



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

**PARALEL MAKİNELİ ROBOTİK HÜCRELERDE ÇİZELGELEME
PROBLEMİ**

Mohammad Reza KOMARİ ALAİE

Doktora Tezi

Ankara, 2017

**PARALEL MAKİNELİ ROBOTİK HÜCRELERDE ÇİZELGELEME
PROBLEMİ**

Mohammad Reza KOMARİ ALAİE

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Doktora Tezi

Ankara Ocak, 2017

Kabul Ve Onay

Mohammad Reza Komari Alaie tarafından hazırlanan “Paralel Makineli Robotik Hücrelerde Çizelgeleme Problemi” başlıklı bu çalışma, 2017 Ocak tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jüimiz tarafından “Paralel Makineli Robotik Hücrelerde Çizelgeleme Problemi” olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fazıl Gökğöz (Başkan)

İmza

Prof. Dr. Mehmet Baha Karan, (Danışman)

İmza

Prof. Dr. Mustafa İpçi

İmza

Doç. Dr. Ayşegül TAŞ

İmza

Yrd. Doç. Dr. Kazım Barış Atıcı

İmza

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sibel BozbeYoğlu

Enstitü Müdürü

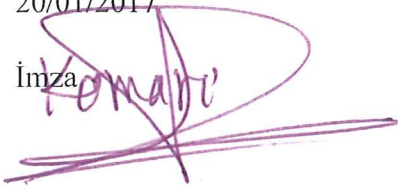
BİLDİRİM

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt eder, tezinin kağıt ve elektronik kopyalarının Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına eizin verdiğimi onaylarım:

- Tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.
- Tezim sadece Hacettepe Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.
- Tezim 3 yıl süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

20/01/2017

İmza



YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezimin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

o **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, teziniz arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir)

• **Tezimin/Raporumun 20/ 01/ 2020 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir)

o **Tezimin/Raporumun.....tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

o **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

20/01/2017

Mohammad Reza Komari Alaie

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, Tez Danışmanının Prof.Dr. Mehmet Baha Karan danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

Mohammad Reza Koari Alaie



TEKKÜRLER

Bu tezimin tamamlanması süresince, çalışmalarımı her aşamasında en az benim kadar emeği olduğunu düşündüğüm, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, deneyimlerinden faydalanarak bilimsel çalışma nosunu kazanmamı sağlayan hocam Dr.Mehmet Soysal'a ;

Verdikleri büyük destek ve önerilerle çalışmama değerli katkılarda bulunan Prof.Dr. Mehmet Baha Karan'a.

Destekleriyle beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan aileme (Anneme. Kız kardeşime ve her zaman desteklerini esirgemeyen Dayıma) ve Dr. Gahder Zemestaniye teşekkürlerimi sunuyorum.

ÖZET

Mohammad Reza Komari Alaie, Paralel Makineli Robotik Hücrelerde Çizelgeleme Problemi, Ankara, 2017.

Bu çalışmada, paralel makineli robotik hücrelerde çizelgeleme problemi ele alınacaktır. (PM-RC) . PM-RC probleminde tamamlanma zamanını en aza indirmek için bir karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önerilecektir. MILP modellerinin özelliklerinden dolayı çoğunlukla uygun bir çözüm üretilmemektedir. Bu nedenle, PM-RC probleminin çözümünde Benders Ayrıştırma yöntemine dayanan bir yöntem araştırılmaktadır.

Anahtar Sözcükler

Seri Üretim, Paralel Makine Çizelgeleme Problemi, Robotik Hücreler, Benders Ayrıştırma Yöntemi

ABSTRACT

Mohammad Reza Komari Alaie, “Parallel Machine Robotic Cell Scheduling Problem” Ankara, 2017.

This research address the Parallel Machine Robotic Cell Scheduling Problem (PM-RC) considering static identical parallel machine at the processing stage and multi part types. A mixed-integer linear programming (MILP) would be proposed for the PM-RC problem to minimize the makespan. Due to the characteristics of MILP models, mostly they are incapable of producing good feasible solution. Therefore, a method based on Benders decomposition method is considered to be investigated for solving the PM-RC problem.

