş parçasının hareketi, her iki istasyonda tüm operasyonları tamamladığında gerçekleşecektir (Boysen ve diğerleri, 2007).

3. PARALEL MONTAJ HATLARI VE PARALEL MHDP

Yüksek verimlilik seviyelerinde çalışma imkânı sağlayan montaj hatlarında talebin de yeterince yüksek olması durumunda paralel istasyonlar/görevler/hatlar kullanılarak daha yüksek verimlilik seviyelerinde çalışabilme imkânı sağlanmaktadır. Hâlihazırda gerçek dünya uygulamalarında genellikle birden fazla montaj hattı ile karşılaşılmaktadır.

3.1. Paralel Montaj Hatları

Sanayide, birbirine paralel olarak konumlandırılmış birden fazla özdeş ya da benzer düz montaj hatlarına sahip üretim sistemlerine oldukça yaygın olarak rastlanmaktadır. Bu hatlarda, aynı zamanda birbirinden bağımsız olarak, aynı ya da benzer ürünlerin montaj işlemi yapılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, her düz hatta sadece belirli bir ürünün montajı yapılmaktadır. Gökçen, Ağpak, Benzer (2006), paralel montaj hatlarından oluşan üretim sisteminin verimliliğinin ve kaynak kullanımının arttırılması amacıyla, bu paralel hatların bazı komşu istasyonlarının iş yüklerinin birleştirilmesini önermişlerdir. Birden fazla düz hattın eş zamanlı olarak dengelendiği bu problem, Paralel Montaj Hattı Dengeleme (PMHD) problemi olarak isimlendirilmiştir. PMHD probleminin amacı, hatlarda kullanılan toplam istasyon sayısını (işyeri sayısını veya operatör sayısını) enküçüklemektir.

Birden fazla montaj hattının kullanılması için iki temel gerekçe söz konusudur (Gökçen ve diğerleri, 2006; Lusa, 2008):

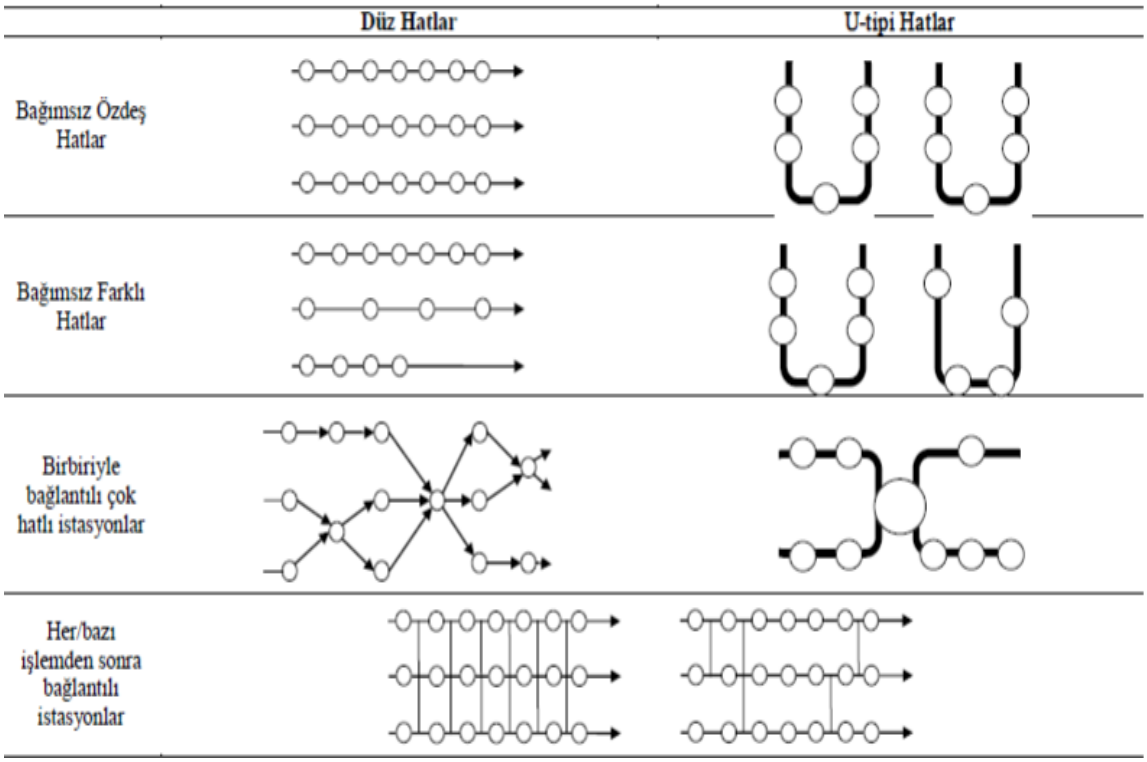
- Ürüne olan talebin tek bir montaj hattı tarafından karşılanamayacak kadar yüksek olması,
- Benzer ürünlere olan talebin, her bir ürünün tek bir hatta üretilecek kadar yüksek olması.

Günümüzde birçok firma daha uzun çevrim zamanlarına sahip ve her bir istasyonun daha fazla sayıda görevden sorumlu olabileceği çoklu hatlar kurmaktadır (Chiang, Kouvelis, Urban, 2007). Uygulamada sıkça kullanılmasına rağmen paralel montaj hatları ile ilgili araştırmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Başlangıçta mevcut talebi karşılayabilecek aynı üretim hatlarının sayısının tespiti problemi ele alınmış, zaman içerisinde ise paralel görevler ve paralel istasyon yapılarını inceleyen araştırmalar yapılmıştır.

3.1.1. Paralel montaj hattı yapıları

Bir üretim sisteminin tasarımında kapasite, maliyet, kalite gibi genel faktörlerle birlikte birçok performans kriteri de dikkate alınmaktadır. Montaj hatlarının tasarımında da makine ve teçhizat maliyetleri, üretim hızı ve üretilebilecek ürün çeşidi gibi faktörler belirleyici olmaktadır. Dolayısıyla hat sayısı, hatlar arasındaki bağlantılar ve sistem konfigürasyonu bu faktörleri doğrudan etkileyebilen ve performansı belirleyebilecek (Koren, Hu, Weber, 1998) tasarım kararlarıdır. Montaj hatları ile ilgili çeşitli makine yerleşimleri ve hat tasarımları üretim miktarı, hat dengesi ve maliyetler dikkate alınarak Spicer, Koren, Shpitalni vd. (2002) tarafından açıklanmıştır.

Çoklu veya paralel montaj hattı yapıları Lusa (2008) tarafından 3 temel kategoride değerlendirilmiştir (Şekil 3.1). Bağımsız düz paralel montaj hatları, birbiriyle istasyon bağlantısı bulunmayan, düz veya U-tipi şeklinde konumlandırılabilen ve özdeş, benzer ya da farklı ürünlerin üretilebildiği montaj hatlarıdır.



Şekil 3.1. Paralel montaj hattı konfigürasyonları (Lusa, 2008)

Bazı ortak istasyonlara sahip paralel montaj hatları ise aynı istasyonda birden fazla hattın görevlerinin gerçekleştirildiği çok hatlı istasyonlara sahiptir. Düz veya u-tipi hat yerleşim

düzenine sahip olabilen bu türdeki montaj hatları da benzer veya farklı ürünleri üretebilme yeteneğine sahiptir. Literatürde ortak istasyonlara sahip paralel montaj hatları Miltenburg (1998), Sparling (1998) ile Gökçen ve diğerleri (2006) ve Özcan ve Toklu (2009) tarafından yapılan çalışmalarda ele alınmıştır.

Paralel montaj hatlarından farklı olarak, bir montaj hattında en büyük görev zamanının istenen çevrim zamanından büyük olması durumunda paralel istasyonlar kullanılabilir.

Buradaki paralel istasyon yapısında, bir istasyonun farklı iki montaj hattı tarafından ortak kullanımı söz konusu değildir. Buradaki amaç uzun işlem zamanlarının aynı işlemi yapan birden fazla istasyon ile hızlandırılmasıdır. Bu durum hattın çevrim zamanını azaltmanın ve dolayısıyla üretim oranını arttırmanın da bir yoludur (Buxey, 1974).

Ayrıca paralel istasyonlu sistemin kurulmasıyla arıza duyarlılığı azaltılabilir ve genellikle daha iyi hat dengeleri elde edilebilir. Paralel hat durumunda olduğu gibi paralel istasyonlar kurulması durumunda da dikkate alınması gereken ilave sabit maliyetler ortaya çıkacaktır (Becker ve Scholl, 2006; Chiang ve diğerleri, 2007).

3.1.2. Paralel montaj hatlarının özellikleri

Paralel montaj hatlarının en önemli özelliklerinden birisi üretim sisteminin tamamının verimliliğini ve üretkenliğini yükseltebilmesidir (Boysen ve diğerleri 2007; Lusa, 2008). Paralel hatların sağladığı esneklikle daha iyi hat dengeleri ve daha az boş zamanlar elde edilerek üretkenliğin ve sistem verimliliğinin arttırılması sağlanabilir. Ayrıca sistemin daha az sayıda istasyon kullanması durumunda; daha düşük işçilik maliyetleri, daha az alan ihtiyaçları ve daha az süreç içi stoklar ile çalışmak mümkün olabilmektedir (Chiang, Kouvelis ve Urban, 2007). Özellikle de U-tipi montaj hatları ve düşük çevrim zamanları söz konusu olduğunda paralel hatların faydaları daha da ön plana çıkabilecektir.

Paralel montaj hatlarının bir diğer önemli özelliği de sistem esnekliğini arttırması ve hata hassasiyetini azaltmasıdır (Rekiek ve diğerleri, 2002; Becker ve Scholl, 2006; Chiang ve diğerleri, 2007). Paralel düzende her bir hat kendi çevrim zamanı ile çalışabilmekte, böylece de talepteki değişimlere daha kolay uyum sağlanabilmektedir. Sistem esnekliği beraberinde hataya olan duyarlılığı da azaltmaktadır. Olası arıza durumlarında üretim tamamen

durmamakta, diğer hatlar çalışmaya devam edebilmektedir. Dolayısıyla, paralel montaj hatlarının faydaları dikkate alındığında karma modelli montaj hatlarının karmaşıklığı azaltılabilecektir.

Paralel hatların sağladığı en önemli avantajlardan birisi de hatların tek başına ürettiğinden daha az üretim yapmadan çevrim zamanının her bir hat için artırılabilmesidir. Çevrim zamanının arttırılması ile her bir istasyonda iş genişletme veya iş zenginleştirme yapabilme imkânı doğmaktadır. Bu sayede de işçi tatmini yükseltilebilmekte (Ellegard ve Jonsson, 1992), üretim oranında dalgalanmalara neden olabilen işe gelmeme durumu ve fireler azaltılabilmekte ve sistem üretkenliği artabilmektedir (Chakravarty ve Shtub, 1988). Ancak çevrim zamanındaki bu artışın sınırlı olması gerekir, aksi takdirde çalışanlar ilgili görev ve miktarı ile ilgili uzmanlaşamayacaklarını düşünebilir ve sonuçta üretkenlik üzerinde olumsuz etkiler söz konusu olabilir.

Daha uç bir durum olarak çevrim zamanındaki aşırı artış, tek bir işçinin tüm operasyonları gerçekleştirilebildiği düşük verimlilikte üretim sistemlerine neden olabilir. Diğer bir görüş açısına göre ise çevrim zamanındaki artış ile kalite de iyileşme görülebilir (Ellegard ve Jonsson, 1992). Çevrim zamanındaki artışın neden olabileceği bu iki sonuç kendi içerisinde tartışılabilir. Birinci bakış açısına göre işçi tatminindeki artış işçinin gerçekleştirdiği işi daha dikkatli, daha istekli ve daha özverili yapmasını sağlayacağından kaliteyi de olumlu yönde etkileyebilecektir. Öte yandan çalışanların uzmanlaşamayacaklarını düşünmesi, çalışanlar üzerinde olumsuz etki yaparak kalitenin düşmesine neden olabilecektir.

Paralel montaj hatlarının avantaj sağlayan özelliklerinin yanında negatif etkileri olabilen bazı zayıf yönleri de bulunmaktadır. Bunların başında da makine ve teçhizat maliyeti gelmektedir. İkinci bir üretim hattının kurulması ile iki kere makine ve teçhizat maliyetine katlanmak gerekecektir. Üretim süreci ve malzeme tedariği açısından da dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Paralel hatlardan her birinin mümkün olduğunca en az sayıda istasyona sahip olması gerekir, aksi durumda malzeme akışı ve tedariki ile ilgili fiziksel dağıtım ve taşımadan kaynaklanabilecek önemli sorunlarla karşılaşılabilir. Üretim alanı açısından da paralel hatlar kullanılması ilave alan ihtiyaçlarını gerektirecektir. Her bir makinenin ve teçhizatın ihtiyaç duyacağı alanlar toplam alan ihtiyacını daha da artırabilecektir.

Paralel montaj hatlarının sağlayabileceği bir avantaj olarak sunulan çevrim zamanının arttırılmasının bazı negatif etkileri de olabilmektedir. Çevrim zamanının arttırılması ile her bir çevrimdeki iş tekrarları azalacağından öğrenme etkisi de azalabilecektir. Sonuç olarak da üretim oranında bir azalış söz konusu olabilecektir. Öğrenme etkisinin azalmasından başka diğer bir etki de görevler arasındaki aparat değiştirme, malzeme taşıma gibi faktörlerin ihmal edilemeyecek kadar artabilmesidir. Çevrim zamanının arttırılması ile bir işçinin gerçekleştireceği operasyonların sayısı artacağından, bir görevden diğerine geçmek için gerekli zaman da önemli hale gelecektir.

Çok hatlı istasyonlara izin verilmesi toplam gerekli istasyon sayısında azalmaya yardımcı olabilir. Buna rağmen en önemli dezavantajları, sistemin birbiriyle bağlantılı hatların bir şekilde senkronize olmasını gerektirmesi ve çok hatlı istasyonlardaki bir arızanın birden fazla hattın performansını etkileyebilmesidir. Çoklu veya paralel hat dengeleme problemleri ile ilgili çalışmalarda fazlaca yer almayan çaprazlama, makinelerin arıza veya duraksamaya yatkın olduğu durumlarda önerilebilirdir. Doğal olarak yerleşim ve alan konuları çaprazlamanın uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır.

Paralel montaj hatlarının olumlu ve olumsuz özellikleri dikkate alındığında, bu tür üretim sistemlerinin tercih edilebilirliğine yönelik tek başına karar almak doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Paralel yapıdaki sistemlerin kurulum kararının alınmasında ve hat sayısının belirlenmesinde, paralel montaj hatlarının sağlayacağı esneklik ve üretkenlik ile katlanılması gerekecek maliyetler arasında bir denge gözetilmesi daha anlamlı karar almaya yardımcı olacaktır.

3.2. PMHDP

Paralel montaj hatlarını konu alan araştırmaların nispeten sınırlı sayıda olmasına karşın, PMHDP birden fazla karar problemini içeren oldukça karmaşık ve zor bir tasarım problemidir. Birden fazla hattı konu alan ilk araştırmalarda, talebi karşılayacak hat sayısının belirlenmesi problemi incelenmiştir. Temel amacın ihtiyaç duyulan montaj hatlarının sayısının belirlenmesi olduğu bu araştırmalarda, hatların genellikle birbirinden bağımsız olarak dengelendiği varsayılmıştır. Birden fazla montaj hattının birlikte kullanılmasıyla makine ve teçhizat maliyetlerinin ve üretim miktarının artacağı açıktır. Dolayısıyla problemi sadece hat sayısının belirlenmesi veya hatların ayrı ayrı dengelenmesi probleminden ziyade

montaj hattı tasarım problemi olarak daha geniş bir perspektif ile değerlendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

İki veya daha fazla montaj hattının birlikte değerlendirilebileceği tasarım problemi; hat sayısının belirlenmesi, ürünlerin montaj hatlarına atanması ve montaj hatlarının dengelenmesi alt problemlerinden oluşmaktadır. Paralel montaj hatları ile ilgili literatürdeki çalışmalar temelde 4 tip problem üzerine yoğunlaşmıştır (Lusa, 2008):

1. Kurulacak hat sayısını belirlemeye yönelik araştırmalar (Süer ve Dağlı, 1994; Pinnoi ve Wilhelm, 1997; Süer, 1998; Lan, 2007; Chiang ve diğerleri, 2007).
2. Ürün modellerinin hatlara atanmasına yönelik araştırmalar (Lehman, 1969; Ahmadi ve diğerleri, 1992; Süer ve Dagli, 1994; Pinnoi ve Wilhelm, 1997)
3. Her bir hat için istasyonlarının belirlenmesi ve görevlerin istasyonlara atanarak hattın dengelenmesine yönelik araştırmalar (Pinnoi ve Wilhelm, 1997; Süer, 1998; Miltenburg, 1998; Sparling, 1998; Gökçen ve diğerleri, 2006; Lan, 2007; Chiang ve diğerleri, 2007)
4. Farklı konfigürasyonları karşılaştırmak için üretim sistemlerinin performansının değerlendirilmesine yönelik araştırmalar (Wyman ve Moberly, 1971; Globerson ve Tamir, 1980; Chakravarty ve Shtub, 1988; Süer ve Dagli, 1994; Lan, 2007).

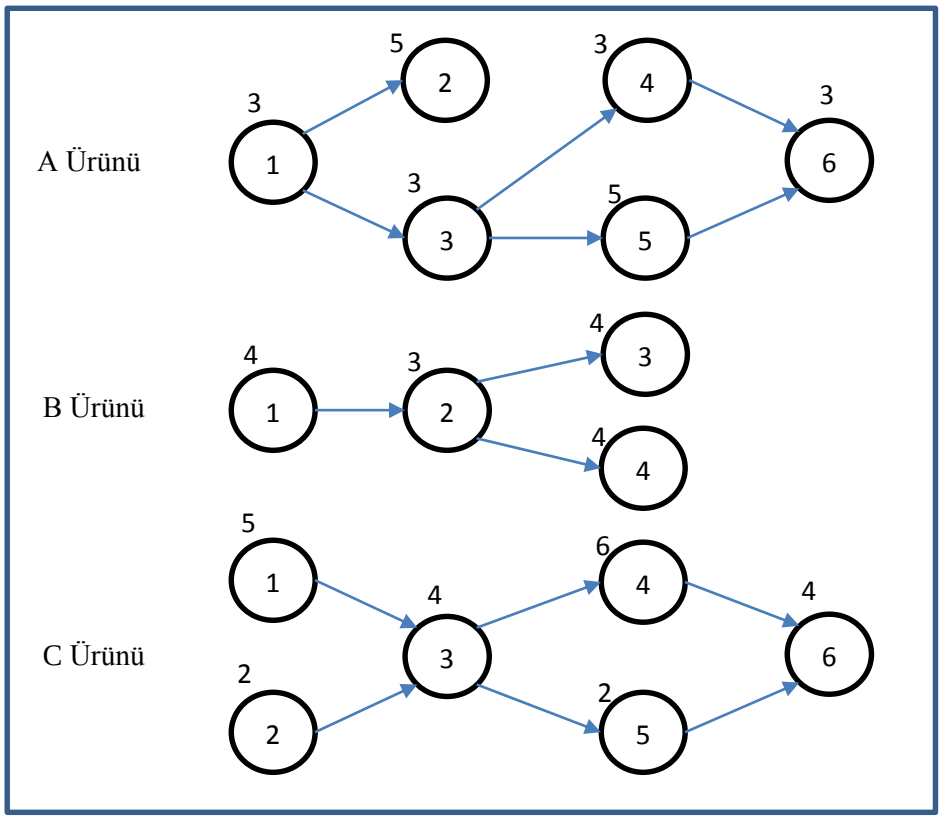
Montaj hattı tasarımı kapsamında paralel olarak konumlandırılmış birden fazla hattın ortaklaşa değerlendirilerek dengelenmeye çalışılması ile istasyon ve çalışan sayısından tasarruf etme imkânı ortaya çıkabilmektedir. Bu anlamda ilk olarak Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından tanımlanan PMHDP'nde daha yüksek hat dengelerinin elde edilebileceği ve daha az sayıda operatör kullanımının mümkün olabileceği gösterilmiştir.