KEY WORDS

Flow shop, Robotic Cell Scheduling Problem, Benders decomposition Method.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
BİLDİRİM	ii
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	iii
ETİK BEYANI	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar	xi
ŞEKİLLER	xii
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM	
LİTERATÜR İNCELENMESİ.....	6
İKİNCİ BÖLÜM	
PROBLEM TANITIMI ve ÖNERİLEN KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL	
PROGRAMLAMA MODELİ.....	10
2.1 Matematik Problem	13

2.1.1	İNDİSLER.....	13
2.1.2	PARAMETRELER.....	13
2.1.3	KARAR DEĞİŞKENLERİ.....	14
2.5	AMAÇ FONKSİYONU ve KISITLAR...	16

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ÇÖZÜM PROSEDÜRÜ: MANTIK TABANLI BENDERS AYRIŞTIRMA METODU

3.1	BENDERS AYRIŞTIRMA METODU.....	21
3.1.1	KLASİK VERSİYON.....	21
3.2	BENDER AYRIŞTIRMASI İÇİN MODEL SEÇİMİ.....	24
3.3	DİĞER AYRIŞTIRMA METODLARI İLE İLİŞKİLER.....	25
3.4	ANA ROBLEM.....	29
3.5	ALT PROBLEM.....	30
3.6	MANTIK TABANLI BENDERZ KESMELERİ.....	32

SAYISALBULGULAR.....33

SONUÇ.....39

KAYNAKÇA.....41

EKLER

EK. 1	TEZ ÇALIŞMASI OPJİNALLİK RAPORU.....	47
EK. 2	TEZ ÇALIŞMASI ETİK KURULU İZİN MUAFİYET FORMU.....	48
	ÖZGEÇMİŞ	49

KISALTMALAR

PM-RC	Paralel makineli robotik hücrelerde çizelgeleme problem.
MILPM	Karma tam sayılı doğrusal programlama.
MPS	En küçük Parça Kümesi
AGV	Otomatik güdümlü araçların.
TSP	Gezgin satıcı problem.
BD	Benders Ayrıştırma,
LBBD	Mantık tabanlı Benders ayrıştırması.

TABLÖLAR

- TABLO 1-1 Çok parçalı robotik hücre çizelgeleme problemleri üzerine yapılan araştırmaların sınıflandırılması.
- TABLO 3- 1 Benders ayrıştırma yönteminin bazı uygulamaları.
- TABLO 3- 2 Benders yöntemi ile ele alınan optimizasyon problemlerine örnekler.
- TABLO 4- 1 Paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemi için önerilen MILP modeli ve LBBD yönteminin hesaplama sonuçları.

ŞEKİLLER

- ŞEKİL 1.1 Paralel Makineler İçeren ve Çok-Robotlu Bir Robotik Hücre.
- ŞEKİL 2.1 Paralel makineli robotik hücrelerde örgneyi.
- ŞEKİL 3.1 Benders ayrıştırma yönteminin şematik gösterimi.
- ŞEKİL 4. 1 LBBĐ yöntemi ile çözülen tüm MS ve MP modellerinin toplam CPU zamanları.
- ŞEKİL 4. 2 Aynı parça sayıları ile 3 ve 5 makineli hücrelerin bitiş zamanı karşılaştırmaları.

GİRİŞ

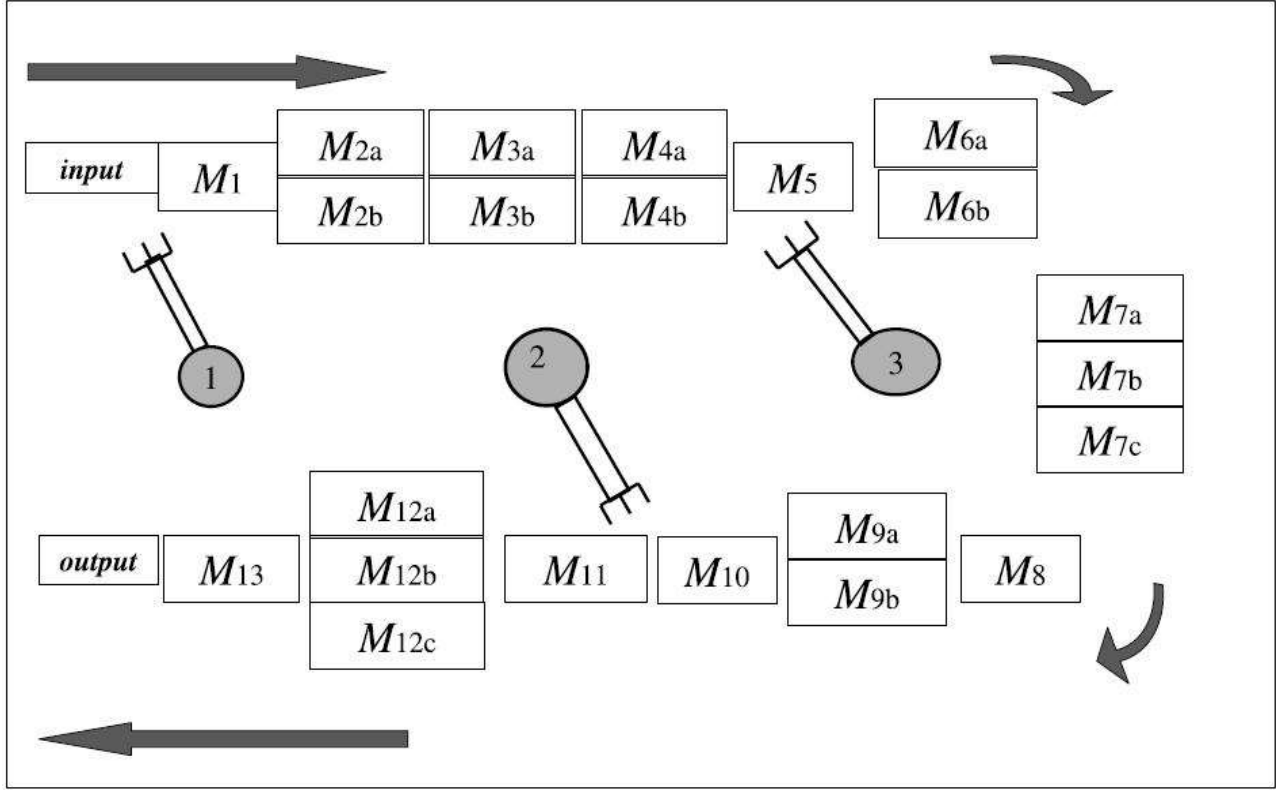
Bitmiş bir parça veya ürün üretmek için gerekli olan, çoklu imalat aşamalarında ham maddeleri ileten bilgisayar-kontrollü malzeme taşıma sistemleri, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Böyle bir uygulama olan robotik hücre, modern imalatta standart bir araç haline gelmiştir. Bu tür hücrelerin etkin kullanımı, çeşitli zorlayıcı kombinasyonel optimizasyon problemlerine algoritmik çözümler gerektirir. Tipik problemler arasında, hücre tasarımı, robot hareketlerinin optimal dizilimi ve üretilecek ürünlerin çizelgenmesi bulunmaktadır.

Birçok farklı endüstride, robotik hücreler kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanı ise yarı iletken üretimidir. Diğer uygulamalar arasında, baskılı devre kartlarından, parçaları arasındaki kimyasal tankları kaldıraçlar vasıtasıyla transfer eden uçak kanatlarına kadar çeşitli ürünlerin elektrokaplama hatları bulunmaktadır. Robotik hücreler aynı zamanda ana bilgisayarlarda kullanılan kartların test edilmesi ve incelenmesi, kamyon diferansiyel montajları için dökümlerin işlenmesi, bilgisayar destekli üretim için vinç çizelgelemesi, tekstil fabrikaları ve motor bloğu imalatı için de kullanılmaktadır. Üreticiler, daha büyük ve daha karmaşık robotik hücreler kullanırken, bu hücrelerin operasyonlarını optimize etmek için daha gelişmiş modeller ve algoritmalar kurmaları gerekmektedir. Bu talebi karşılamanın yollarını bulmak için ise bir dizi çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazıları 1970'lerin sonlarına dayansa da, çoğu çalışma 1990 yılından sonra gerçekleştirilmiştir.

Bir robotik hücre; her biri sabit bir sırayla her bir bölüm üzerinde farklı işlem aşamaları gerçekleştiren bir giriş cihazı ve hücrenin içindeki parçaları taşımakla görevli bir veya daha fazla robot barındıran bir çıkış cihazından oluşmaktadır. Her bir aşamada, o aşamaya ait işlemi gerçekleştiren bir veya birden fazla makine bulunmaktadır. Robotik bir hücrenin varsayılan düzenlenme biçimi; her aşamada bir veya birden fazla makinenin parçalarına tutunabilmesi ve hücre içinde, aşamalar arası ara-depolama için tampon bulundurulmaması şeklindedir. Her makinede sadece bir parça utulabileceğinden, robotik bir hücre, özünde, işleme istasyonları arasındaki tüm materyal transferlerini gerçekleştiren, yaygın sunucuları bulunan, blokajlı bir seri üretim veya atölye tipi üretimdir. Robotik hücrelerde, işlemdeki her fonksiyon bir makine tarafından gerçekleştirilmektedir.