BMHD problemi ile çeşitli benzer özelliklere sahip PMHDP'nin varsayımları aşağıda özetlenmiştir:

- Montaj görevleri daha fazla alt işlemlere (operasyonlara) bölünemez.
- Montaj görevleri arasındaki öncelik ilişkileri belirlidir ve bilinmektedir.
- Öncelik ilişkileri ve çevrim zamanından başka atama kısıtı yoktur.
- Çevrim zamanı/istasyon sayısı önceden belirlidir ve bilinmektedir.
- Her bir hatta tek bir ürün montajlanmaktadır.

- Malzeme taşıma, yükleme ve boşaltma süreleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.
- Hazırlık ve/veya aparat değiştirme zamanları ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.
- Bir görev, görevi gerçekleştirmeye yetkin teçhizata sahip herhangi bir istasyona öncelik ilişkilerine uygun olarak atanabilir.
- Her bir işçi atandığı istasyondan bağımsız olarak aynı ücreti almaktadır.
- Bir görevin tamamlanması, hat boyunca malzeme taşıma sistemi ile ilerleyen malzemenin üretim hızını değiştirmez.
- Bir istasyona atanan görevlerin toplam süresi, çevrim zamanını aşamaz.

PMHDP'ni daha iyi açıklayabilmek için Şekil 3. 2'de öncelik ilişkileri ve operasyon (görev) zamanları verilen 3 ürünü dikkate alalım. Her bir ürünün öncelik ilişkileri grafiğinde görevler düğümlerle ve görev zamanları ise düğümlerin üzerindeki rakamlarla ifade edilmektedir. Bu üç ürün birbirinden farklı ürünler olabileceği gibi tek bir ürünün farklı modelleri de olabilir.



Şekil 3.2. Örnek problem için 3 ürünün öncelik ve operasyon zamanları

Çevrim zamanı c=10 olarak kabul edildiğinde, her bir hattın bağımsız olarak dengelendiği durumda görev istasyon atamaları ve hat dengeleri Şekil 3.3'deki gibi olacaktır. A ürünü için 3 istasyon, B ürünü için 2 istasyon ve C ürünü için ise 3 istasyon olmak üzere toplam 8 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı görev–istasyon kombinasyonlarına sahip farklı çözümler mevcut olmakla birlikte, eniyi çözümdeki istasyon sayıları ve dolayısıyla hat dengesi değerleri değişmemektedir.

Görev–istasyon atamalarından da görüleceği üzere, A ürününün üretildiği birinci hattaki istasyonların boş zamanları sırasıyla {2, 2, 4} olmaktadır. B ürünü için ise {3, 2} zaman birimi istasyonlarda kullanılmayan zaman olurken, C ürünü için boş zamanlar {3, 0, 4} zaman birimi olarak hesaplanmaktadır. Ortaya çıkan bu boş zamanların azaltılmasının ve hat dengesinin yükseltilmesinin yollarından birisi ortak kaynak kullanımı ile hatların ortaklaşa dengelenmesidir.

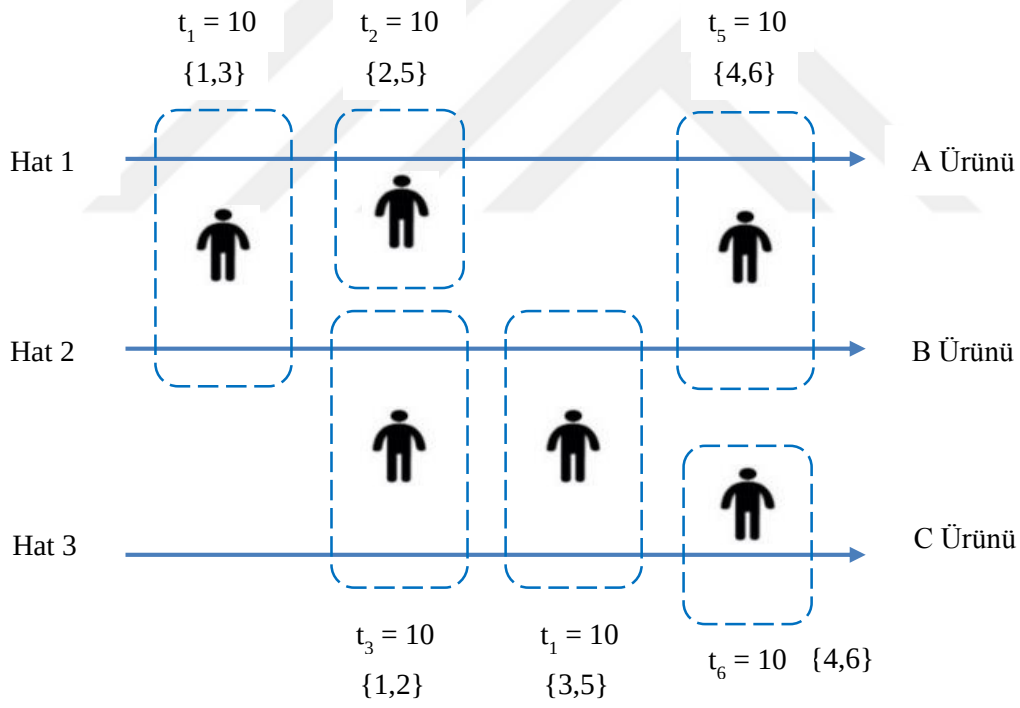
Ürün	İstasyon Atamaları	İstasyon Süreleri	Hat Dengesi	İstasyonlar ve Operatörler
A	S_{A1}={1,2} S_{A2}={3,5} S_{A3}={4,6}	t_{A1}= 8 t_{A2}= 8 t_{A3}= 6	E_A = 0,733	{1,2} {3,5} {4,6}
B	S_{B1}={1,2} S_{B2}={3,4}	t_{B1}= 7 t_{B1}= 8	E_B = 0,75	{1,2} {3,4}
C	S_{C1}={1,2} S_{C2}={3,4} S_{C3}={5,6}	t_{C1}= 7 t_{C2}= 10 t_{C3}= 6	E_C = 0,767	{1,2} {3,4} {5,6}

Şekil 3.3. Örnek problemde ürünlerin hatlarda bağımsız olarak dengelenmesi durumu için istasyon atamaları, istasyon zamanları ve hat dengeleri

Örnek problem, ürünlerin üretileceği hatların paralel olarak yerleştirildiği ve kaynakların (operatörler) ortak kullanılabileceği şekilde PMHDP olarak ele alındığında ise A, B ve C ürünlerinin sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı hatlara atandığı varsayımı altında, Şekil 3.3'de gösterilen çözüm elde edilebilecektir. Bir operatörün birden fazla hatta operasyon

gerçekleştirdiği istasyonlar paylaşımlı/ortak istasyon, sadece tek bir hatta operasyon gerçekleştirilen istasyonlar ise bağımsız/ayrı istasyon olarak isimlendirilir. Hatlar bağımsız olarak dengelendiğinde toplam 8 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulurken (Şekil 3.3), kaynakların ortak kullanımını esas alan PMHDP olarak dengelendiğinde ise toplam 6 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 3.4).

Ayrıca PMHDP olarak elde edilen çözümde, tüm istasyonların tam verimle çalıştığı, boş zamanlarının olmadığı da görülmektedir. Böylece, PMHDP olarak elde edilen çözümün, hatların bağımsız olarak dengelenmesi durumuyla elde edilen çözüm ile aynı sayıda ya da daha az sayıda istasyon ve operatöre ihtiyaç duyacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Büyük hacimli üretim düşünüldüğünde elde edilecek maliyet tasarrufu ve verimlilik artışı, montaj hatlarının paralel olarak değerlendirilmesinin önemini daha da arttırmaktadır.



Şekil 3.4. Örnek problemin ortak kaynak kullanımı ile PMHDP olarak çözümü

PMHDP'nin bir tasarım problemi olarak ele alınıp çözülmesi, kaynakların daha etkin kullanımına yardımcı olarak hat verimliliğinin arttırılmasını sağlayabilecektir. Günümüz rekabet şartları ve gerçek dünya uygulamalarındaki hat sayıları da dikkate alındığında, PMHDP'nin önemi daha da artmaktadır.

3.3. PMHDP için Çözüm Yaklaşımları

PMHDP birbiriyle bağlantılı iki alt problemden oluşmaktadır. Birinci problem, paralel hatlara atanacak hat – ürün kombinasyonlarının belirlenmesi problemi, ikincisi ise ürünlerin atandığı hatların dengelenmesi problemidir. Bu iki problemin birbirini etkileyen kesişim noktası ise komşu hatlardaki istasyonların birleştirilebilme veya ortak kullanılabilme imkânıdır.

Montaj hatları tasarımı ve dengelenmesine yönelik kararlar hat sayısı arttıkça zorlaşmaktadır. BMHD problemi NP-Zor bir problem olduğundan, hat sayısının arttığı, paralel hatların söz konusu olduğu problemler de NP-Zor sınıfında problemlerdir.

Paralel montaj hatlarının açıklanan problem türlerine yönelik çeşitli çözüm yaklaşımları, literatür taraması başlığında açıklanmıştır. PMHDP'nin çözümüne yönelik matematiksel programlama veya diğer analitik yöntemlere dayalı giderek artan sayıda araştırmalar söz konusudur. Ancak büyük boyutlu problemlerin etkin zamanlarda çözülememesi sorunu, PMHDP için de geçerlidir. Problemin NP-Zor yapısından dolayı, özellikle de görev sayısı fazla olan problemler için sezgisel yöntemler önemli bir pratik fayda sağlamaktadır.

3.3.1. PMHDP'nin 0 – 1 tamsayılı programlama modeli

Üretim hatlarının ortaklaşa değerlendirilerek, birlikte eşzamanlı dengelenmeye çalışıldığı PMHDP ilk olarak Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından açıklanarak aşağıdaki gibi modellenmiştir. Ürünlerin hatlara atamasının bilindiği varsayılan bu yaklaşımın 0 – 1 tamsayılı programlama modeli aşağıda özetlenmiştir.

Notasyonlar

c : çevrim zamanı

h : hat numarası, h=1, …, H

k : istasyon numarası, k=1, …, K

$||M_{hk}||$: h hattındaki k istasyonuna atanan görevlerin sayısı

t_{jh} : h hattındaki j görevinin işlem süresi

n_h : h hattındaki görevlerin sayısı

Değişkenler

$X_{hjk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ h hattındaki j görevi k istasyonuna atanırsa 1, diğer durumda 0

$U_{hk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ h hattında k istasyonu kullanılırsa 1, diğer durumda 0

$Z_k = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ k istasyonu kullanılırsa 1, diğer durumda 0

Model

Amaç fonksiyonu: Modelin amaç fonksiyonu görevlerin atandığı istasyonların sayısını en küçüklemektir Eş. 3.1.

$$\min \sum_{k=(K_{\min})}^{K_{\max}} Z_k \qquad (3.1)$$

Görev – istasyon atamaları: Tüm görevlerin istasyonlara atanması ve her bir görevin yalnızca bir tek istasyona atanması Eş. 3.2 ile sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{K_{\max}} X_{hjk} = 1 \qquad j = 1, \ldots, n_h;\ h = 1, \ldots, H \qquad (3.2)$$

Çevrim zamanı kısıtı: Bir *k* istasyonundaki görevlerin süreleri toplamının (iş yükü) *c* çevrim zamanını aşamayacağı ve eğer bu *k* istasyonu boş istasyon ise herhangi bir atama yapılamayacağı Eş. 3.3 ile gösterilmektedir.

$$\sum_{j=1}^{n_h} t_{hj} X_{hjk} + \sum_{j=1}^{n_{h+1}} t_{(h+1)j} X_{(h+1)jk} \le c * Z_k \qquad k = 1, \ldots, K_{max};\ h = 1, \ldots, H\text{-}1 \qquad (3.3)$$

Komşu hatlar ve görevler: Bir *h* hattındaki *k* istasyonunda çalışan operatörün yalnızca bir tek komşu hattan görevler gerçekleştirebilmesi Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 ile sağlanmaktadır.

$$\sum_{j=1}^{n_h} X_{hjk} - \|M_{hk}\| U_{hk} \le 0 \qquad \text{h= 1, …, H; k = 1, …, } K_{max} \tag{3.4}$$

$$U_{hk} + U_{(h+a)k} = 1 \qquad \text{h = 1, …, H-2; a = 2, …, H-h; k=1, …, } K_{max} \tag{3.5}$$

Öncelik ilişkileri: Bir *r* görevinin, öncülü olan *s* görevinden önceki bir istasyona atanamayacağı Eş. 3.6 ile gösterilir.

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} (K_{max} - k + 1)(x_{hrk} - x_{hsk}) \ge 0 \qquad \forall (r,s) \in P_h \tag{3.6}$$

Değişkenlerin tanımlanması: İkili değişkenler Eş. 3.7'de tanımlanmıştır.

$$X_{hjk}, Z_k, U_{hk} \in \{0,1\} \qquad \text{h = 1, …, H; k = 1, …, } K_{max}\text{; j = 1, …,} n_h \tag{3.7}$$

Matematiksel modeli yukarıdaki gibi açıklanan PMHDP'nde, hat–ürün atamalarının önceden bilindiği varsayılarak komşu hatlar arasında operatörün ortak kullanımı ile hat verimliliğinin arttırılmasına çalışılmaktadır. Aynı problemin hem ürünlerin hatlara atanması kararını hem de hatların ortak dengelenmesi kararını birlikte değerlendiren çok ürünlü PMHDP, Scholl ve Boysen (2008) tarafından gösterilmiştir. Problem, 0-1 doğrusal programlama modeli olarak modellenerek dal sınır algoritmasına dayanan SALOME tekniği ile çözülmüştür.

3.3.2. PMHDP'nin çözümüne yönelik sezgisel yaklaşımlar

Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından yapılan çalışmada, ürünlerin hatlara atanmasının bilindiği durum için önerilen matematiksel programlama modeli yanında, sezgisel bir çözüm yaklaşımı da sunulmuştur. Çalışmada yazarlar PMHDP'ni, pasif durum ve aktif durum olmak üzere iki şekilde ele almışlardır.

Pasif durumda, aynı ürünler aynı çevrim zamanı ile iki farklı montaj hattında üretilmektedirler. Pasif durum, bir iş istasyonundaki boş zamanın çevrim zamanının yarısına eşit veya daha fazla olduğu durumda uygulanmaktadır. Hatlar öncelikle ayrı ayrı dengelenir

ve her bir istasyonun boş zamanları hesaplanır. Çevrim zamanının yarısına eşit veya daha fazla boş zamanı olan hatlar komşu hattaki istasyon ile birleştirilir.

Pasif durum, birbiriyle aynı ürünlerin, birbiri ile aynı montaj hatlarında üretildiğini varsaydığı için gerçek uygulamalardan biraz daha uzaktır. Problemin daha gerçekçi, uygulamaya yönelik olarak ele alınması aktif durum olarak gösterilmiştir. Aktif durumda her bir hatta bir ürünün benzer veya farklı modellerinin aynı çevrim zamanı değeri kullanılarak üretilebileceği varsayılmıştır. Hatların farklı çevrim zamanlarına sahip olması durumunda ise öncelikle çevrim zamanlarını ortak katların en büyüğüne eşitlenir. Bu yaklaşımın çalışma prensibi COMSOAL basit sezgiseline benzemektedir.

Gökçen ve diğerleri (2006) ile Scholl ve Boysen (2009) çalışmalarında önerdikleri yöntemleri, literatürde iyi bilinen farklı test problemleri üzerinde uygulamışlardır. Sonuçlar incelediğinde sezgisel yaklaşımın matematiksel model kadar başarılı sonuçlar ürettiği, ayrıca Scholl ve Boysen (2009) tarafından önerilen çözüm yaklaşımının (ABSALOM+arama prosedürü), hem matematiksel modelden hem de Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından önerilen sezgisel yaklaşımdan daha etkin olduğu gösterilmiştir.

Özcan, Çerçioğlu, Gökçen (2010) tarafından yapılan çalışmada, karma modelli PMHDP ele alınmış ve bu problemin çözümü için Tavlama Benzetimi (TB) algoritması kullanılmıştır. Kullanılan algoritmada, hat dengesinin en büyüklenmesi ve iş yüklerinin istasyonlar boyunca düzgün dağıtılması amaçlanmıştır. Karma model sıralama problemi için benzer problemlerde yaygın olarak kullanılan enküçük parça kümesi yaklaşımı ele alınmıştır.

Önerilen sezgisel yaklaşımın çözüm performansının değerlendirilmesi için Kim, Kim ve Kim (2006) tarafından sunulan test problemleri kullanılmıştır. Ayrıca önerilen TB çözüm yaklaşımı, COMSOAL prensibine dayanan sezgisel yaklaşımla karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımla elde edilen sonuçların biraz daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

PMHDP'nin çözümü için önemli bir meta sezgisel çözüm yaklaşımı da Özbakır, Baykasoğlu, Görkemli (2011) tarafından geliştirilmiştir. Çalışmada sürü zekasına dayanan çok kolonili Arı Optimizasyon algoritması, modern bir sezgisel olarak kullanılmıştır. Çalışmada, hat dengesinin en büyüklenmesi ve istasyon boş zamanlarının en küçüklenmesi amaçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki test problemleri üzerinde test

edilerek daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tüm test problemlerinde başarılı sonuçlar elde edildiği, sonuçları ile birlikte gösterilmiştir.

3.4 PMHDP Literatürü

Bu bölümde PMHDP literatürü verilmiş olup, çalışmasında kronolojik bir yol izlenmiştir. İncelenen literatürde daha çok mevcut çalışmamıza alt yapı oluşturan ve ilgili literatürde önemli etkileri olan çalışmalara yer verilmiştir.