Malzeme taşıma ve makineler arasındaki hareket ve makinelerin yüklenmesi veya boşaltılması, robotlar tarafından gerçekleştirildiğinden, parçaların doğru yönlendirmelerle makinalara yüklenmesini sağlamak için çeşitli uzaktan merkez uyumlu cihazlar bulunmaktadır. Bu gerçekleştirildiğinde, robotlar malzeme kullanımı için avantajlı duruma gelmektedir, çünkü uzun süreler boyunca hız ve hassasiyetle çalışabilmektedirler. Buna ek olarak, bazı ortamlarda kirliliği önlediği için tercih edilmektedirler ve bunun örnekleri arasında, farmasötik bileşimler ve yarı iletken imalatı bulunmaktadır. Diğer imalat ortamları insanlar için rahatsız edici ortamlar olabilmektedir. Bazı yarı iletken imatları vakumla yapılmakta; kaynakçılık ve demircilik uygulamaları yüksek sıcaklık ortamlarında olabilmekte; boyama veya diğer kaplama türlerinin uygulanması zararlı dumanlar yayabilmektedir. Bu nedenle robotlar doğal bir alternatiftir.

Endüstriyel uygulamalarda farklı tipte robotlar kullanılmaktadır. Yarı iletken imalatı için yaygın bir uygulamada, robotun sabit bir tabanı ve dönen bir kolu bulunmaktadır. Böyle bir hücre, genellikle robot merkezli hücre olarak adlandırılmaktadır. Baskılı devre kartlarını elektro kaplama için sıklıkla kullanılan başka bir yapılandırmada ise, robot kaldıraç vasıtasıyla bir destek-işlem hattına bağlanmakta ve tüm robot bu hat boyunca doğrusal olarak hareket etmektedir. Daha genel bir ifade ile bu iki yargı birleştirilmek istenirse; robotun kolu kendi tabanında dönmekte ve robot kendisi etrafındaki bir hat boyunca doğrusal olarak hareket etmektedir. Buna ek olarak, işleme aşamalarında paralel makineler içeren çoklu robot hücreleri, Şekil 1.1 ile gösterilmiştir:



Şekil 1.1 Paralel Makineler İçeren ve Çok-Robotlu Bir Robotik Hücre.

Parçaların veya ürünlerin işlem gereksinimlerinin standartlaştırılması, gerekli sayı ile birlikte tekrarlanan üretim için ideal bir ortam yaratmaktadır. Uygulamadaki tipik kullanımlarında, robotik hücreler, önemli miktarda 4 adet tek parça veya az sayıda yakından ilişkili birkaç parça üretmek için kullanılmaktadır. İşleme gereksinimleri göz önüne alındığında, üreticilerin en çok ilgilendiği amaç, hücre üretkenliğinin maksimize edilmesidir. Üretkenliğin doğal ve yaygın olarak kullanılan bir ölçüsü; birim zaman başına üretilen bitmiş parça sayısı olan, iş hacmidir.

Hücrenin verimini maksimize etme hedefi göz önüne alındığında, iki uyarı dikkate alınmalıdır. Birincisi; hücrenin önemli sayıda üretim yapması, ürünlerin yüksek pazar değeri gibi iş hacmindeki küçük iyileştirmeler ile gelir önemli ölçüde artırılabilir. İkincisi ise; bir takım hücre özelliklerinin iş hacmine olan etkisidir. Bunlar, makinelerin ve robotların işleme hızlarını, hücre düzenini ve robot hareketlerinin sırasını içermektedir. Belirli bir imalat ortamı için, bu özelliklerin nispi etkileri hakkında önceden varılmış bir yargının saptanması genellikle zor olmaktadır.

Pratikte, birçok hücre parametresi fiziksel kısıtlarla sabitlenmekte ve değiştirilememektedir. Hücrenin yerleşiminde genellikle az bir esneklik bulunmakta ve bunu değiştirmenin iş hacmi üzerinde göreceli olarak daha da az etkisi olmaktadır. Çoğu uygulamada, işleme gereksinimleri kurallara uygun yapılmalıdır; Bir aşamada işleme süresinin düşürülmesi, bu işlemin niteliğini ve sonucunu değiştirmektedir. Hücrenin farklı evrelerindeki işlem hızları, mevcut olan en son teknolojiyle kısıtlandırılmıştır. Farklı hızlara sahip çeşitleri mevcut olmasına rağmen, robotlar, önceden belirlenmiş ve değiştirilemeyen bir işlem hızı ile birlikte gelmektedir.