Montaj hatları ve MHDP ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen paralel veya çoklu hatların ele alındığı çalışmalar nispeten sınırlı sayıdadır. Literatürdeki Ghosh ve Gagnon (1989), Erel ve Sarin (1998), Rekiek ve diğerleri (2002), Becker ve Scholl (2006), Boysen ve diğerleri (2007), Battaia ve Dolgui (2013) çalışmaları montaj hatları ile ilgili önemli literatür özetleri sağlamakta ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmektedir.

PMHDP Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından tanımlanmadan önce içerisinde paralellik geçen ancak kaynakların ortak kullanımı ile eşzamanlı dengelemeyi kapsamayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar daha çok hatların bağımsız dengelenmesini ve maliyetleri incelemişlerdir. Birden fazla montaj hattının paralel olarak değerlendirildiği ilk çalışma Lehman (1969) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bir dizi ürünün belirli bir sayıdaki paralel konumlandırılmış montaj hattına atanması problemi ele alınmıştır. Wyman ve Moberly (1971) çalışmasında üç farklı paralel hat yapısının benzetim modeli sonuçları analiz edilmiştir. Chakravarty ve Shtub (1988) tarafından yapılan çalışmada, sistemin tepki zamanını en küçükleyecek hat sayısının tespiti için analitik bir model geliştirilmiştir. Paralel montaj hatlarının kullanımıyla, işçi tatmini ve üretkenliğinde yükselmeler olabileceği, Ellegard ve Jonsson'ın (1992) çalışmasında gösterilmiştir. Çok modelli üretimde üretilecek modellerin mevcut hatlara atanması problemini ele alan bir çalışma da Ahmadi ve diğerleri (1992) tarafından ele alınmıştır. Bu dinamik atama problemi için en iyiye yakın sonuçlar üreten 3 sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Bu alandaki önemli bir çalışma da Süer ve Dağlı (1994) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada n farklı modelin değişken sayıdaki hatlara atanması problemi ele alınmıştır.

Paralel hatların kullanılmasıyla ortaya çıkacak makine teçhizat maliyetlerinin incelendiği çalışmada Daganzo ve Blumenfeld (1994), iki veya daha fazla sayıda montaj hattının paralel

veya çoklu hat olarak kullanılmasının daha yüksek teçhizat maliyetlerine neden olacağını göstermişlerdir. PMHDP başlığında açıklandığı üzere ortak kaynaklarla birden fazla montaj hattının eş zamanlı ortaklaşa dengelenmesi problemi ilk olarak Gökçen ve Ağpak (2004) ile Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından gösterilmiştir. Scholl ve Boysen (2009) çalışmasında önerilen çözüm yaklaşımı ve elde edilen sonuçlar Gökçen ve diğerleri (2006) çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. Esmaeilian ve diğerleri (2008) çalışmasında paralel hat yapısında karma modelli MHDP ele alınmıştır. Özcan ve diğerleri (2009) çalışmasında PMHDP'ne tabu arama algoritması ile çözüm geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım amaç fonksiyonu olarak istasyon sayısının en küçüklenmesi ve istasyon yükleri arasındaki değişimlerin en küçüklenmesi amaçlarını kullanmıştır. Bu yönü ile PMHDP'nin çözümünde çok amaçlı amaç fonksiyonu kullanan ilk çalışma olmuştur. Özcan ve diğerleri (2010) karma modelli PMHDP'ni ele almışlardır.

İsmail ve diğerleri (2011) paralel karma modelli bir problem yapısını meta-sezgisel bir model ile çözümlemişlerdir. Özbakır ve diğerleri (2011) tip1 yapısına sahip PMHDP'nde homojen işgücü yapısına sahip problemi çoklu karınca algoritması ile meta-sezgisel bir çalışma yapmışlardır. Mamun ve diğerleri (2012) tip 1 ve karma model yapısına sahip paralel montaj hattı problemi için bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Kellegöz ve diğerleri (2012) tip 1 ve homojen işgücü yapısına sahip paralel montaj hattı problemi için dal ve sınır kesme algoritması modellemişlerdir. Rabbania ve diğerleri (2014) stokastik sürelere sahip Tip-1 karma modelli bir paralel montaj hattı problemi için hibrit genetik bir algoritma oluşturmuşladır. Küçükkoç ve diğerleri (2014) deterministik süreli, karma modelli ve homojen işgücü yapısına sahip bir paralel çift taraflı montaj hattı problemi için ajan tabanlı Karınca Optimazsyon algoritması geliştirmişlerdir. Kellegöz ve Toklu (2015) tek modelli bir paralel montaj hattı problemi için istasyonlarda çalışacak işgücü sayısını enküçüklemeye çalışan bir öncelik tabanlı yapısal bir sezgisel geliştirmişlerdir. Tiaccin (2015) stokastik sürelere sahip, homojen işgücü yapısında bir karma modelli paralel montaj hattı problemi için çok amaçlı dengeleme modeli geliştirmiştir. Küçükkoç ve diğerleri (2015) Tip-E sınıfında çift taraflı bir paralel montaj hattı problemi için koloni optimizasyon tabanlı bir karınca algoritması geliştirmişlerdir. Küçükkoç ve diğerleri (2016) karma modelli bir çift taraflı paralel montaj hattı problemi için esnek ajan tabanlı bir karınca algoritması geliştirmişlerdir. Li ve diğerleri (2019) çoklu operatöre sahip bir MHDP için modifiye edilmiş bir TB algoritması üzerine çalışmışlardır.

PMHDP alanında Endüstri 4.0 kavramı, farklı tipte (heterojen) ve insan-robot etkileşimli montaj hatlarını dikkate alan ilk ve tek çalışma olan ve çalışmamıza en yakın içerikte gördüğümüz Çil ve diğerleri (2017) çalışmasıdır. Çil ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, bir paralel robotik montaj hattı problemi "RPALB-II" için yeni bir matematiksel model çalışılmış, farklı tipte işgücünün olduğu çalışmada "Tip-II" çevrim zamanı enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Matematiksel model 25 göreve kadar çözüm bulabilmiştir. Matematiksel problemin NP-Zor yapısından dolayı daha büyük görevlerde çözüm bulunamadığı için ışın arama algoritması tabanlı farklı 3 tür meta-sezgisel algoritma (DE, CS-PSO ve PSO) kullanılmış ve sonuçları analiz edilmiştir. Önerilen algoritmaların robotik montaj hatları için etkin sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak literatürde incelendiği kadarıyla PMHDP'nde farklı tipte işgücüne sahip ve maliyet yönelimli olan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada ilk kez farklı tipte işgücüne sahip paralel montaj hatları için maliyet yönelimli bir matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel model tarafından uygun çözüm bulunamayan problem setleri için öncelikle probleme özgü bir COMSOAL algoritması sunulmuş ardından daha etkin sonuçlar elde edilebilmesi için Tavlama Benzetimi algoritması kullanılmış ve etkinliği gösterilmiştir. İhtiyaç duyulan veri setleri mevcut paralel montaj hattı literatüründe bulunan veri setlerindeki öncüllük ve işlem zamanları baz alınarak yeniden oluşturulmuştur. Bu sayede literatüre problem yapısına uygun yeni veri seti kazandırılmıştır. Bir sonraki bölümde tezin akışının daha anlaşılır olabilmesi için maliyet tabanlı MHDP'nin literatürü verilmiş ve ardından uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.5. Maliyet Tabanlı MHDP Literatürü

Amen (2000a), Maliyet Tabanlı MHDP'ni tanıtarak, karakteristik özelliklerinden bahsetmiştir. Maliyet Tabanlı MHDP'nin, istasyonların "en büyük doluluk" (Maximally loaded station rule) kuralına göre çözüldüğünde eniyi çözümü kaçırdığını belirterek, bu kriter yerine "iki istasyon" (Two stations rule) kuralına göre çözülmesi gerektiğini belirtmiştir. Problemin eniyi çözümünü bulmak için 7 tane baskın kural kullanan Dal-sınır algoritması önermiştir. Bu metod birerleme yöntemini kullanarak çözüm aramaktadır. Tüm çözümlere bakmamak için sınır kuralları önermiştir.

Steffen (1977) çalışmasında, bir istasyonda çalışan işçinin saatlik ücret oranının, istasyonuna atanan görevlerin ücret oranlarına farklı şekillerde bağlı olabileceğini belirtmiştir. Bir işçinin ücret oranının, o istasyona atanan görevlerin ücret oranlarının ortalamasına, ağırlıklı ortalamasına, en büyük ücret oranı değerine veya ortanca değere bağlı olarak değişebileceğini belirlenmiştir.

Rosenberg ve Ziegler, maliyet tabanlı MHDP'nin tanımını yaparak, bir işçinin ücret oranının, o istasyona atanan görevlerin en büyük ücret oranı değerine göre belirlenebileceğini ifade etmiştir. Maliyet tabanlı MHD problemi için iki farklı sezgisel algoritma önermiştir. Kaynaklarda, MHD probleminin çözümü için kullanılan basit sezgisel algoritmalar ile önerdikleri sezgisel algoritmaların performanslarının test problemleri üzerinde karşılaştırmalarını yapmışlardır (Rosenberg ve Ziegler, 1992).

Askin ve Zhou (1977), görevler ile ilişkili takım gereksinimleri dikkate alınarak paralel istasyonların açılmasına izin verilen bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Dikkate aldıkları amaç, gerekli ekipmanların amortisman değerlerini ve istasyonların sabit açma maliyetlerini enküçüklemektir.

Amen (2006), maliyet tabanlı MHDP'nin tanımını yaparak, karakteristik özelliklerinden bahsetmiştir. Rosenberg ve Ziegler (1992)'in çalışmasında ele alınan maliyetlere sermaye maliyetini de eklemiştir. Maliyet tabanlı MHDP'ni, en büyük doluluk istasyon baskın kuralına göre çözüldüğünde problemin en iyi çözümünün bulunamayacağını belirterek, bu kriter yerine iki istasyon kuralına göre çözülmesi gerektiğini belirtmiştir. Maliyet tabanlı MHDP'nin en iyi çözümünü bulabilmek için 7 tane baskın kural tanımlamıştır. Ayrıca, tanımladığı 7 baskın kuralı kullanan dal-sınır algoritması da önermiştir (Amen, 2000a).

Amen'in diğer çalışmasında, MHDP'nin çözümü için kullanılan kaynaklardaki sezgisel algoritmaları sınıflandırarak, maliyet tabanlı MHDP'ni çözmek için yeni sezgisel algoritmalar önermiştir. Sezgisel algoritmaların kullandığı öncelik kurallarına yeni bir tanesini eklemiştir (Amen, 2000b).

Amen (2001) çalışması, daha önceki Amen (2000b) çalışmasının devamı niteliğindedir. Amen (2000b) çalışmasında sınıflandırmasını yaptığı tüm sezgisel algoritmalar ile önerdiği

algoritmanın test problemleri üzerinde çözüm süresi ve çözüm kalitesine göre karşılaştırmalarını yapmıştır.

Scholl ve Becker çalışmasında, Amen (2000a) tarafından maliyet tabanlı MHDP'nin (M-MHDP) çözümü için önerilen Dal-Sınır algoritmasının kullandığı baskın kurallardan bir tanesinin yanlış olduğunu belirlenerek, düzeltmiştir. Baskın kurallara yeni bir tanesini eklemiştir (Scholl ve Becker. 2005).

Amen (2006) çalışmasında, M-MHDP'nin çözümü için karma tamsayılı programlama model geliştirmiştir. Bu modelin kısıtlarında bazı geliştirmeler önermiştir. Ayıca, M-MHDP'nin çözümünün, zaman tabanlı MHDP'ne göre daha zor olduğunu kanıtlamıştır (Amen, 2006).

Padrön ve diğerleri (2009) çalışmasında, görev yeri ve bölgesel kısıtlar ile birlikte ele alınan M-MHDP'ni çözmek için sezgisel ve kesin çözüm yöntemini birleştiren bir algoritma önermiştir.

Yazdanparast ve diğerleri (2011), hazırlık zamanını dikkate alan genel MHDP'nin maliyet tabanlı bir amaç fonksiyonuyla dengelenmesi için tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Önerilen matematiksel model açıklayıcı bir örnek üzerinde gösterilmiştir

Roshani ve diğerleri (2012), iki taraflı montaj hatlarının maliyet tabanlı bir şekilde dengelenmesi için karma tamsayılı programlama modeli ve yaklaşık çözümleri makul sürelerde bulabilmek için sezgisel TB algoritması önermişlerdir.

Foroughi, Gökçen ve Tiacci (2016) çalışmalarında maliyet odaklı montaj hattı dengeleme problemini stokastik görev süreleri ile tanımlamış ve literatürdeki maliyet odaklı stokastik montaj hattı dengeleme problemi arasındaki literatüre katkı sağlamışlardır.

Foroughi ve Gökçen (2019) çalışmalarında Amen'in (2000a) maliyet odaklı çalışmalarının deterministik olmaları ve gerçek hayat problemlerine karşı etkin olmaması nedeniyle stokastik maliyet odaklı montaj hattı dengeleme üzerine çalışmışlar ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir genetik algoritma geliştirmişlerdir.

3.6. Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Problemleri (MPMHDP)

Arz talep dengesini sağlamaya yönelik yüksek hacimli ürünlerin üretilebilmesi ve bu süreçte verimliliğin arttırılmasına yönelik ortaya çıkan çalışmalar kesikli seri üretim sistemlerinden olan montaj hatlarını çeşitlendirmiştir. Düz hat mantığıyla çalışan montaj hatları, zamanla şekil değiştirerek U tipi montaj hatları, iki taraflı montaj hatları, paralel montaj hatları olmak üzere farklı tasarım modelleri ortaya çıkmıştır. Değişen tasarımlar yeni problemleri de beraberinde getirmiştir. Gökçen ve diğerleri (2006) tarafından ortaya konulan PMHDP de bu yeni problemlerden birisi olarak kaynaklarda yerini almıştır.

Montaj hatlarındaki verimlilik artışı, kapasiteyi artıracağı ve üretim maliyetlerini azaltacağı için, montaj hatlarının düzgün bir şekilde dengelenmesi günümüz endüstrisinde oldukça önem arz etmektedir. PMHDP'nin amacı, işyeri sayısını (veya operatör sayısını) enküçüklemektir (Gökçen ve diğerleri, 2006; Scholl ve Boysen, 2009).

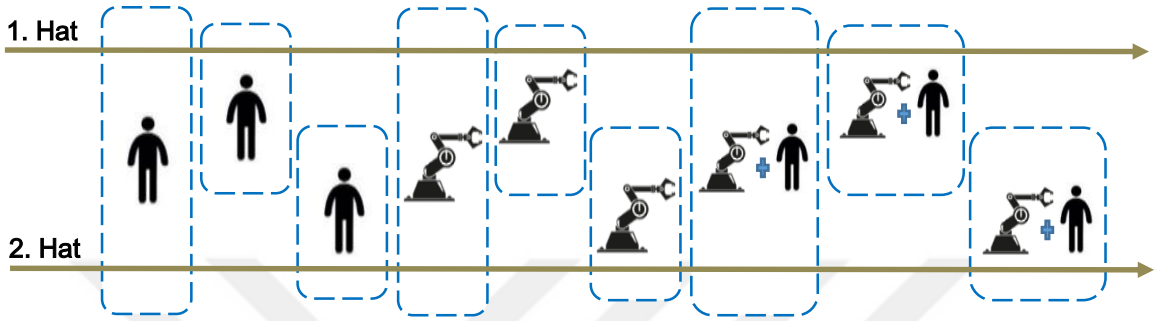
Eğer görevlerin maliyet oranları aynı alınırsa, bu durumda maliyet tabanlı PMHD problemi (MPMHDP), PMHDP'ne dönüşmektedir. Bu nedenle, MPMHDP, zaman tabanlı PMHDP'nin genelleştirilmiş halidir. PMHD, NP-Zor sınıfında olan bir kombinatoryal eniyileme problemidir (Gökçen ve diğerleri, 2006; Scholl ve Boysen, 2009). Dolayısıyla, MPMHDP de NP-Zor bir problemdir.

MPMHDP'nde, her hatta montajı yapılacak olan ürün önceden belirlidir. Başka bir ifadeyle, paralel düz hatlar her ürünün montajını yapabilecek esnekliğe sahip değildir. Bu nedenle, MPMHDP'nde, ürünlerin hatlara atanması problemi ele alınmaz. Eğer hatların her biri her ürünün montajını yapabilecek esneklikte olursa, ürünlerin hatlara atanması problemi de ele alınmalıdır. Ürünlerin hatlara atanmasını da dikkate alarak, toplam üretim maliyetini enküçükleyecek şekilde birden fazla düz hattın eş zamanlı olarak dengelendiği bu problem, Maliyet tabanlı Çok Ürünlü PMHD (MÇÜPMHD) problemi olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca, operatörlerin paralel hatlar arasındaki yürüme zamanları dikkate alındığında, toplam üretim maliyetinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Yürüme zamanlarının dikkate alındığı MPMHD problemi, Maliyet tabanlı Yürüme Zamanlı PMHD (MYZPMHD) problemi olarak isimlendirilmiştir.

Amen (2000a) çalışmasında maliyet tabanlı MHDP'ni önermiştir. Amen'in önerdiği problemde ele alınan maliyet hesaplanırken, görevlerin zorluğunu dikkate alarak, bir istasyona atanan en zor görevin o istasyonun maliyetini belirlediği kabulü yapılmıştır. Problemde görev zamanları dışında görevler zorluklarına göre maliyet oranları belirlenmiştir. Tez çalışmasında ise maliyetler yapılması gereken görevlerin zorluğuna göre değil, görevi gerçekleştirecek işgücü tipine göre belirlenmektedir. Farklı tipteki işgüçlerinin maliyetleri (insan tipi için ücret, robot tipi için satınalma maliyeti ve enerji maliyeti gibi) birim maliyete indirgenerek görev zamanlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu yönüyle Amen'in (2000a) çalışmasındaki maliyet tabanlı başlığından çok, tez çalışmasının maliyet yönelimli (cost-driven) olarak nitelendirilmesi daha uygun görülmüştür.

4. PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MODEL

Tezde çalışılan insan-robot etkileşimli paralel montaj hattı probleminde aynı ürünün üretildiği ve aynı görev önceliklerine sahip 2 adet birbirine paralel montaj hattı bulunmaktadır (Şekil 4.1).

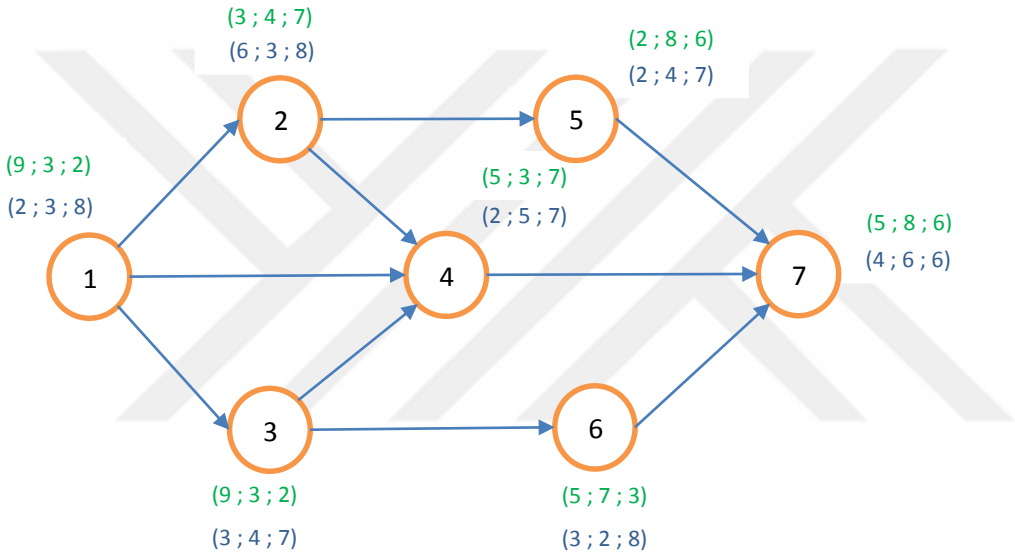


Şekil 4.1. İstasyonlara atanabilecek işgücü tipleri

Şekil 4.1'de paralel iki hatta çalışabilecek insan, robot ve insan-robot tipindeki işgüçleri için hatlardaki tüm olası çalışma şekilleri gösterilmiştir. Her bir görevi gerçekleştirebilecek işgücü tipleri; sadece insan, sadece robot ve insan-robot olarak heterojen bir yapıdadır. Bu üç farklı işgücünün görev zamanları ve birim işgücü maliyetleri birbirinden farklıdır. PMHDP'nde amaç bilinen bir çevrim süresi içerisinde işgücü maliyeti ve istasyon sayısının enküçüklenmesidir. Problemin varsayımları;

- Görevler daha fazla alt işlemlere (operasyonlara) bölünemez.
- Her istasyona sadece bir işgücü atanabilir.
- Tüm görevler atanmalıdır.
- Her bir montaj hattında tek çeşit ürün montajlanmaktadır.
- Görevlerin öncelik ilişkisi bellidir, görevler öncelik ilişkisi dikkate alınarak atanmalıdır.
- Görevler kendi hatlarında yapılmak zorundadır.
- Bir istasyona atanan görevlerin toplam süresi, çevrim zamanını aşamaz.
- Üretim 2 montaj hattında da aynı zamanda başlayıp aynı zamanda sonlanmaktadır.
- 3 farklı işgücü tipi için işlem zamanları bilinmektedir ve sabittir.
- İstasyon açma maliyeti bilinmektedir ve sabittir.
- Çevrim zamanı önceden belirlidir.

- Transfer maliyetleri dikkate alınmamaktadır ve hatlar gecikmesiz hat mantığıyla çalışmaktadır.
- Üretilen ürünlerde kalite problemi yaşanmamaktadır.
- Malzeme taşıma, yükleme ve boşaltma, hazırlık ve/veya aparat değiştirme zamanları ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.
- İşgüçleri hatların her iki tarafında da çalışılabilmektedir.
- İşgücünde konum kısıtı bulunmamaktadır.
- Bazı görevlerin beraber yapılmaması gerekmektedir.



Şekil 4.2. Görevlerin şebeke ile gösterimi

Şekil 4.2'de 7 görevden oluşan bir problem için öncelik ilişkileri ve maliyetler görülmektedir. Diyagramda işlem zamanları yeşil renk ile maliyetler ise mavi renk ile temsil edilmiştir. İşlem zamanları ve maliyet değerleri sırasıyla insan, robot ve insan-robot olarak verilmiştir. Problem için önerilen matematiksel modelin bileşenleri aşağıda verilmiştir.

<u>İndisler</u>

t	: Zaman indisi	H	: Hat indisi
k	: İstasyon indisi	J	: İşgücü tipi indisi
i, i'	: Görev indisleri	r/v	: öncül/ardıl görev indisleri

Karar Değişkenleri

$$X_{hijk} = \begin{cases} 1 & \text{h hattındaki i görevi, j işgücüyle, k istasyonunda yapılırsa 1} \\ 0 & \text{diğer durumda 0} \end{cases}$$

$$Z_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{j işgücü k istasyonuna atanırsa 1,} \\ 0 & \text{diğer durumda 0} \end{cases}$$

$$Q_k = \begin{cases} 1 & \text{k istasyonu açılırsa 1} \\ 0 & \text{diğer durumda 0} \end{cases}$$

Parametreler

S_{ij} : i görevi j işgücü tipiyle yapıldığında işgücü maliyeti

t_{ij} : i görevi j işgücü tipiyle yapıldığında işlem süresi

α : istasyon açma maliyeti (maliyet değeri=0,001 TL)

c : Çevrim zamanı

H : Toplam hat sayısı

K_{maks} : Teorik en büyük istasyon sayısı

J : Toplam işgücü tipi sayısı

N : Bir hattaki toplam görev sayısı

4.1. MPMHDP İçin Önerilen 0-1 Tamsayılı Matematiksel Model

Bu bölümde tanımı yapılan problem için geliştirilen 0-1 tamsayılı matematiksel modelin formülasyonu ve açıklamalarına yer verilmiştir.

Matematiksel model

$$\min \sum_{h=1}^{H} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} S_{ij} * X_{hijk} + \sum_{k=1}^{K} \alpha * Q_k \qquad (4.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^{J} Z_{jk} \leq 1 \qquad \text{tüm k = 1, …, K} \qquad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} x_{hijk} = 1 \qquad \text{tüm i = 1, …, n; h=1, ..., H} \qquad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}(k*x_{hrjk}-k*x_{hvjk})\geq 0 \qquad v=1,...n, r\in P_v, h=1...H \qquad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^{n}t_{ij}*x_{hijk}+\sum_{i=1}^{n}t_{ij}*x_{(h+1)ijk}\leq c*Z_{jk} \quad \text{tüm h=1, …, H-1; j=1, …, J; k=1, …, K} \qquad (4.5)$$

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}(X_{hijk}+X_{hi'jk})\leq 1 \qquad \text{tüm k=1, …, K; (i, i')} \in S'' \qquad (4.6)$$

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{J}X_{hijk}\leq K_{maks}*Q_k \qquad \text{tüm k = 1, …, K} \qquad (4.7)$$

$$Q_{k-1}\geq Q_k \qquad \text{tüm k = 1, …, K} \qquad (4.8)$$

$$X_{hijk}, Z_{jk}, Q_k \in \{0,1\} \qquad \text{tüm h, i, j, k} \qquad (4.9)$$

Oluşturulan matematiksel modelde; Eş. 4.1 amaç fonksiyonunda, maliyet enküçüklenmesi dikkate alınmıştır. İstasyon açma maliyetinin 0,001 alınmasının sebebi istasyon sayısının da ikincil bir amaç olarak en küçüklenmesinin sağlanmasıdır. Eş. 4.2, her bir istasyona en fazla bir tip işgücü atanmasını veya hiç atanmamasını sağlamaktadır. Eş. 4.3, h hattında her bir i görevinin, herhangi bir istasyona, bir işgücü tipiyle atanmasını sağlamaktadır. Eş. 4.4, görevlerin öncelik ilişkisini ihlal etmeden atanmalarını, Eş. 4.5, bir istasyona atanan görevlerin toplam süresinin çevrim zamanını aşmamasını sağlamaktadır. Eş. 4.6 ile beraber yapılamayan görevlerin farklı istasyonlara atanması sağlanmaktadır. Eş. 4.7 istasyon açılması ile ilgili istasyona görev atanması arasındaki ilişkiyi düzenleyen kısıttır. Eş. 4.8 ise ataması yapılan istasyonların sıralı bir şekilde açılmasını sağlamaktadır. Değişkenlerin alabileceği değerler Eş. 4.9 ile belirlenmektedir.

4.1.1. Yeni veri setlerinin oluşturulması

Daha önceki paralel montaj hattı çalışmalarında, veri setlerinde tek tip işgücü için öncelik ve görev zamanları tanımlanmıştır. Tez kapsamında ele alınan problemin yapısında farklı işgücü tipi (insan, robot, insan-robot) bulunması nedeniyle problemin çözümde kullanılabilmesi için yeni veri setlerinin oluşturulması gerekmiştir. Bu nedenle literatürde

yer alan Bowman, Sawyer, Tonge vb. mevcut problem görev setleri kullanılarak 3 farklı işgücü tipi için yeni görev setleri türetilmiştir.

Örneğin literatürdeki 8 görevli Bowman veri setindeki görev zamanları PMHDP'nde insan işgücü tipi için kullanılmış, robot ve insan-robot tipindeki işgüçleri için görev süreleri, insan işgücü tipi için belirlenen görev sürelerinin bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Katsayı değeri robot için 0.33, insan-robot için 0.5'dir. Bu katsayılar robot ve insan-robot etkileşimli sistemler üzerine uzmanlaşmış kişiler ve sektör temsilcilerinin verdikleri bilgiler ışığında yaklaşık olarak belirlenmiştir. İş gücü tipine göre birim zamandaki maliyet katsayıları yine aynı uzman sektör temsilcilerinden alınan veriler ışığında yaklaşık olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir görevin yine herhangi bir işgücü ile yapıldığında oluşan maliyet ilgili işin görev zamanı ile ilgili işgücü tipinin birim zamandaki maliyeti çarpılarak hesaplanmıştır. Bowman-1 adıyla, özel üretim ortamlarının (operatör görüşü, gözle kontrol, iş güvenliği, kimyasal durumlar, aşırı soğukluk, aşırı sıcaklık vb.) bazı durumlarda farklı işgücü tiplerinin farklı işgücü sürelerine sahip olabileceği öngörüsüyle alternatif bir veri seti daha oluşturulmuştur. Veri seti oluşturulurken daha önce kullanılan katsayılar dışında rassal olarak bazı görevlerin işlem süresi katsayıları farklı alınmıştır. Oluşturulan her iki veri seti tipinde de görevin özellikleri gereği beraber yapılamayacak görevler tanımlanmıştır. Literatürde yer alan problemlerden 8 görevden 89 göreve kadar olan örnek problem veri setleri anlatılan biçimde PMHDP'ne uyarlanmıştır. Çizelge 4.1'de modelde kullanılan veri setlerinin elde edildiği ana veri setleri görülmektedir.

Çizelge 4.1. Ana veri setleri

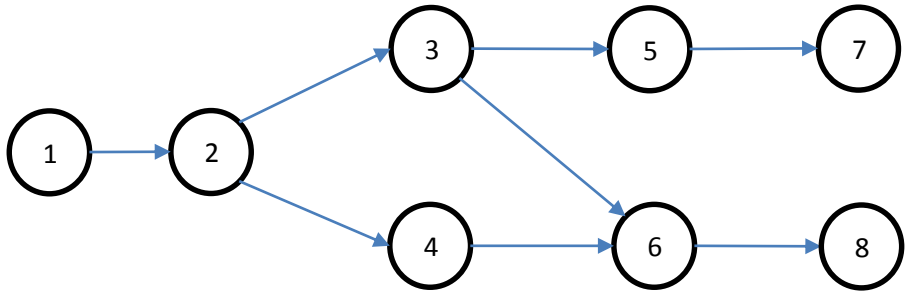
Veri Setleri	Bir Hattaki Görev Sayısı	Görevlerin Toplam Süresi (dk)
Bowman	8	75
Jackson	11	46
Mitchell	21	105
Sawyer	30	324
Gunther	35	483
Kilbrid	45	552
Hahn	53	14026
Tonge	70	3510
Lutz2	89	485

Oluşturulan veri setlerinde görev maliyetleri Çizelge 4.2'de katsayılar kullanılarak elde edilmiştir. Birim zamandaki maliyetler, insan işgücü tipi için aylık ücret, standart robotlar için satın alma ve enerji giderleri, insan-robot işgücü tipi için de işbirlikçi robotların satın alma ve enerji gideri ve insan için aylık ücret giderinin birim zamandaki değerleri toplanarak elde edilmiştir. Kullanılan insan işgücü maliyeti Dünya ortalamasındaki işçi ücretlerine yakın alınmaya çalışılmıştır. Standart ve işbirlikçi robotların satın alma değerleri çalışmanın yapıldığı tarihteki piyasa verilerinden yaklaşık olarak elde edilmiştir. "Bu verilerin ülkeden ülkeye farklılıklar gösterebileceği unutulmamalıdır."

Çizelge 4.2. İşgücü maliyetlerinin hesaplanması

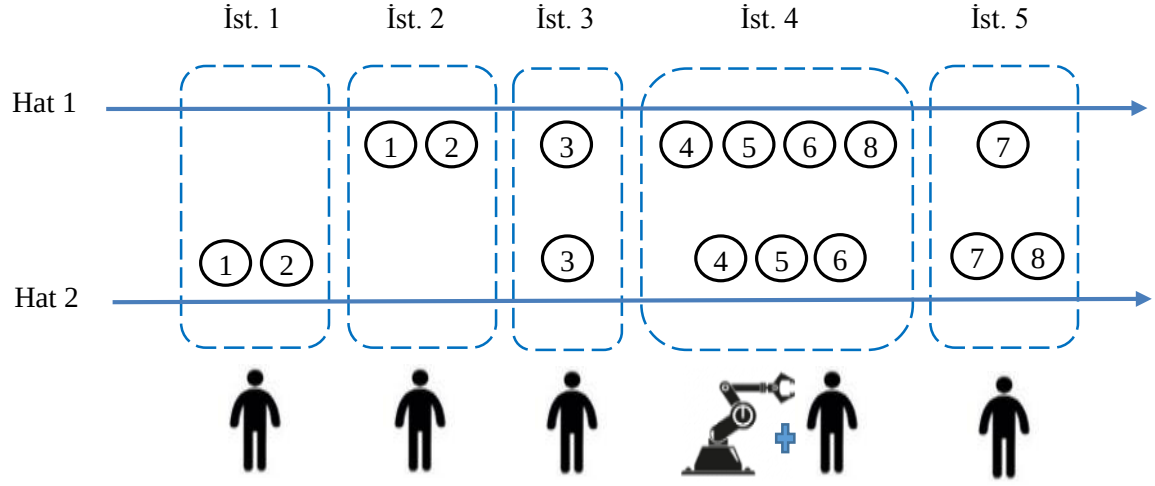
	Gider Kalemleri	₺/dk	Toplam ₺/dk
İnsan	Maaş	0,069	0,07
Standart Robot	Satın Alma	0,193	0,24
	Enerji	0,050	
İşbirlikçi Robot + İnsan	Satın Alma	0,048	0,15
	Enerji	0,033	
	Maaş	0,069	

Elde edilen dakika bazında birim maliyet katsayıları ile yine daha önce oluşturulan görev zamanları çarpılarak 3 işgücü tipine göre görev maliyetleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Bowman-1 öncelik ilişki diyagramı

Şekil 4.3'de Bowman-1 öncelik ilişki diyagramı verilmiştir. Bu diyagrama ek olarak 1 ve 4, 3 ve 6, 6 ve 8 nolu görevlerin beraber yapılamama kısıtı bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Matematiksel model çözüm örneği

8 görevli Bowman-1 veri seti için, çevrim süresi 34 saniye alınarak yapılan koşturum sonuçları Şekil 4.4'de verilmiştir. 1, 2, 3 ve 5. istasyona işgücü olarak insan, 4. istasyona insan-robot işgücü olarak atanmıştır. Maliyet 10,605 birim ve istasyon sayısı 5 adettir.

4.1.2. Matematiksel model çözüm ve sonuçları

Oluşturulan veri setleri farklı çevrim süreleri için tekrar koşturulmuştur. Örneğin öncüllük ilişkisi aynı olan Bowman ve Bowman-1 veri setleri 3 farklı çevrim süresine göre (34, 51 ve 68 dakika) çözülmüş, toplamda 6 farklı koşturum yapılmıştır. Önerilen matematiksel model sonuçları 8 GB Ram ve Intel(R) Core(TM) i7-5500U @ 2.4 GHz işlemci özelliklerine sahip bilgisayarda GAMS arayüzünde CPLEX 12.8 çözücüsüyle elde edilmiştir. Problemler için çözüm süresi en fazla 7200 saniye olarak belirlenmiştir. Matematiksel modelden elde edilen sonuçlar değerlendirilirken yüzdesel fark değeri kullanılmıştır. Yüzdesel fark 100*(en iyi tahmin-en iyi tamsayı çözümü)/(en iyi tahmin) formülüyle elde edilmiştir. Her bir probleme ait 2 veri setinde 3 farklı çevrim süresi için elde edilen sonuçların ortalaması alınarak ortalama çözüm süresi ve ortalama yüzdesel fark elde edilmiştir. Modelin çözüm sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Veri setlerine göre yapılan koşturumlarda, Mitchell veri setine kadar matematiksel model ile hızlı bir şekilde sonuçlar alınmıştır. Sawyer veri setleri için ortalama çözüm zamanı 3630 saniye seviyesinde olmuştur. Gunther, Kilbrid ve Hahn veri setleri için benzer zamanlarla olurlu sonuçlar elde edilmiştir. Son iki veri seti olan Tonge ve Lutz2 veri setleri için 7200 saniye boyunca model çalışmış ve olurlu bir çözüm elde edilememiştir. Görev süreleri arttıkça 7200 saniye içerisinde çözülebilen veri setleri azalmaktadır. Bu problemin NP-Zor yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.3. Veri setlerinin koşturum sonuçları-1

Veri Setleri	Bir Hattaki Görev Sayısı	Örneklem Sayısı	Ort. Çözüm Zamanı (sn)	Ort. Yüzdesel Fark (%)
Bowman Bowman1	8	6	2,250	0
Jackson Jackson 1	11	6	2,880	0
Mitchell Mitchell-1	21	6	53,080	0
Sawyer Sawyer-1	30	6	3630,910	0,003
Gunther Gunther-1	35	6	4060,940	0,004
Kilbrid Kilbrid-1	45	6	1599,370	0,006
Hahn Hahn-1	53	6	4610,660	0
Tonge Tonge-1	70	6	7200,000	Çözüm Bulunamadı
Lutz2 Lutz2-1	89	6	7200,000	Çözüm Bulunamadı

Çizelge 4.4 dikkate alındığında 54 farklı veri seti içerisinde 33 adedinde eniyi sonuca ulaşılmış, 9 adedinde olurlu sonuca ulaşılmış, 12 adedinde ise olurlu sonuç bulunamamıştır. Modelin 70*2'lik göreve sahip veri setlerine kadar üst sınır olan 2 saatlik (7200 saniye) koşturumlar için etkin çözümler bulduğu görülmüştür.