Bir dizi makine ve bir malzeme taşıma robotundan oluşan bir üretim hücresine robotik hücre adı verilmektedir. Bu tür hücrelerin etkin kullanılması, bazı önemli ve zorlu problemlerin üstesinden gelmeyi gerektirmektedir. Robotik hücreler, çok sayıda farklı türde parçalar içeren işlem birimlerini işleyebilmektedir. Genel olarak, farklı türdeki parçaların belirli bir makine için farklı işlem süreleri bulunmaktadır. Çoklu parça tipli problemler, az sayıda makine için bile özdeş parça tipi sayaç problemlerinden daha zordur. En küçük Parça Kümesi (MPS) terimi, parça türünün nispi oranlarının, talebin nispi oranlarıyla aynı olan parça kümesini tanımlamaktadır. İlgilenilen problem, robot hareketlerinin sırasını ve çevrim süresini ortaklaşa minimize eden MPS için parça giriş sırasını bulmaktır.

Çok parçalı üretim kapsamında, robot hareket çevriminin bulunması ve üretim çevrim süresini veya ortalama kararlı durum çevrim süresini ortaklaşa minimize eden parça sıralamasını içeren kararlar alınmaktadır. Buna ek olarak, burada, bir seri üretim sistemi olan ve robotun hücredeki makineleri beslemek için kullanıldığı yerlerde, bir robotik hücredeki robot hareketlerinin ve parçalarının sıralanması sorunu ele alınmaktadır. Bu tezde, tüm parçaları işleyebilen çok sayıda özdeş makinelerin robotik hücreleri üzerine odaklanılmıştır. Paralel makine sistemlerinde robotik hücre çizelgeleme çalışmaları ve mevcut çalışma arasındaki bir diğer ilişki, araştırmacılar tarafından, kabul edilen kurulum işlemleri, mevcut noktadan ilgili makineye kadar olan yolculuk süresi ve yükleme / boşaltma süreleri gibi bir tür robot operasyonu olarak görülebilmektedir.

Bu tezde, eşzamanlı olarak üretim sürecini minimize etmek için, işlemlerin makinelere yerleşimi sağlanırken; aynı zamanda optimum robot hareket döngüsünü bulma problemi dikkate alınmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; makine kapasiteleri daha etkin kullanıldığı takdirde, yerleşimin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada mevcut literatürden farklı olarak, birden fazla özdeş makine düşünülmüş ve problemi çözmek için de Benders ayrıştırma yöntemine dayalı bir yöntem sunulmuştur.

BİRİNCİ BÖLÜM: LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde genel bağlamda, robotik hücrelerdeki döngüsel çizelgeleme için, üretim hızını maksimize etmek ve en uygun robot hareket çevriminin tekrarlarını kullanarak, döngü zamanını en aza indirmek bazında çalışmalar yapılmıştır (Sriskandarajah, Hall, ve Kamoun, 1998). Aslında, tekrarlı olarak üretilen çoklu parça tiplerinde, seçilen *en küçük parça kümesi* (*Minimal Part Set*, MPS) için en uygun çevrim sırasını belirlemeye çalışmak, farklı parça tiplerinin üretimindeki döngüsel sistem çizelgelemesi bakımından özel bir durum olarak düşünülebilir. Dolayısıyla, bu döngüsel sistemlerde MPS için ürünlerin üretim süresini minimize etmek, iş hacmini maksimize etmek veya çevrim süresini minimize etmek şeklinde düşünülebilir.

Sethi vd. (1992) çoklu parça tiplerini içeren, iki ve üç makineli robotik hücreleri ele almıştır. Problemin karmaşıklığını araştırmışlar ve robot hareket çevrimi göz önüne alındığında, çoklu parça döngüsünü belirleyen bir polinomsal zaman algoritması önermişlerdir.

Bilge ve Ulusoy (1995) m-makine (*m-machine*) esnek üretim sistemi içerisinde Otomatik Güdümlü Araçların (*Automatic Guided Vehicles*, AGV) çizelgelemesini incelemişlerdir. Bu çalışmalarıyla, doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama modeli ve ürün üretim süresini en aza indirmeyi amaçlayan bir iterasyon süreci ortaya çıkarmışlardır.