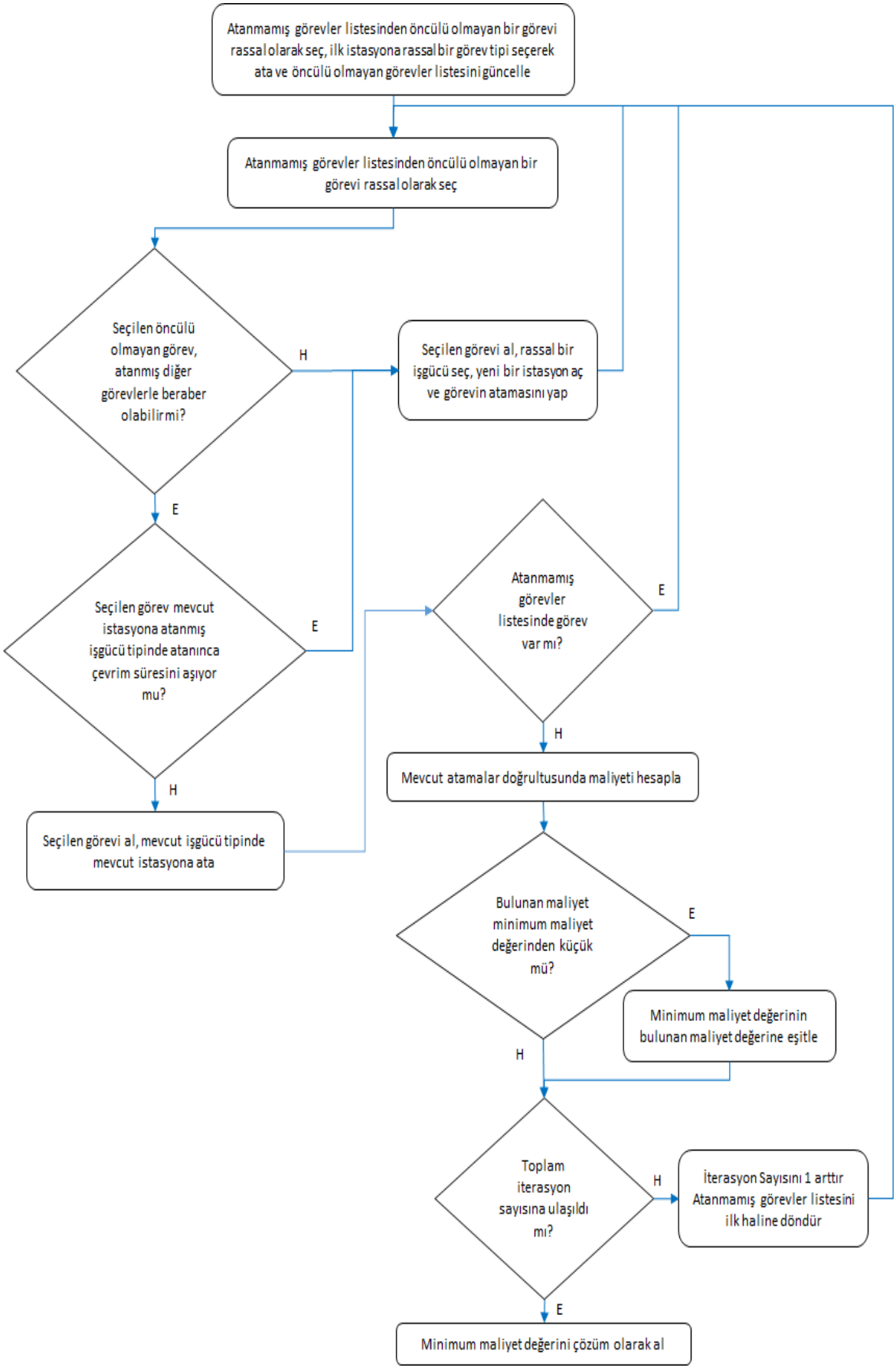
Çizelge 4.4. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-1

Veri Setleri	Örnek Sayısı	Eniyi Sonuç	Olurlu Sonuç
Bowman Bowman1	6	6	-
Jackson Jackson 1	6	6	-
Mitchell Mitchell-1	6	6	-
Sawyer Sawyer-1	6	3	3
Gunther Gunther-1	6	3	3
Kilbrid Kilbrid-1	6	5	1
Hahn Hahn-1	6	4	2
Tonge Tonge-1	6	Çözüm Bulunamadı	Çözüm Bulunamadı
Lutz2 Lutz2-1	6	Çözüm Bulunamadı	Çözüm Bulunamadı

4.2. MPMHDP Problemi İçin Önerilen COMSOAL Algoritması

Gerçek hayat problemlerinde genellikle MHDP'nin 40-50 görev seviyesinde olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda önerilen matematiksel modelinin gerçek hayat problemlerinde uygulanabileceği görülmüştür. Ancak bazı MHDP'nin görev sayısının çok daha fazla olduğu durumlarda, matematiksel modelin yetersiz kalabileceği, bu nedenle sezgisel metodların bu seviyedeki problemlerde daha etkin sonuç verebileceği öngörülmektedir.

Bu sebeple MHDP'nde sıklıkla kullanılan ve temel bir sezgisel metod olan COMSOAL algoritması bu çalışmada ele alınan probleme göre uyarlanmıştır. COMSOAL algoritmaları anlaşılması ve uygulaması kolay olan arama metodlarıdır. Her ne kadar rastgele arama algoritmaları en hızlı sayısal eniyileme teknikleri olmasa da, klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında bazı belirleyici avantajlar sergilerler (Fogel, 1995). COMSOAL'da; yerel en küçüğe takılma sorunun düşük bir olasılık olması, algoritmaların basit olması ve karmaşık programlama bilgisi gerektirmemesi ve kullanım alanlarının çokluğu avantajları olarak kabul edilebilir. Çalışmada ele alınan problem için uyarlanan metodun akış diyagramı Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.5. COMSOAL akış algoritması

COMSOAL Adımları

Ele alınan maliyet yönelimli PMHDP'ne özgü modellenen COMSOAL algoritmasının adımları şunlardır;

Adım 1: Atanmamış görevlerden öncülü olmayan bir görevi rassal seç, rassal bir görev tipi seç ve ilk istasyona ata. Listeleri güncelle

Adım 2: Atanmamış görevlerden öncülü olmayan yeni bir görevi rassal seç

Adım 3: Seçilen rassal görev mevcut istasyona daha önceden atanmış görev/görevlerle beraber olabilir mi? Evet ise Adım 4'e git. Hayır ise Adım 7'ye git

Adım 4: Seçilen rassal görev mevcut istasyona atanmış görev tipiyle atandığında çevrim süresini aşıyor mu? Hayır ise Adım 5'e git. Hayır ise Adım 7'ye git.

Adım 5: Seçilen görevi mevcut istasyona mevcut işgücü ile ata, Listeleri güncelle.

Adım 6: Atanmamış görevler listesinde görev kaldı mı? Evet ise Adım 2'ye git. Hayır ise Adım 8'e git.

Adım 7: Yeni bir istasyon aç, rassal bir işgücü tipi seç ve seçilen rassal görevi ata. Listeleri güncelle. Adım 6'ya git

Adım 8: Amaç fonksiyonu değerini hesapla. Mevcut amaç fonksiyon değerinden küçükse, yeni maliyet değerini elde tut değil ise eski maliyet değerini tut.

Adım 9: Toplam iterasyon sayısına ulaşıldı mı? Evet ise Adım 10'a git. Hayır ise tüm listeleri ilk haline getir, iterasyon sayısını 1 arttır ve Adım 1'e git.

Adım 10: En düşük maliyetli çözümü sonuç olarak al, algoritmayı sonlandır.

Pseudo (Sözde) Kod

1. En iyi çözüm $Ç_E = M_{Big}$, Çevrim zamanını (ÇZ) tanımla, iterasyon sayısı (IT) ← 1, toplam çevrim zamanı (TÇ) ← 0, iterasyon değeri (ID=3*N), açılan istasyon sayısı K_S ←1,
2. While (IT ≤ ID)
3. Öncelik ilişkilerini sağlayan atanmamış görevlerden rassal bir görev seç,
4. If (Beraber olmama kriterini sağlıyor mu ?)
5. If (TÇ ≤ ÇZ)
6. Mevcut istasyona, istasyondaki görev tipinde seçilen görevi ata, 9'a git
7. Else 8'e git,
8. Else $K_S = K_S + 1$, TÇ ← 0, yeni istasyona rassal işgücünü ve seçilen görevi ata,
9. If (Tüm görevler atandı mı?)
10. Çözümü hesapla ($Ç_K$), IT ← IT+1, Ks ← 1, TÇ ← 0,
11. If ($Ç_K < Ç_E$)
12. $Ç_E$ ← $Ç_K$, atamaları en iyi atama listesine ekle, 2'ye git,
13. Else 2'ye git,
14. Else 3'e git,
15. En iyi atamaları ve maliyeti ($Ç_E$) ver.

Şekil 4.5'de gösterilen akış diyagramı üzerinden 8 GB Ram ve Intel(R) Core(TM) i7-5500U @ 2.4 GHz işlemci özelliklerine sahip bilgisayarda C# programlama diliyle kodlanan model problem yapısına uygun türetilen veri setleri için koşturulmuş ve Çizelge 4.5'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Veri setlerinin koşturum sonuçları-2

Ör. Set	Görev Sayısı (N*2)	C (dk)	Matematiksel Model		COMSOAL Sonuçları			
			Çözüm Süresi (sn)	Maliyet	Koş. Süresi 5*N (sn)	Enk. Maliyet	Yüzdesel Fark	Ort. Maliyet
8	16	34	6	10,605 *	40	10,605 *	0,000	10,606
8	16	51	1,5	10,604 *	40	10,605	-0,009	10,605
8	16	68	1	10,603 *	40	10,605	-0,019	10,606
8-1	16	34	3	10,605 *	40	10,605 *	0,000	10,606
8-1	16	51	1	10,604 *	40	10,605	-0,009	10,606
8-1	16	68	1	10,603 *	40	10,605	-0,019	10,606
11	22	20	2,5	6,604 *	55	6,609	-0,076	6,610
11	22	30	2	6,603 *	55	6,608	-0,076	6,609
11	22	40	2	6,603 *	55	6,609	-0,091	6,610
11-1	22	20	4,8	4,987 *	55	5,074	-1,745	5,103
11-1	22	30	2,5	4,986 *	55	5,094	-2,166	5,107
11-1	22	40	3,5	4,986 *	55	5,074	-1,765	5,104
21	42	26	139	15,208 *	105	15,218	-0,066	15,222
21	42	39	43,5	15,206 *	105	15,217	-0,072	15,220
21	42	52	29,5	15,206 *	105	15,222	-0,105	15,223
21-1	42	26	69	15,008 *	105	15,120	-0,746	15,185
21-1	42	39	29	15,006 *	105	15,123	-0,780	15,164
21-1	42	52	8,5	15,006 *	105	15,124	-0,786	15,203
30	60	50	7200	45,613 **	150	46,936	-2,900	47,095
30	60	75	7200	45,609 **	150	47,031	-3,118	47,154
30	60	100	38,5	45,607 *	150	46,933	-2,907	47,116
30-1	60	50	7200	44,014 **	150	45,537	-3,460	46,177
30-1	60	75	73	44,01 *	150	46,137	-4,833	46,257
30-1	60	100	74	44,008 *	150	46,039	-4,615	46,236
35	70	80	997,143	67,213 *	175	69,042	-2,721	69,340
35	70	120	271,5	67,209 *	175	69,349	-3,184	69,562
35	70	160	7200	67,207 **	175	69,041	-2,729	69,360
35-1	70	80	7200	66,214 **	175	69,136	-4,413	69,341
35-1	70	120	7200	66,21 **	175	68,643	-3,675	69,160
35-1	70	160	1497	66,208 *	175	68,835	-3,968	69,118
45	90	110	7200	77,81 **	225	79,447	-2,104	79,756
45	90	165	118	77,807 *	225	79,756	-2,505	79,933
45	90	220	220	77,806 *	225	79,450	-2,113	79,753
45-1	90	110	1202,273	71,411 *	225	74,756	-4,684	75,038
45-1	90	165	608	71,409 *	225	75,154	-5,244	75,235
45-1	90	220	248	71,408 *	225	75,056	-5,109	75,235
53	106	2150	7200	1970,014 **	265	2027,065	-2,896	2030,664
53	106	3225	487	1970,009 *	265	2020,062	-2,541	2025,463
53	106	4300	281	1970,007 *	265	2021,062	-2,592	2024,463
53-1	106	2150	7200	1850,03 **	265	1955,061	-5,677	1963,462
53-1	106	3225	5296	1850,018 *	265	1953,060	-5,570	1958,865
53-1	106	4300	7200	1850,017 *	265	1954,068	-5,624	1962,464
70	140	350	7200	-	350	506,287 **	-	511,508
70	140	525	7200	-	350	511,186 **	-	512,543
70	140	700	7200	-	350	510,077 **	-	511,843
70-1	140	350	7200	-	350	506,888 **	-	508,308
70-1	140	525	7200	-	350	506,890 **	-	507,887
70-1	140	700	7200	-	350	505,885 **	-	507,284
89	178	400	7200	-	445	719,105 **	-	721,108
89	178	600	7200	-	445	717,111 **	-	720,505
89	178	800	7200	-	445	720,112 **	-	721,510
89-1	178	400	7200	-	445	714,116 **	-	714,912
89-1	178	600	7200	-	445	713,101 **	-	714,504
89-1	178	800	7200	-	445	711,107 **	-	713,908

*eniyi çözüm, ** olurlu çözüm

Problem yapısının NP-Zor yapıda olması nedeniyle matematiksel model ile belli bir görev sayısından sonra olurlu sonuç elde edilememesi beklenen bir durumdur. Ele alınan problem için geliştirilen matematiksel model ile 53'lük veri setinden sonra olurlu sonuç bulunamamıştır. Çizelge 4.5 dikkate alındığında, COMSOAL ile 70*2 (paralel iki 70 görevli hat) görev sayısına sahip problemlere kadar matematiksel model ile 2 problem setinde aynı eniyi değeri elde edilirken diğer problem setlerinde de matematiksel modelin daha etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat COMSOAL algoritması ile matematiksel model ile olurlu sonuç elde edilemeyen 70*2'lik ve 89*2'lik veri setlerinde de olurlu sonuçlar elde edilmiştir. COMSOAL algoritması için koşturum süreleri bir hattaki görev sayısı 5 ile çarpılarak (N*5) hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-2

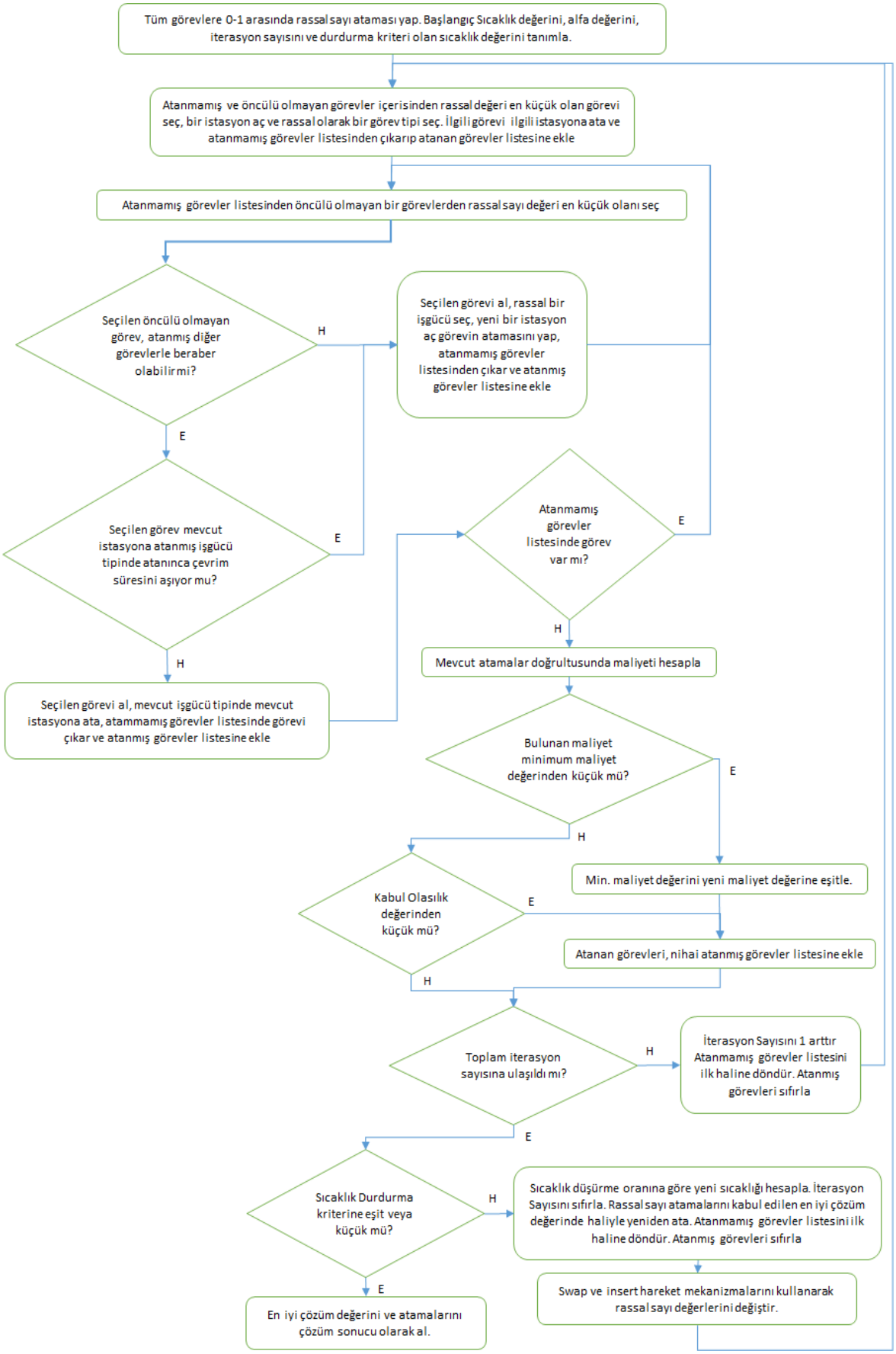
Veri Setleri	Örnek Sayısı	COMSOAL Sonuçları	
		Eniyi Sonuç	Olurlu Sonuç
Bowman Bowman1	6	2	4
Jackson Jackson 1	6	*	6
Mitchell Mitchell-1	6	*	6
Sawyer Sawyer-1	6	*	6
Gunther Gunther-1	6	*	6
Kilbrid Kilbrid-1	6	*	6
Hahn Hahn-1	6	*	6
Tonge Tonge-1	6	*	6
Lutz2 Lutz2-1	6	*	6

Çizelge 4.6'de 54 farklı veri seti içerisinde 2 adet örnek problem setinde eniyi sonuca ulaşırken, 52 adedinde ise olurlu sonuca ulaşıldığı gösterilmiştir. COMSOAL algoritmasından elde edilen sonuçlar matematiksel model sonuçlarıyla karşılaştırıldığında (en iyi çözüm sayısının azlığı) çözüm kalitelerinin arttırılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple problem çözümünde daha etkin bir sezgisel metodun kullanılmasının gerekli olduğu düşünülmüştür. Bir sonraki bölümde geliştirilen sezgisel metod anlatılmaktadır.

4.3. MPMHDP İçin Ön erilen Tavlama Benzetimi (TB) Algoritması

COMSOAL algoritması ile Tonge, Tonge-1, Lutz2, Lutz2-1 örnek problem setlerinde matematiksel modelin bulamadığı uygun çözümler bulunmuştur. COMSOAL algoritması ile elde edilen çözümlerin kalitesini arttırmak amacıyla montaj hattı literatüründe etkin sonuçlar verdiği bilinen, literatürde yer alan çalışmalarda sıkça tercih edilen ve problem uygun bir çözüm metodu olan Tavlama Benzetimi (TB) algoritması bu bölümde sunulmuştur.

TB, katıların fiziksel tavlama sürecinden hareketle, Kirkpatrick ve diğerleri (1983) tarafından geliştirilmiş, stokastik bir arama yöntemidir. Algoritma iteratif olarak ilerlemekte ve çözüm kalitesini artırmak için çeşitli hareket mekanizmaları kullanılmaktadır. Çözüm kalitesini artıran hareketler sonraki adımda başlangıç çözümü olarak kabul edilirken, çözüm de iyileştirme yapmayan hareketler yerel en iyiye takılmamak için belirli bir yüzde ile kabul edilmektedir. Kötü çözümün kabul olasılığında ise Boltzmann olasılık kullanılmaktadır. Büyük boyutlu problemin çözümünde, bilgiyi kullanması ve aramayı iyi yapması nedeniyle, sıklıkla başvurulan bir çözüm yöntemi olmaktadır. Tez çalışması kapsamında ele alınan probleme uyarlanan TB algoritmasının akış şeması Şekil 4.6 ‘da görülmektedir.



Şekil 4.6. TB algoritması

TB algoritması adımları

Ele alınan maliyet yönelimli PMHDP'ne özgü modellenen algoritmanın adımları;
Adım 1: Tüm görevlere 0-1 arasında rassal sayı ata.
Adım 2: Atanmamış görevlerden öncülü olmayan görevler içerisinden rassal sayı değeri en küçük olanı seç, rassal bir görev tipi seç ve ilk istasyona ata. Listeleri güncelle
Adım 3: Atanmamış öncülü olmayan görevlerden rassal sayı değeri en küçük olan yeni bir görevi seç
Adım 4: Seçilen rassal görev mevcut istasyona daha önceden atanmış görev/görevlerle beraber olabilir mi? Evet ise Adım 5'e git. Hayır ise Adım 8'e git
Adım 5: Seçilen rassal görev mevcut istasyona atanmış görev tipiyle atandığında çevrim süresini aşıyor mu? Hayır ise Adım 6'ya git. Hayır ise Adım 8'e git.
Adım 6: Seçilen görevi mevcut istasyona mevcut işgücü ile ata, Listeleri güncelle.
Adım 7: Atanmamış görevler listesinde görev kaldı mı? Evet ise Adım 3'e git. Hayır ise Adım 9'a git.
Adım 8: Yeni bir istasyon aç, rassal bir işgücü tipi seç ve seçilen rassal görevi ilgili istasyona ata. Listeleri güncelle. Adım 7'ye git
Adım 9: Amaç fonksiyonu değerini hesapla. Mevcut amaç fonksiyon değerinden küçükse atamaları ve yeni maliyet değerini en iyi maliyet değeri olarak al, değil ise rassal bir sayı oluştur bu sayı kabul olasılık değerinden küçük ise sadece maliyeti kabul et, değil ise eski maliyet değerini tut.
Adım 10: Toplam iterasyon sayısına ulaşıldı mı? Evet ise Adım 11'a git. Hayır ise tüm listeleri ilk haline getir, iterasyon sayısını 1 arttır ve Adım 2'ye git.
Adım 11: Sıcaklık durdurma kriterine ulaşıldı mı? Evet ise Adım 13'e git. Hayır ise Adım 12'ye git.
Adım 12. Yeni sıcaklığı belirle, iterasyon sayısını sıfırla, görevlere atanmış rassal sayı değerini en iyi çözüm değeri üzerinden ikili Swap ve Insert mekanizmalarını çalıştır ve görevler için rassal sayı değerlerini değiştir. Adım 2'ye geri dön.
Adım 13: En düşük maliyetli çözümü sonuç olarak al, algoritmayı sonlandır.

Pseudo (Sözde) Kod

1. En iyi çözüm $Ç_E = M_{Big}$, Görevlere Rassal Sayı ata $R_{ih} \leftarrow U(0,1)$, Durdurma kriterini (T_{stop}) ve Çevrim zamanını (ÇZ) tanımla, iterasyon sayısı (IT) ← 0, Toplam çevrim zamanı (TÇ) ← 0, K_s ← 1,kabul olasılığı ← $e^{-(Ç_E - Ç_K)/T}$
2. Başlangıç sıcaklığı (T=100), soğutma oranı (α=0,99), iterasyon değeri (ID=3*N),
3. While ($T > T_{stop}$)
4. While (IT < ID)
5. IT ← IT+1, insert ve swap mekanizmalarını kullanarak R_{ih}'leri değiştir,
6. Öncelik ilişkilerini sağlayan atanmamış görevlerden rassal sayısı büyük olanı al,
7. If (Beraber olmama kriterini sağlıyor mu ?)
8. If (TÇ ≤ ÇZ)
9. Mevcut istasyona, istasyondaki görev tipinde seçilen görevi ata, 12'git
   Else 11'ye git,
10. Else $K_S = K_S + 1$, TÇ ← 0, yeni istasyona rassal işgücünü ve seçilen görevi ata,
11. If (Tüm görevler atandı mı?)
12. Çözümü hesapla ($Ç_K$), istasyon sayısı (K_S ← 1), TÇ ← 0,
13. If ($Ç_K < Ç_E$)
14. $Ç_E \leftarrow Ç_K$, atamaları en iyi atama listesine ekle, 4'e git
15. Else if (U(0,1) < kabul olasılığı)
16. Mevcut atamaları al ve 4'e git,
17. Else 4'e git,
18. Else 6'e git,
19. T ←T*α, IT ← 0, istasyon sayısı (KS ← 1), TÇ ← 0, 3'e git
20. En iyi atamaları ve maliyeti ($Ç_E$) ver.

4.3.1. Parametre eniyilemesi

TB algoritmasında çözümün hızına ve kalitesine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Klasik deneysel tasarım metotları çok karmaşıktır ve uygulamada çeşitli zorluklarla karşılaşılmaktadır. Buna ek olarak, parametre sayısı arttıkça uygun parametre setini elde etmek için çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, uygun parametre setini belirlemek için SPSS-22 istatistiksel analiz programında Duncan gruplandırma metodu ile iterasyon sayısı, soğutma oranı ve başlangıç sıcaklığı parametre değerleri belirlenmiştir. TB algoritmasındaki parametrelerin en doğru değerlerini tespit edilebilmesi için 270 adet sonuç üzerinden istatistiksel analizler yapılmış ve uygun parametre değerleri elde edilmiştir.

Yüzdesel fark bağımsız değişkeni ile soğutma oranı, başlangıç sıcaklığı, iterasyon sayısı parametreleri arasındaki ilişki Çizelge 4.7'de görülmektedir. Yüzdesel fark bağımsız değişkeni üzerinde öncelikle herbir parametrenin kendi başına etkisi incelendiğinde soğutma

oranı ve iterasyon sayısının etkisinin bulunurken başlangıç sıcaklığının bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Parametrelerin 2 li ve 3 lü etkileşimlerinde istatistiksel olarak anlamlılık görülmemiştir (Sigma değerleri 0.05 hata seviyesinden büyük oldukları için)

Çizelge 4.7. Yüzdesel fark ile diğer parametrelerin ilişkisi

Bağımsız değişken: Yüzdesel_Fark					
Source	Type III Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	68,259[a]	53	1,288	,821	,814
Intercept	10647,423	1	10647,423	6790,996	,000
Sogutma_Oranı	41,164	2	20,582	13,127	,000
Baslangic_Sicakligi	1,915	5	,383	,244	,943
Iterasyon_Sayisi	22,365	2	11,182	7,132	,001
Sogutma_Oranı Baslangic_Sicakligi	,611	10	,061	,039	1,000
Sogutma_Oranı Iterasyon_Sayisi	,436	4	,109	,070	,991
Baslangic_Sicakligi Iterasyon_Sayisi	,447	10	,045	,029	1,000
Sogutma_Oranı Baslangic_Sicakligi Iterasyon_Sayisi	1,321	20	,066	,042	1,000

Yüzdesel fark bağımsız değişkeni için soğutma oranı değerlerinin gruplandırılması Çizelge 4.8'de görülmektedir. Duncan testine göre 0,99 soğutma oranı bir grup iken, 0.95 ve 0,90 soğutma oranı farklı bir grup olarak görülmektedir. İlk grupta yer alan 0,99 değeri kullanıldığında diğer grupta yer alan soğutma oranlarına göre daha etkin sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle gruplama sonucuna göre TB algoritmasında soğutma oranının 0,99 alınması uygun görülmüştür.

Çizelge 4.8. Soğutma oranı ve yüzdesel fark ilişkisi

Yüzdesel_Fark (Duncan a,b)			
Sogutma_Oranı	N	Gruplar 1	2
0,99	270	3,3214	
0,95	270		3,6951
0,9	270		3,8603
Sig.		1	0,126
The error term is Mean Square(Error) = 1,568. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 270,000. b. Alpha = 0,05.			

Yüzdesel fark bağımsız değişkeni için başlangıç sıcaklığı değerlerinin gruplandırılması Çizelge 4.9'de görülmektedir. Duncan testine göre başlangıç sıcaklığı değerlerinin tümünün istatistiksel olarak tek bir grup olduğu ve kullanılacak başlangıç sıcaklık değerinin sonuçta herhangi bir fark yaratmayacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle yüzdesel fark değerine göre aynı grupta yer alan sıcaklık değerlerinin işlem zamanı bağımsız değişkeni üzerinden istatistiksel bir farkının olup olmadığının incelenmesi ve bu doğrultuda hangi sıcaklık değerinin başlangıç sıcaklık değerine olarak alınması gerektiğine karar verilmesi uygun olacaktır.

Çizelge 4.9. Başlangıç sıcaklığı ve yüzdesel fark ilişkisi

Yüzdesel_Fark (Duncan a,b)		
Baslangic_Sicakligi	N	Gruplar
1000	135	3,56791
500	135	3,58037
200	135	3,59236
100	135	3,64934
50	135	3,66147
10	135	3,70214
Sig.		0,453
The error term is Mean Square(Error) = 1,568. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 135,000. b. Alpha = 0,05.		

Yüzdesel fark bağımsız değişkeni için iterasyon sayısı değerlerinin gruplandırılması Çizelge 4.10'da görülmektedir. Duncan testine göre toplam görev sayısı ile çarpılan 5 ve 3 katsayıları 1 grubu oluştururken, 1 katsayısı tek başına başka bir grubu oluşturmaktadır. İterasyon sayısı 5 ile 3'ün arasında istatistiksel bir farklılık olmadığı için bu iki değerden hangisinin iterasyon sayısı olarak seçilmesinin, işlem süresi bağımsız değişkeni için yapılan test ile belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.10. İterasyon Sayısı ve yüzdesel fark ilişkisi

Yüzdesel_Fark (Duncan a,b)			
Iterasyon_Sayisi	N	Gruplar	
		1	2
5	270	3,47307	
3	270	3,54705	
1	270		3,85668
Sig.		0,493	1
The error term is Mean Square(Error) = 1,568. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 270,000. b. Alpha = 0,05.			

İşlem zamanı (CPU_Time) bağımsız değişkeni ile soğutma oranı, başlangıç sıcaklığı, iterasyon sayısı parametreleri arasındaki ilişki Çizelge 4.11'de görülmektedir. Çizelge 4.7'de ifade edildiği şekliyle İşlem Zamanı bağımsız değişkeni üzerinde öncelikle herbir parametrenin kendi başına etkisi olup olmadığı, bu parametrelerin ikili kombinasyonlarının ve üçlü etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. (Sigma değerleri 0.05 hata seviyesinden büyük oldukları için)

Çizelge 4.11. İşlem zamanı ile diğer değişkenlerin ilişkisi

Bağımsız Değişken: CPU_Time					
Source	Type III Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	120380484,969[a]	53	2271329,905	6,071	,000
Intercept	79757918,431	1	79757918,431	213,185	,000
Sogutma_Oranı	68511673,558	2	34255836,779	91,562	,000
Baslangic_Sicakligi	3755241,028	5	751048,206	2,007	,075
Iterasyon_Sayisi	23165775,854	2	11582887,927	30,960	,000
Sogutma_Oranı Baslangic_Sicakligi	3243208,783	10	324320,878	,867	,564
Sogutma_Oranı Iterasyon_Sayisi	19767131,012	4	4941782,753	13,209	,000
Baslangic_Sicakligi Iterasyon_Sayisi	1015052,575	10	101505,258	,271	,987
Sogutma_Oranı Baslangic_Sicakligi Iterasyon_Sayisi	922402,158	20	46120,108	,123	1,000

İşlem zamanı bağımsız değişkeni için soğutma oranı değerlerinin gruplandırılması Çizelge 4.12'de görülmektedir. Duncan testine göre 0,90 ve 0,95 soğutma oranı bir grup iken, 0.99 soğutma oranı farklı bir grup olarak görülmektedir. Problemimizde istatistiksel olarak amaç fonksiyonu değerini daha iyi veren 0,99 soğutma oranı değeri daha önce seçildiği için işlem zamanında işlem süresi diğer soğutma oranlarına göre daha fazla çıkmasına rağmen soğutma oranı parametresinin 0,99 olarak kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 4.12. İşlem Zamanı ve soğutma oranı ilişkisi

CPU_Time (Duncan a,b)			
Sogutma_Oranı	N	Gruplar	
		1	2
0,9	270	74,17	
0,95	270	144,1	
0,99	270		723,1
Sig.		0,184	1
The error term is Mean Square(Error) = 374125,619. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 270,000. b. Alpha = 0,05.			

İşlem zamanı bağımsız değişkeni için başlangıç sıcaklığı değerlerinin gruplandırılması Çizelge 4.13'de verilmiştir. Duncan testine göre başlangıç sıcaklığı değerleri istatistiksel olarak 2 gruba ayrılmıştır. 50, 100, 200 sıcaklık değerleri her iki grupta da ortak şekilde yer almaktadır. Yüzdesel fark analizinde başlangıç sıcaklığı parametre değerleri arasında istatistiksel olarak herhangi bir fark olmadığı için problem çözümünde daha düşük işlem zamanı olan ilk grubun seçilmesi, grup içinden de enküçük sıcaklık parametre değerine sahip olan 10 değerinin TB algoritmasında başlangıç sıcaklığı olarak alınması uygun görülmüştür.

Çizelge 4.13. İşlem zamanı ile başlangıç sıcaklığı ilişkisi

CPU_Time (Duncan a,b)			
Baslangic_Sicakligi	N	Gruplar	
		1	2
10	135	199,05	
50	135	268,73	268,73
100	135	299,04	299,04
200	135	335,33	335,33
500	135		379,59
1000	135		401,03
Sig.		0,095	0,115
The error term is Mean Square(Error) = 374125,619. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 135,000. b. Alpha = 0,05.			

İşlem zamanı bağımsız değişkeni için iterasyon sayısı parametrelerinin gruplandırılması Çizelge 4.14'de görülmektedir. Duncan testine göre toplam görev sayısı ile çarpılan 1, 3 ve 5 katsayıları ayrı ayrı 3 grupta yer almıştır. Daha önce yüzdesel fark bağımsız değişkeni için iterasyon katsayısı parametresi 5 ile 3'ün arasında istatistiksel bir farklılık bulunmamıştır. Bu nedenle Çizelge 4.14'deki istatiksel sonuçlara göre daha az işlem süresine sahip 2. grup olan 3 parametresinin kullanılması uygun görülmüş. Sonuç olarak TB algoritmasında iterasyon katsayı parametresinin 3 değerini alarak kullanılması tercih edilmiştir.

Çizelge 4.14. İşlem zamanı ile iterasyon sayısı ilişkisi

CPU_Time (Duncan a,b)				
Iterasyon_Sayisi	N	Gruplar		
		1	2	3
1	270	106,18		
3	270		314,79	
5	270			520,42
Sig.		1	1	1
The error term is Mean Square(Error) = 374125,619. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 270,000. b. Alpha = 0,05.				