Chen ve Proth (1997) robotik hücreler için, iki-makineli ve m-makinelerin (çok-makine) seri üretimini araştırmışlardır. Robot hareket sıralaması verildiğinde, parçaların optimum çevrimini bulmak için bir dal ve sınır yöntemi algoritması önermişlerdir.

Hall vd. (1998) üç-makineli bir robotik hücrenin karmaşıklığını ve kararlı durum performansını incelemişlerdir. Araştırmalarında, robot hareketlerini ve parça sıralamalarını belirleyerek çevrim süresini minimize etmeye çalışmışlardır.

Sriskandarajah vd. (1998) çok parçalı türleri içeren, çoklu-makine robotik hücrelerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, tek birim robot hareket döngülerinin tümü ile ilişkili olan parça sıralaması problemini dört kategoriye ayırmışlardır: (i) sıralamadan bağımsız; (ii) gezgin satıcı problemi (*travelling salesman problem*, TSP) olarak formülize edilebilen, fakat çözümü polinomsal

olan; (iii) bir TSP ve tekli NP-zor olarak formülize edilebilen; (iv) tekli NP-zor, fakat TSP yapısında olmayan.

Aneja ve Kamoun (1999) iki-makineli robotik bir hücrede robot hareket sırasını ve parça çizelgeleme problemini ortaklaşa optimize eden karmaşıklık algoritmasını $O(n \log n)$ öngörmüşlerdir. Agnetis (2000) Agnetis ve Pacciarelli (2001) bir robotun parçalarının hareket ettirilmesi için kullanılan ve iki ve üç-makineli hücreler için en uygun parça çizelgelerinin bulunduğu, bekleme süresi içermeyen seri üretim probleminin karmaşıklığını incelemişlerdir.

Hurink ve Knust (2001) seri üretim çizelgelerinde, malzemelerin net taşıma kapasitesi ve taşıma sürelerini çalışmışlardır. Buna ek olarak, makineler ve ihmal edilebilir boş hareket saatleri arasında sınırsız bir tampon bölge olduğunu varsaymışlardır. Ayrıca, Hurink ve Knust (2002) tarafından, tek bir robotlu atölye tipi üretim çizelgeleme probleminin, *NP-zor* olduğu ispatlanmış ve tabu arama algoritması önerilmiştir.

Soukhal ve Martineau (2005) çok parçalı tipler ve tek bir taşıma robotu ile seri üretim robotik hücre çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Problemi çözmek için, bir tamsayılı doğrusal programlama modeli ve bir genetik algoritma önermişlerdir. Soukhal vd. (2005) taşıma kısıtlamalarını hesaba katarak, iki-makineli seri üretim çizelgeleme problemini araştırmıştır. Bu gibi durumlarda, biten işler proses tesisinden transfer edilip, daha sonra müşterilere teslim edilmektedir. Engelleme gibi, ek kısıtlar içeren bu problemlerin *NP-zor* olduğu kesin olarak kanıtlanmıştır.

Carlier vd. (2010) tek bir taşıma robotu ve engelleme kısıtlı seri üretim robotik hücre çizelgeleme problemi için yaklaşık ayrıştırma algoritması önermiştir. Başlangıçta, parçaların çevrim sırasını belirlemişler, sonrasında belirlenen parça çevrim sıraları için robot hareketlerini sıraya koymuşlardır.

Kharbeche vd. (2011) tek bir robotla seri üretim robotik hücre çizelgeleme problemi için yeni bir MILP modeli bulmuş ve bir dal ve sınır algoritması önermiştir. Buna ek olarak, büyük ölçekli problemleri çözmek için bir genetik algoritma sunmuşlardır. Zahrouni ve Kamoun (2012) farklı parçalı tipleri içeren üç-makineli seri üretim robotik hücrelerini incelemiş ve Nawaz (1983) NEH algoritması ile sezgisel bir yöntem önermiştir.

Fazel-Zarandi vd. (2013) her bir parçayı yüklemek / boşaltmak için çevrime bağlı kurulum sürelerine sahip iki-makineli robotik hücreleri araştırmışlardır. Verilen parça dizisi için robot hareket sırasını bulmak adına bir MILP modeli önermişlerdir. Buna ek olarak, büyük ölçekli problemleri çözmek için bir dal ve sınır algoritması ve gelişmiş bir SA algoritması geliştirmişlerdir.

Ayrıca, Geismar vd. (2004) paralel makineler ve sabit hareket süresi ile döngüsel seri üretimli tek tutuculu robotik hücreleri incelemişlerdir. Geismar vd. (2006) aynı problemi çift tutuculu robotik hücreler için de incelemiş ve elde edilen döngülerin tek tutuculu robotlu hücrelerdeki olası en iyi döngülere kıyasla daha yüksek verim alındığını belirtmiştir.