TB algoritması için alfa değeri 0,99 ve başlangıç sıcaklı değeri 10 derece ve iterasyon sayı değeri 3*N olarak kullanılmıştır. TB algoritması için belirlenen bu parametre değerlerine göre kodlanan algoritma tüm örnek görev setleri için koşturulmuş ve Çizelge 4.15'de matematiksel model ile TB algoritmasından elde edilen sonuçların performansı karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.15'de matematiksel model ile TB algoritmasının sonuçları karşılaştırılırken enküçük maliyet ve ortalama maliyet değerleri dikkate alınmıştır. TB algoritması ile 70*2 görev sayısına sahip problemlere kadar matematiksel model ile benzer şekilde 19 problem setinde eniyi değeri elde edilirken kalan diğer problem setlerinde matematiksel modelin daha etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Yine COMSOAL algoritmasında olduğu gibi TB algoritmasında da matematiksel model ile olurlu sonuç elde edilemeyen Tongue ve Lutz veri setlerinde de olurlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.15 Veri setlerinin koşturum sonuçları-3

Ör. Set	Görev Sayısı (N*2)	C (dk)	Matematiksel Model		TB Algoritması					
			Süre (sn)	Maliyet	İter. Say.	Ort. Koş. Süresi	Enk Maliyet	Yüzdesel Fark	Ort. Maliyet	Yüzdesel Fark
8	16	34	6	10,605 *	24	0	10,605*	0,000	10,605	0,000
8	16	51	1,5	10,604 *	24	0	10,604*	0,000	10,604	0,000
8	16	68	1	10,603 *	24	0	10,603*	0,000	10,603	0,000
8-1	16	34	3	10,605 *	24	0	10,605*	0,000	10,605	0,000
8-1	16	51	1	10,604 *	24	0	10,604*	0,000	10,604	0,000
8-1	16	68	1	10,603 *	24	0	10,603*	0,000	10,603	0,000
11	22	20	2,5	6,604 *	33	2	6,604*	0,000	6,605	-0,012
11	22	30	2	6,603 *	33	2	6,603*	0,000	6,603	-0,006
11	22	40	2	6,603 *	33	2	6,603*	0,000	6,603	0,000
11-1	22	20	4,8	4,987 *	33	2	5,165	-3,569	5,166	-3,581
11-1	22	30	2,5	4,986 *	33	2	5,144	-3,169	5,160	-3,486
11-1	22	40	3,5	4,986 *	33	2	5,126	-2,808	5,146	-3,213
21	42	26	139	15,208 *	63	18,2	15,209	-0,007	15,210	-0,011
21	42	39	43,5	15,206 *	63	18	15,206*	0,000	15,207	-0,004
21	42	52	29,5	15,206 *	63	18	15,206*	0,000	15,206	0,000
21-1	42	26	69	15,008 *	63	18,4	15,110	-0,680	15,111	-0,685
21-1	42	39	29	15,006 *	63	20,2	15,008	-0,013	15,068	-0,413
21-1	42	52	8,5	15,006 *	63	20	15,007	-0,007	15,027	-0,139
30	60	50	7200	45,613 **	90	69	45,615	-0,004	45,616	-0,006
30	60	75	7200	45,609 **	90	72,2	45,610	-0,002	45,610	-0,002
30	60	100	38,5	45,607 *	90	72,4	45,607*	0,000	45,607	0,000
30-1	60	50	7200	44,014 **	90	71	45,117	-2,506	45,296	-2,912
30-1	60	75	73	44,01 *	90	71,2	44,812	-1,822	45,011	-2,275
30-1	60	100	74	44,008 *	90	74	44,610	-1,368	44,850	-1,912
35	70	80	997,14	67,213 *	105	124,2	67,214	-0,001	67,215	-0,003
35	70	120	271,5	67,209 *	105	125,4	67,209*	0,000	67,209	0,000
35	70	160	7200	67,207 **	105	124,4	67,207*	0,000	67,207	0,000
35-1	70	80	7200	66,214 **	105	134,8	67,214	-1,510	67,214	-1,511
35-1	70	120	7200	66,21 **	105	134,6	67,110	-1,359	67,189	-1,479
35-1	70	160	1497	66,208 *	105	124,6	67,008	-1,208	67,168	-1,450
45	90	110	7200	77,81 **	135	332,8	77,811	-0,001	77,811	-0,001
45	90	165	118	77,807 *	135	334,8	77,807*	0,000	77,807	0,000
45	90	220	220	77,806 *	135	331,2	77,806*	0,000	77,806	0,000
45-1	90	110	1202,27	71,411 *	135	333	75,605	-5,873	75,769	-6,103
45-1	90	165	608	71,409 *	135	363	75,509	-5,742	75,629	-5,910
45-1	90	220	248	71,408 *	135	333,8	75,406	-5,599	75,586	-5,851
53	106	2150	7200	1970,014 **	159	617	1970,014*	0,000	1974,417	-0,223
53	106	3225	487	1970,009 *	159	615,8	1970,009*	0,000	1970,010	0,000
53	106	4300	281	1970,007 *	159	671,6	1970,007*	0,000	1970,008	0,000
53-1	106	2150	7200	1850,03 **	159	616,4	1951,016	-5,459	1956,417	-5,751
53-1	106	3225	5296	1850,018 *	159	615,4	1946,012	-5,189	1950,411	-5,427
53-1	106	4300	7200	1850,017 *	159	616,4	1942,010	-4,973	1948,209	-5,308
70	140	350	7200	-	210	1848,2	492,023 **	-	497,082	-
70	140	525	7200	-	210	1851,2	492,015 **	-	492,016	-
70	140	700	7200	-	210	2021,4	492,011 **	-	492,011	-
70-1	140	350	7200	-	210	1857	496,924 **	-	497,463	-
70-1	140	525	7200	-	210	1865,4	491,916 **	-	492,375	-
70-1	140	700	7200	-	210	1921,8	491,213 **	-	491,574	-
89	178	400	7200	-	267	4765,8	699,030 **	-	703,228	-
89	178	600	7200	-	267	4784,4	688,022 **	-	692,222	-
89	178	800	7200	-	267	4786,2	688,017 **	-	692,818	-
89-1	178	400	7200	-	267	4795,2	693,230 **	-	697,068	-
89-1	178	600	7200	-	267	4780,4	689,220 **	-	692,700	-
89-1	178	800	7200	-	267	4777,8	683,015 **	-	686,618	-

* Optimum değer

Çizelge 4.16. Veri setlerinden elde edilen eniyi-olurlu sonuçlar-3

Veri Setleri	Örnek Sayısı	TB Algoritması	
		Eniyi Sonuç	Olurlu Sonuç
Bowman Bowman1	6	6	*
Jackson Jackson 1	6	3	3
Mitchell Mitchell-1	6	2	4
Sawyer Sawyer-1	6	1	5
Gunther Gunther-1	6	1	5
Kilbrid Kilbrid-1	6	2	4
Hahn Hahn-1	6	2	4
Tonge Tonge-1	6	-	6
Lutz2 Lutz2-1	6	-	6

Çizelge 4.16'da enküçük fark değerleri dikkate alındığında 54 farklı veri seti içerisinden 17 adedinde eniyi sonuca ulaşılırken, 37 adedinde de olurlu sonuca ulaşılmıştır. Bu rakamlar dikkate alındığında TB algoritmasının COMSOAL algoritmasından daha başarılı olduğu görülmektedir.

Daha detaylı analiz Çizelge 4.7'de görülmektedir. Çizelge 4.17'de enküçük ve ortalama maliyetler üzerinden yüzdesel farklar dikkate alınarak COMSOAL ve TB algoritması karşılaştırılmıştır. 54 örnek problem seti içerisinden 2 adedinde (Bowman ve Bowman 1) aynı sonuç bulunmuştur. COMSOAL metodu sadece 6 örnek problem setinde (Jackson 1 ve Kilbrid-1) daha etkin sonuç verirken kalan 46 veri setinde TB algoritması ile daha etkin sonuçlar elde edilmiştir. Yüzdesel iyileşme değerlerine bakıldığında TB'nin tez çalışması kapsamında ele alınan problemler üzerinde daha etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.17. COMSOAL ve TB algoritması sonuçlarının karşılaştırılması

Ör. Set	Görev Sayısı (N*2)	C (dk)	COMSOAL Sonuçları			TB Algoritması				Karşılaştırma
			Koş. Süresi 5*N (sn)	Enk Maliyet	Ort. Maliyet	İter. Say.	Ort. Koş. Süresi	Enk Maliyet	Ort. Maliyet	Yüzdesel İyileşme
8	16	34	40	10,605	10,606	24	0	10,605	10,605	0,000
8	16	51	40	10,605	10,605	24	0	10,604	10,604	0,009
8	16	68	40	10,605	10,606	24	0	10,603	10,603	0,019
8-1	16	34	40	10,605	10,606	24	0	10,605	10,605	0,000
8-1	16	51	40	10,605	10,606	24	0	10,604	10,604	0,009
8-1	16	68	40	10,605	10,606	24	0	10,603	10,603	0,019
11	22	20	55	6,609	6,610	33	2	6,604	6,605	0,076
11	22	30	55	6,608	6,609	33	2	6,603	6,603	0,076
11	22	40	55	6,609	6,610	33	2	6,603	6,603	0,091
11-1	22	20	55	5,074	5,103	33	2	5,165	5,166	-1,793
11-1	22	30	55	5,094	5,107	33	2	5,144	5,160	-0,982
11-1	22	40	55	5,074	5,104	33	2	5,126	5,146	-1,025
21	42	26	105	15,218	15,222	63	18,2	15,209	15,210	0,059
21	42	39	105	15,217	15,220	63	18	15,206	15,207	0,072
21	42	52	105	15,222	15,223	63	18	15,206	15,206	0,105
21-1	42	26	105	15,120	15,185	63	18,4	15,110	15,111	0,066
21-1	42	39	105	15,123	15,164	63	20,2	15,008	15,068	0,760
21-1	42	52	105	15,124	15,203	63	20	15,007	15,027	0,774
30	60	50	150	46,936	47,095	90	69	45,615	45,616	2,814
30	60	75	150	47,031	47,154	90	72,2	45,610	45,610	3,021
30	60	100	150	46,933	47,116	90	72,4	45,607	45,607	2,825
30-1	60	50	150	45,537	46,177	90	71	45,117	45,296	0,922
30-1	60	75	150	46,137	46,257	90	71,2	44,812	45,011	2,872
30-1	60	100	150	46,039	46,236	90	74	44,610	44,850	3,104
35	70	80	175	69,042	69,340	105	124,2	67,214	67,215	2,648
35	70	120	175	69,349	69,562	105	125,4	67,209	67,209	3,086
35	70	160	175	69,041	69,360	105	124,4	67,207	67,207	2,656
35-1	70	80	175	69,136	69,341	105	134,8	67,214	67,214	2,780
35-1	70	120	175	68,643	69,160	105	134,6	67,110	67,189	2,233
35-1	70	160	175	68,835	69,118	105	124,6	67,008	67,168	2,654
45	90	110	225	79,447	79,756	135	332,8	77,811	77,811	2,059
45	90	165	225	79,756	79,933	135	334,8	77,807	77,807	2,444
45	90	220	225	79,450	79,753	135	331,2	77,806	77,806	2,069
45-1	90	110	225	74,756	75,038	135	333	75,605	75,769	-1,136
45-1	90	165	225	75,154	75,235	135	363	75,509	75,629	-0,472
45-1	90	220	225	75,056	75,235	135	333,8	75,406	75,586	-0,466
53	106	2150	265	2027,065	2030,664	159	617	1970,017	1974,417	2,814
53	106	3225	265	2020,062	2025,463	159	615,8	1970,010	1970,010	2,478
53	106	4300	265	2021,062	2024,463	159	671,6	1970,007	1970,008	2,526
53-1	106	2150	265	1955,061	1963,462	159	616,4	1951,016	1956,417	0,207
53-1	106	3225	265	1953,060	1958,865	159	615,4	1946,012	1950,411	0,361
53-1	106	4300	265	1954,068	1962,464	159	616,4	1942,010	1948,209	0,617
70	140	350	350	506,287	511,508	210	1848,2	492,023	497,082	2,817
70	140	525	350	511,186	512,543	210	1851,2	492,015	492,016	3,750
70	140	700	350	510,077	511,843	210	2021,4	492,011	492,011	3,542
70-1	140	350	350	506,888	508,308	210	1857	496,924	497,463	1,966
70-1	140	525	350	506,890	507,887	210	1865,4	491,916	492,375	2,954
70-1	140	700	350	505,885	507,284	210	1921,8	491,213	491,574	2,900
89	178	400	445	719,105	721,108	267	4765,8	699,030	703,228	2,792
89	178	600	445	717,111	720,505	267	4784,4	688,022	692,222	4,056
89	178	800	445	720,112	721,510	267	4786,2	688,017	692,818	4,457
89-1	178	400	445	714,116	714,912	267	4795,2	693,230	697,068	2,925
89-1	178	600	445	713,101	714,504	267	4780,4	689,220	692,700	3,349
89-1	178	800	445	711,107	713,908	267	4777,8	683,015	686,618	3,950

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında gelişen teknolojiler ışığında işbirlikçi çalışma stratejisine geçiş sürecinde önemli bir çalışma alanı olan MHDP yapılarına değinilmiş, MHDP'nin özel bir alt başlığı olan PMHDP için literatür çalışması ışığında, incelendiği kadarıyla farklı tipte işgücüne sahip maliyet yönelimli paralel montaj hatları için yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gelişen teknolojiler ve üretim modellerindeki değişimleri tetikleyen Endüstri 4.0 devrimi ile gelen montaj hatlarındaki farklı bakış açısı ihtiyacı ve incelenen konu başlığı altında literatürde yapılmış bir başlığa rastlanmaması tez çalışmasının önemli iki motivasyonunu oluşturmuştur. Yapılan çalışmalarda tez konusuna en yakın çalışmada (Çil ve diğerleri, 2017) farklı işgücü tipli paralel montaj hatlarında çevrim süresi enküçüklenmesi hedeflenirken, diğer bir yakın çalışmada maliyet yönelimli paralel montaj hatları konusuna değinilmiştir. Bahsedilen çalışmalardan farklı olarak tez çalışmasında maliyet yönelimli paralel montaj hatlarında farklı tipte işgücüne sahip bir problem için literatürde kullanılan test veri setleri üzerinden türetilen yeni veri setleri ile probleme özgü farklı çözüm metodları önerilmiştir.

Tez akışında Endüstri 4.0 ve MHDP ve literatürü aktarılmış, ardından farklı tipte işgücüne sahip maliyet yönelimli paralel montaj hattı özelinde probleme özgü bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin çözümü için gerekli test veri seti yapılarına literatürde ulaşılamadığı için mevcut paralel montaj hattı problemlerinde kullanılan veri setleri üzerinden farklı işgücü tipi ve maliyetleri içeren yeni test veri setleri, uzman ve sektör temsilcileriyle görüşülerek oluşturulmuştur ve bu kapsamda probleme özgü çözüm metodları önerilmiştir.

Önerilen matematiksel modelle 7200 saniye ile sınırlanan çözümler içerisinde 9 veri setinin %58,3'ünde eniyi çözüm elde edilirken, %19,4'ünde olurlu çözüm elde edilmiş ve %11,1'inde çözüm bulunamamıştır. Büyük görev sayılı test problemlerinde problem yapısının NP-Zor sınıfında olması nedeniyle çözüm elde edilemediği için alternatif çözüm metodu olarak geliştirilen COMSOAL algoritmasında 5*N saniyelik zaman zarfında 9 veri seti için bu setlerin %3,7'sinde eniyi sonuç ve %96,3'ünde olurlu sonuç elde edilmiştir.

Mevcut sonuçlar dikkate alındığında COMSOAL ile 89*2 görevden daha fazla göreve sahip paralel hatlı problemler için de olurlu sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Fakat

COMSOAL algoritmasının daha çok başlangıç çözüm algoritması olarak kullanılması ve diğer sezgisel algoritmalara göre elde ettiği çözümlerin kalitesinin daha düşük olma olasılığı, daha etkin sonuçlar elde edilebilecek probleme özgü yeni bir sezgisel algoritmanın geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu sebeple MHDP'nde de etkin olarak kullanılan TB algoritması ile probleme özgü bir model geliştirilmiştir. Algoritma ile 5*N saniyelik zaman zarfında 9 veri seti için bu setlerin %31,4'ünde eniyi sonuç ve %68,6'sında olurlu sonuç elde edilmiştir.

Mevcut sonuçlara göre TB algoritması, COMSOAL algoritmasının %3,7 seviyesinde bulduğu eniyi sonucu %31,4'e çıkarmıştır. Bu sonuçlar ışığında TB algoritmasının COMSOAL algoritmasına göre daha etkin sonuçlar verdiği ispatlanmıştır

Tez çalışmasının PMHDP literatürüne farklı bir bakış açısı ile katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca gelecek çalışmalarda çözüm kalitesi açısından, mevcut ve daha fazla göreve sahip PMHDP'nde daha gelişmiş bir TB algoritması veya daha farklı sezgisel metotlar geliştirilerek kullanıldığında daha iyi çözümler elde edilebileceği de düşünülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmanın gelecekte farklı kısıt ve amaç yapılarına sahip modellerle çeşitlendirilebilecek yeni çalışmalar için farklı bir başlangıç noktası olacağı öngörülmektedir.

Bu çalışma kapsamında problem yapısına uygun türetilen veri setlerinin de benzer çalışmalarda kullanılabilmesi için ihtiyaç duyulabilecek test veri seti kaynağı https://drive.google.com/open?id=1LRLF8jn6Fl3KOuCSb1KtXSTrGqy3KXEf adresinden online olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Agnetis, A., Ciancimino, A., Lucertini, M., and Pizzichella, M. (1995). Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research*, 33, 333-350.

Agrawal, P. K. (1985). The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 23, 403-421.

Ahmadi, R. H., and Wurgaft, H. (1994). Design for synchronized flow manufacturing. *Management Science*, 40, 1469-1483.

Ahmadi, R. H., Dasu, S., and Tang, C. S. (1992). The dynamic line allocation problem, *Management Science*, 38, 1341-1353.

Ajenblit, D., and Wainwright, R. (1998). *Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem*. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 96-101, Anchorage, AK.

Akagi, F., Osaki, H., and Kikuchi, S. (1983). A method for assembly line balancing with more than one qorker in each station. *International Journal of Production Research*, 21, 755-770.

Amen, M. (2000a). An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*, 64, 187-195.

Amen, M. (2000b). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics*, 68(1), 1-14.

Amen, M. (2001). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics*, 69, 255-264.

Amen, M. (2006). Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operation Research*, 168: 747-770

Arcus, A.L. (1966). COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research*, 4, 259-277.

Baker, K. (1974). *Introduction to Sequencing ve Scheduling.* New York: Wiley, 50-55.

Bard, J. F. (1989). Assembly line balancing with parallel workstations ve dead time. *International Journal of Production Research*, 27, 1005-1018.

Bard, J. F., Dar-El, E., and Shtub, A. (1992). An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Researc*h, 30, 35-48.

Bartholdi, J. J. (1993). Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research*, 31, 2447-2461.

Battaia, O., and Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems ve their solution approaches. *International Journal of Production Economics,* 142(2), 259–277.

Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M., and Companys, R. (2000). *Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks.* Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics ve automation, 2404-2409). San Francisco, CA.

Baybars, İ. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problems. *Management Science,* 32(8), 909-932.

Becker, C., and Scholl, A. (2006). A survey on problems ve methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research,* 168(3), 694-715.

Boucher, T. O. (1987). Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research,* 25, 513-524.

Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693.

Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111, 509-528.

Boysen, N., and Scholl, A. (2009). A General Solution Framework for Component-Commonality Problems. *Business Research,* 2(1), 86–106.

Bukchin, J., and Masin, M. (2004). Multi-objective design of team oriented assembly systems. *European Journal of Operational Research,* 156, 326-352.

Bukchin, J., and Tzur, M. (2000). Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 32, 585-598.

Bukchin, J., Dar-El, E. M., and Rubinovitz, J. (2002). Mixed-model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers ve Industrial Engineering,* 41, 405-421.

Bukchin, J., Dar-El, E., and Rubinovitz, J. (1997). Team oriented assembly system design: A new approach. *International Journal of Production Economics,* 51, 47-57.

Burns, L. D., and Daganzo, C. F. (1987). Assembly line job sequencing principles. *International Journal of Production Research,* 25, 71-99.

Buxey, G. M. (1974). Assembly Line Balancing with Multiple Stations. *Management Science,* 20 (6), 1010-1021.

Buxey, G. M., Slack, N. D., and Wild, R. (1973). Production Flow Line System Design - A Review. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions,* March, 37-48.

Buzacott, J.A. (1990). Abandoning the moving assembly line: Models of human operators ve job sequencing. *International Journal of Production Research*, 28, 821-839.

Chakravarty, A. M., and Shtub, A. (1988). Modelling the effects of learning ve job enlargement on assembly systems with parallel lines. *International Journal of Production Research*, 26, 267-281.