Dawande vd. (2005) döngüsel üretim üzerine yoğunlaşmış ve robotik hücre çizelgeleme problemi üzerine bir araştırma yapmıştır. Shafiei-Monfared vd. (2009) tek parçalı tip için, stokastik işleme süreleri ile seri üretim ve açık atölye tipi üretim robotik hücrelerini incelemişlerdir.

Sarkheil ve Jenab (2012) klasik robotlu hücredeki tek birim çevrimlerinin optimalitesini incelemişlerdir. Optimal döngünün, tek tutuculu robot tarafından sunulan robotik hücrelerdeki rastgele sayıda-makine için 1-birim döngüsü olduğunu kanıtlamışlardır.

Buna ek olarak, Geismar vd. (2008) robotik hücreleri, paralel makineler ve çoklu çift tutuculu robotlarla değerlendirmiştir. Robotlar arasındaki değişen parçalar metodunun, iş hacmi üzerinde çok az etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan, işlem basamaklarının robotlara atanmasının, bir hücrenin potansiyel çıktısında önemli bir etkisi olabileceğini iddia etmişlerdir.

Batur vd. (2012) çok parçalı tipler üreten iki-makineli robotik hücrelerdeki çizelgeleme problemini dikkate almışlardır. Çevrim süresini optimize etmek için iki aşamalı bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Foumani ve Jenab (2013) kullanımda olan robotlar üzerinde karşılıklı değiştirme kabiliyeti varsayarak, iki makineli ve özdeş parçalar kullanarak robotik hücre çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır.

Çok parçalı robotik hücre çizelgeleme problemini inceleyen araştırmalar tablo1-1'de gösterilmektedir. Ayrıca tablo 1-1 de bu araştırmanın ilgili literatürdeki yeri belirtilmiştir.

Tablo 1-1 Çok parçalı robotik hücre çizelgeleme problemleri üzerine yapılan araştırmaların sınıflandırılması

Araştırmalar	SN	MS	PCri	RMS	PS	Sol-Proc	Yöntemler
Sethi vd. (1992)	2, 3	1	Serbest	Belirti lmiş	✓	-	Gilmore ve Gomory algoritmasının uygulanması.
Bilge ve Ulusoy (1995)	S	1	Serbest	✓	✓	Paralel	MILP modeli ve iteratif çözüm prosedürü.
Chen vd. (1997)	3, S	1	Serbest	Belirti lmiş	✓	-	Dal-Sınır algoritması.
Hall vd. (1998)	3	1	Serbest	✓	✓	Ayrı	Robot hareket sıralarının NP-bütünlüğü.
Sriskandarajah vd.(1998)	S	1	Serbest	✓	✓	Ayrı	Parça sıralarının 4 gruba ayrılması.
Aneja ve Kamoun (1999)	2	1	Serbest	✓	✓	Ayrı	$O(n \log n)$ algoritması.
Agnetis (2000)	2, 3	1	Beklem e-Yok	✓	✓	Paralel	2-makine durumu için bir $O(n \log n)$ algoritması.3-makine durumunun optimallik analizi.
Hurink ve Knust (2001)	3, S	1	Serbest	✓	✓	Paralel	2, 3 ve m-makineli robotik hücre seri üretiminin karmaşıklık analizi.
Hurink ve Knust (2002)	S	1	Serbest	✓	✓	Paralel	Atölye tipi robotik hücre için tabu arama yaklaşımı.
Soukhal ve Martineau (2005)	S	1	Serbest	✓	✓	Paralel	MILP modeli and genetik algoritma.
Soukhal vd. (2005)	2	1	Serbest	✓	✓	-	Nakliye kapasitesi için karmaşıklık analizi.
Carlier vd. (2010)	S	1	Serbest	✓	✓	Ayrı	Robot hareket sıraları için Dal-Sınır algoritması ve genetik algoritma.
Kharbeche vd.(2010)	S	1	Serbest	✓	✓	Paralel	Bir MILP modeli, yeni bir Alt Sınır ve Dal-Sınır algoritması.
Zahrouni ve Kamoun (2012)	3	1	Serbest	✓	✓	Paralel	3-makineli robotik hücre için yapıcı sezgisel MinMPSCycle.
Fazel-Zarandi vd.(2013)	2	1	Serbest	✓	✓	Paralel	Robotik seri üretim analizinin sıraya bağlı kurulum süresine genişletilmesi.
Elmi ve Topaloglu (2014)	S	M	Serbest	✓	✓	Paralel	Yeni bir MILP modeli ve etkin tavlama simülasyonu algoritması. Her bir aşamada farklı hız makineleri ve makine uygunluk kısıtları.
Bu Çalışma	I	M	Serbest	✓	✓	Paralel	Benders Ayrıştırması' na dayalı kesin bir yöntem.