Chakravarty, A. K. (1988). Line balancing with task learning effects. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 20, 186-193.

Chakravarty, A., and Shtub, A. (1986b). Dynamic manning of long cycle assembly lines with learning effect. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 18, 392-397.

Chase, R. B. (1974). Survey of paced assembly lines. *Industrial Engineering*, 6(2), 14-18.

Chiang, W. C., Kouvelis, P., and Urban, T. L. (2007). Line balancing in a just in time production environment: Balancing multiple U-lines. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 39, 347-359.

Chiang, W. C., and Urban, T. L. (2006). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. *International Journal of Operational Research*, 175(3), 1767-1781.

Çerçioğlu, H. (2009). *Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Yeni Modeller*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Doktora Tezi, Ankara: Yayınlanmamış Doktora Tezi.

Çil, Z. A., Mete, S., Özceylan E., and Ağpak, K. (2017). A beam search approach for solving type II robotic parallel assembly line balancing problem. *Applied Soft Computing*, 61, 129–138.

Daganzo, C. F., and Blumenfeld, D. E. (1994). Assembly system design principles ve tradeoffs. *International Journal of Production Research*, 32(3), 669-681.

Deckro, R.F. (1989). Balancing cycle time ve workstations. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 21, 106-111.

Dobson, G., and Yano, C.A. (1994). Cyclic scheduling to minimize inventory in a batch flow line. *European Journal of Operational Research*, 75, 441-461.

Ellegard, K., and Jonsson, D. (1992). Reflective production in the final assembly of motor vehicles: an emerging Swedish challenge. *International Journal of Operations ve Production Management*, 12, 117-133.

Erel, E., and Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures, *Production Planning ve Control*, 9, 414–434.

Erel, E., Sabuncuoğlu, İ., and Aksu, B. A. (2001). Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 39(13), 3003-3015.

Esmaeilian, G. R., Sulaiman, S., İsmail, N., Ahmad, M., and Hamedi, M. (2008). Application of MATLAB to create initial solution for tabu search in parallel assembly lines balancing. *International Journal of Computer Science ve Network Security*, 8, 132-136.

Esmaeilian, G. R., Sulaiman, S., Ismail, N., Hamedi, M., and Ahmad, M. H. (2011). A tabu search approach for mixed-model parallel assembly line balancing problem (type II). *International Journal of Industrial ve Systems Engineering*, 8(4), 407-431.

Falkenauer, E. (1997). *A grouping genetic algorithm for line balancing with resource dependent task times.* Proceedings of the Fourth International Conference on Neural Information Processing, 464-468.

Fogel, D. J. (1995). *Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Press, New York, 120-150.

Freeman, D. R., and Jucker, J. V. (1967). The line balancing problem. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 18(6), 361-364.

Foroughi, A., Gökçen H., and Tiacci L. (2016). The cost-orıented stochastıc assembly lıne balancıng problem: A chance constraıned programmıng approach, *International Journal of Industrial Engineering*, 23(6), 412-430.

Foroughi, A., and Gökçen H. (2019). A multiple rule-based genetic algorithm for cost-oriented stochastic assembly line balancing problem, *Assembly Automation*, 39(1), 124–139.

Geoffrion, A. M., and Graves, G. W. (1976). Scheduling parallel production lines with changeover costs: Practical application of a quadratic assignment/LP approach. *Operations Research*, 24, 595-610.

Ghosh, S., and Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review ve analysis of the design, balancing ve scheduling of assembly systems. *International journal of Production Research*, 27(4), 637-670.

Globerson, S., and Tamir, A. (1980). The relationship between job design, human behaviour ve system response. *International Journal of Production Research*, 18(3), 391-400.

Ghosh, S., and Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review ve analysis of the design, balancing ve scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27, 637–670.

Gökçen, H., Ağpak, K., and Benzer, R. (2006). Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 103, 600–609.

Gökçen, H., ve Ağpak, K. (2004). Hat Dengelemede Yeni Bir Felsefe: Paralel Montaj Hatlarının Eşzamanlı Dengelenmesi. *Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 7(1),181-188.

Graves, S. C., and Lamar, B.W. (1983). An integer programming procedure for assembly system design problems. *Operations Research*, 31, 522-545.

Graves, S., and Holmes, C. (1988). Equipment selection ad task assignment for multiproduct assembly system design. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1, 31-50.

Hillier, F. S., and So, K. C. (1993). Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research*, (31), 811-822.

Hillier, F. S., and So, K. C. (1991). The effect of machine breakdowns ve interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research*, (29), 2043-2055.

Ignall, E. J. (1965). A review of assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering*, 16, 244-254.

Inman, R. R., and Leon, M. (1994). Scheduling duplicate serial stations in transfer lines. *International Journal of Production Research*, 32, 2631-2644.

Iskander, W. H., and Chou, J. (1990). Unbalanced production line scheduling with partial job specialization. *Naval Research Logistics*, 37, 789-805.

İnternet: 3D yazıcı, www.tecky.eu/additive-manufacturing-vs-3d-printing/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Akıllı fabrika, www.haptic.ro/call-ict-innovation-manufacturing-smes-i4ms/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Bulut bilişim, www.mobileappdaily.com/what-is-iot-and-how-iot-works, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Büyük veri, www.newgenapps.com/blog/how-is-big-data-impacting-internet-marketing, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Endüstriyel büyük veri, www.yed.org.tr/ali-riza-ersoy-ile-endustri-4-0/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: İnsan-robot etkileşimi, www.bair.berkeley.edu/blog/2017/12/12/corobots/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Nesnelerin interneti, www.cybermagonline.com/iot-cihazlari-hakkinda-bilinen-6-yanlis-efsane, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Paralel montaj hattı dengeleme problemi veri setleri, www.drive.google.com/open?id=1LRLF8jn6Fl3KOuCSb1KtXSTrGqy3KXEf, Erişim Tarihi: 24.09.2019.

İnternet: Rfid teknolojisi, www.lipidigital.com/rfid.html, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Robotlu imalat, www.madlab.cc/notes/2014/10/15/from-industrial-robotics-to-creative-robotics, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Sanal gerçeklik, www.core77.com/posts/56702/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Sensör örnekleri, www.theautomization.com/different-types-of-sensor-used-in-industrial-world/, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Siber güvenlik, www.aparee.com/building-information-modeling, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Siber güvenlik, www.kaspersky.com.tr/resource-center/definitions/what-is-cyber-security, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Siber-fiziksel, sistemler, www.pngfuel.com/free-png/guuoa, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İnternet: Yapay zeka, www.templeilluminatus.com/group/artificial-intelligence-in-the-new-age, Erişim Tarihi: 22.02.2020.

İsmail, N. G., Esmaeilian, R., Hamedi, M., and Sulaiman, S. (2011). Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product. *International Conference on Management ve Artificial Intelligence*, 6, 120-124.

Johnson, R. (1991). Balancing assembly lines for teams ve work groups. *International Journal of Production Research*, 29, 1205-1214.

Johnson, R. V. (1983). A branch ve bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities. *Management Science*, 29, 1309-1324.

Kao, E., and Queyranne, M. (1982). On dynamic programming methods for assembly line balancing. *Operations Research*, 30, 375-390.

Karp, M.R. (1972). *Reducibility among combinatorial problems. Complexity of Computer Computations*. New York: Plenum Press, 85-103.

Kellegöz, T., and Toklu, B. (2012). An efficient branch ve bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *Computers and Operations Research*, 39, 3344–3360.

Kellegöz, T., and Toklu, B. (2015). A priority rule-based constructive heuristic ve an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations. *International Journal of Production Research*, 53(3), 736–756.

Kilbridge, M. D., and Wester, L. (1961). The balance delay problem. *Management Science*, 8(1), 69-84.

Kim, Y.K., Kim, J. Y., and Kim, Y. (2000b). A coevolutionary algorithm for balancing ve sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence*, 13, 247-258.

Kim, Y.K., Kim, J. Y., and Kim, Y. (2006). An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing ve sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research*, 168, 838-852.

Kim, Y.K., Kim, S. J., and Kim, J. Y. (2000c). Balancing ve sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning ve Control*, 11, 754-764.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, New Series, 220(4598), 671-680.

Küçükkoç, İ., and Zhang, D. Z. (2015). Balancing of parallel U-shaped assembly lines. *Computers and Operations Research,* 64, 233–244.

Küçükkoç, İ., and Zhang, D. Z. (2016). Mixed-model parallel two-sided assembly line balancing problem: A flexible agent-based ant colony optimization approach. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 58–72.

Küçükkoç, İ., and Zhang, D. Z. (2014). Simultaneous balancing ve sequencing of mixed-model parallel two-sided assembly lines. *International Journal of Production Research*, 52(12), 3665–3687.

Koren, Y., Hu, S. J., and Weber, T. W. (1998). Impact of manufacturing system configuration on performance. *The International Academy for Production Engineering*, 47(1), 369-372.

Lan, C.H. (2007). The design of multiple production lines under deadline constraint. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 191-203.

Lee, T., Kim, Y., and Kim, Y. (2001). Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness ve slackness. *Computers ve Industrial Engineering*, 40, 273-292.

Lehman, M. (1969). On criteria for assigning models to assembly lines. *International Journal of Production Research*, 7, 269-285.

Li, Y., Wang, H., and Yang, Z. (2019). Type II assembly line balancing problem with multi-operators. *Neural Computing ve Applications*, 31, 347–357.

Lusa, A. (2008). A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem. *European Journal of Industrial Engineering*, 2(1), 50-72.

Lutz, C., Davis, K., and Turner, C. (1994). Development of operator assignment schedules: A DSS approach. *Omega*, 22, 57-67.

Macaskill, J. L. (1972). Production-line balances for mixed-model lines. *Management Science*, 19, 423-434.

Malakooti, B. (1994). Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *International Journal of Production Research* (32), 2159-2178.

Matanachai, S., and Yano, C. A. (2001). Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *Institute of Industry and Systems Engineers Transactions*, 33, 29-42.

Mather, H. (1989). *Competitive manufacturing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 102-106.

McMullen, P., and Frazier, G. (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 36, 2717-2741.

Merengo, C., Nava, F., and Pozetti, A. (1999). Balancing ve sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, (37), 2835-2860.

Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 109(1), 1-23.

Miltenburg, J., and Wijngaard, J. (1994). The U-line Line Balancing Problem. *Management Science*, 40(10), 1378-1388.

Monden, Y. (1998). *Toyota Production System - An integrated approach to just-in-time* (3rd edition ed.). Dordrecht: Kluwer, 65-70.

Moodie, C. L., and Young, H. H. (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering*, 16, 23-29.

Mamun, A. A., Khaled, A. A., Ali, S. M., and Chowdhury, M. M. (2012). A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type I using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5106–5116.

Nabil, A., Ismail, G., Esmaeilian, R., and Sulaiman S. (2011). *Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product.* 2011 International Conference on Management ve Artificial Intelligence, IPEDR, 6.

Nakade, K., Ohno, K., and Shanthikumar, J.G. (1997). Bounds ve approximations for cycle times of a U-shaped production line. *Operations Research Letters*, 21(4), 191-200.

Nicosia, G., Pacciarelli, D., and Pacifici, A. (2002). Optimally balancing assembly lines with defferent workstations. *Discrete Applied Mathematics*, 118, 99-113.

Ozbakır, L., Baykasoglu, A., Gorkemli, B., and Gorkemli, L. (2011). Multiple-colony ant algorithm for parallel assembly line balancing problem. *Applied Soft Computing*, 11, 3186-3198.

Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., and Toklu, B. (2009). A tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem. *Gazi University Journal of Science*, 22(4), 313-323.

Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., and Toklu B. (2010). Balancing ve sequencing of parallel mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 48(17), 5089-5113.

Özcan, U., and Toklu, B. (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers and Industrial Engineering*, 57, 217-227.

Park, K., Park, S., and Kim, W. (1997). A heuristic for an assembly line balancing problem with incompatibility, range, vepartial precedence constraints. *Computers ve Industrial Engineering*, 32, 321-332.

Pastor, R., and Corominas, A. (2000). Assembly line balancing with incompatibilities ve bounded workstation loads. *Recerca Operativa*, 2000, 23-45.

Pike, R., and Martin, G. E. (1994). The bowl phenomenon in unpaced lines. *International Journal of Production Research*, 32, 483-499.

Pine, B. J. (1993). *Mass customization: The new frontier in business competition*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press, 128-130.

Pinnoi, A., and Wilhelm, W. (1997). A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research*, 35, 252-280.

Pinnoi, A., and Wilhelm, W. (1998). Assembly system design: A branch ve cut approach. *Management Science*, 44, 103-118.

Pinto, P. A., Dannenbring, D. G., and Khumawala, B. M. (1975). A branch ve bound algorithm for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, 13, 183-196.

Pinto, P. A., Dannenbring, D. G., and Khumawala, B. M. (1981). Branch ve bound ve heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, 19, 565-576.

Pinto, P. A., Dannenbring, D., and Khumawala, B. (1983). Assembly line balancing with processing alternatives: an application. *Management Science*, 29, 817-830.

K.R., Powell, S. G., and Pyke, D. F. (1990). Buffered ve unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of Manufacturing ve Operations Management*, 3, 200-223.

Rabbania, M. Ziaeifara, A., and Manavizadehb, N. (2014). Mixed-model assembly line balancing in assemble-to-order environment with considerin express parallel line: problem definition ve solution procedure. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(7), 690–706.

Rachamadugu, R., and Talbot, B. (1991). Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research*, 29, 619-633.

Rekiek, B., de Lit, P., and Delchambre, A. (2002a). Hybrid assembly line design ve user's preferences. *International Journal of Production Research*, 40, 1095-1011.

Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., and Bratcu, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, 26(2), 163-174.

Robinson, L. W., McClaion, J. O., and Thomas, L. J. (1990). The good, the bad ve the ugly: Quality on an assembly line. *International Journal of Production Research*, 28, 963-980.

Rosenberg, O., and Ziegler, H. (1992). A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research*, 36, 477-495.

Rubinovitz, J., and Bukchin, J. (1993). RALB - A heuristic algorithm for design ve balancing of robotic assembly lines. *Annals of the The International Academy for Production Engineering*, 42, 497-500.

Salveson, M. E. (1955). The Assembly Line Balancing Problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.

Sarker, B.R., and Shanthikumari, J. G. (1983). A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research*, 21(1), 109-133.

Scholl, A. (1999). *Balancing ve sequencing assembly lines (2nd Edition).* Heidelberg: Physica, 20-30.

Scholl, A., and Becker, C. (2006). State-of-the-art exact ve heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 666-693.

Scholl, A., and Boysen, N. (2009). Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model ve optimization procedure. *International Journal of Production Economics*, 119, 90-100.

Scholl, A., and Boysen, N. (2008). *The multiproduct parallel assembly lines balancing problem: Model ve optimization procedure.* Jena Research Papers in Business and Economics, Friedrich Schiller University Jena, 13, 1-16.

Scholl, A., and Klein, R. (1997). SALOME: A bidirectional branch ve bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9, 319-334.

Scholl, A., and Klein, R. (1999). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37 (4), 721-736.

Schöniger, J., and Spingler, J. (1989). Planung der montageanlage. *Technica*, 14, 27-32.

Schrage, L., and Baker, K. (1978). Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints. *Operations Research*, 26, 444-449.

Shtub, A. (1984). The effect of incompletion cost on line balancing with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research*, 22, 235-245.

Shtub, A., and Dar-El, E. M. (1989). A Methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27(1), 175-186.

Sparling, D. (1998). Balancing JIT production units: The N U-line balancing problem. *Information Systems ve Operational Research*, 36, 215-237.

Sparling, D., and Miltenburg, J. (1998). The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 36(2), 485-501.

Spicer, P., Koren, Y., Shpitalni, M., and Yip-Hoi, D. (2002). Design Principles for Machining System Configurations. *The International Academy for Production Engineering Annals - Manufacturing Technology*, 51(1), 275-280.

Steffen, R. (1977). *Produktionplanung Bei FlieBbandfertigung*. Gabler, Wiesbaden. 15-22.

Sumichrast, R. S., and Russell, R. S. (1990). Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management*, 9, 371-390.

Sumichrast, R. T., Russell, R. S., and Taylor, B. W. (1992). A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system. *International Journal of Production Research*, 30, 199-214.

Süer, G. A. (1998). Designing parallel assembly lines. *Computers and Industrial Engineering*, 35(3-4), 467-470.

Süer, G. A., and Dağlı, C. H. (1994). *A knowledge-based system for selection of resource allocation rules ve algorithms.* Handbook of expert system applications in manufacturing: structures ve rules, Chapman ve Hall, 108-129.

Thomopoulos, N. T. (1970). Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science*, 16, 593-603.

Thomopoulos, T. N. (1967). Line balancing—sequencing for mixed-model assembly. *Management Science*, 14, 59-75.

Tiaccin, L. (2015). Coupling agenetic algorithm approach ve a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations ve stochastic task times", *International Journal of Production Economics*, 159, 319–333.

Tsai, L. H. (1995). Mixed-model sequencing to minimize utility work ve the risk of conveyor stoppage. *Managemenet Scienc*e, 41, 485-495.

Urban, T. L. (1998). Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science*, 44(5), 738-741.

Urban, T. L., and Chiang, W. C. (2006). An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 771-782.

Van Zante-de Fokkert, J. I., and de Kok, A. G. (1995). The mixed ve multi model line balancing problem: A comparison. Eindhoven University of Technology, *Graduate School of Industrial Engineering ve Management Science, 25-30.*

Van Zante-de Fokert, J., and de Kok, T. G. (1997). The mixed ve multi model line balancing problem: A comparison. *European Journal of Operational Research*, 100, 399-412.

Wee, T. S., and Magazine, M. J. (1982). Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters*, 1(2), 56-58.

Wild, R. (1972). *Mass-Production Management: The Design ve Operation of Production Flow-Line Systems.* London: Wiley, 1-10.

Wilson, J. (1986). Formulation of a problem involving assembly lines with multiple mannig of work stations. *International Journal of Production Research*, 24, 59-63.

Wyman, F. P. and Moberly, L. E., (1971). An application of simulation to compare production line configurations with failures and repairs. *Proceedings of the 5th conference on winter simulation*, 187-196.

Yano, C. A., and Bolat, A. (1989). Survey, development, application of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* (2), 172-198.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÖKHAN, Serhan

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 1981, Erzincan

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (312) 582 38 46

e-mail : serhankokhan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2013
Lisans	Uludağ Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2006
Lise	İçel Anadolu Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011 - 2020	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007 - 2010	Beyçelik Gestamp	Proje ve Üret. Kalite Sor.

Yayınlar

Kökhan, S., Baykoç, Ö.F., İşleyen, S.K. (2020). Heterojen işgücüne sahip paralel montaj hatları için maliyet tabanlı matematiksel bir model ve sezgisel bir yaklaşım. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*. (Baskıda)

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Gezi, tematik kitap okumak

GAZİ GELECEKTİR..