SN: Aşama Sayısı; MS: Makine Sayısı (her bir aşamadaki); PCri: Pickup Kriteri;

RMS: Robot Hareket Sırası; PS: Parça Sırası; Sol-Proc: RMS ve PS için Çözüm Prosedürü.

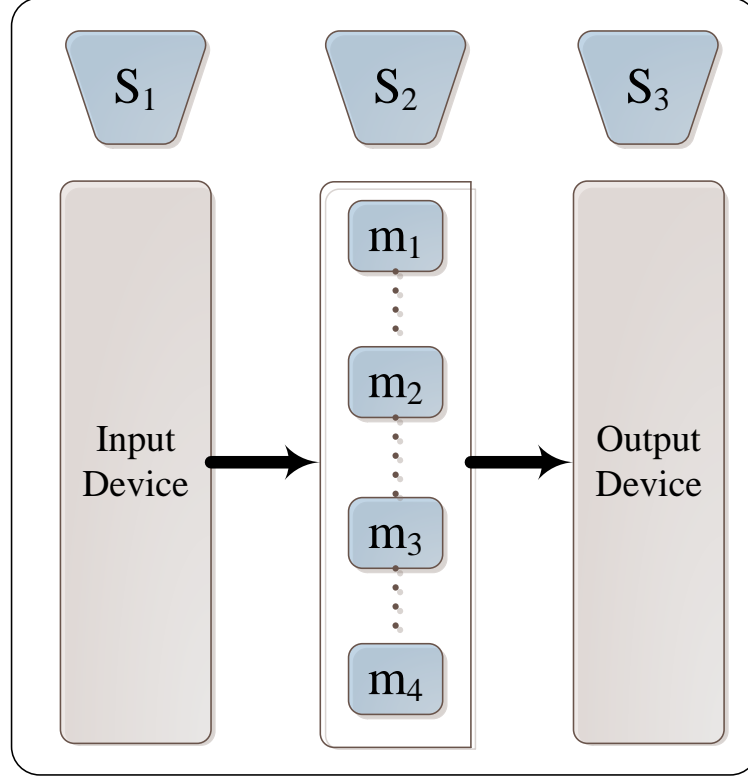
İKİNCİ BÖLÜM: PROBLEM TANITIMI ve ÖNERİLEN KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ

Bu bölümde, bu tez çalışmasında kullanılacak formüller belirtilmiş ve problemimizin biçimsel tanımı yapılmıştır. Bu tez boyunca, özdeş makinelerden oluşan robotik üretim hücrelerine odaklanılmıştır. Robotik hücreler farklı türde parçalardan oluşan partileri işleyebilmektedir. Genellikle, bu parçaların belirli bir makinede farklı işlem süreleri bulunmaktadır. Tam zamanında üretime uygun olarak, parça tiplerinin nispi oranları, her bir partideki talebin nispi oranlarına eşit olmalıdır. Dolayısıyla, araştırmacılar aynı oranlara sahip olan en küçük parça kümesini (MPS) içeren çevrimlere odaklanmaktadır. Örneğin, bir şirketteki üç ürün için talepler; A ürünü için % 40, B ürünü için % 35 ve C ürünü için % 25 olarak dağıtılmıştır. Buna göre, en küçük parça kümesi (MPS)'nin 20 parçası olduğu düşünüldüğünde: A ürününe 8 parça, B ürününe 7 parça ve C ürünü de 5 parça düşmektedir. Birçok uygulamada, robotik hücreler, en küçük parça kümelerinin tekrarlı veya çevrimsel üretiminde kullanılmaktadır. Çok parçalı çizelgeleme problemlerinde, toplam üretim hedefiyle aynı oranlara sahip, mümkün olabilecek en küçük parça seti olarak tanımlanan bir MPS, tekrarlanarak üretilmektedir.

Amaç, çevrimsel bir üretim ortamında bir MPS üretmek için ortalama süreyi minimize etmektir. İş hacmi oranı, bu ortalama sürenin tersi olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, hücre k sayıda farklı parça tiplerini işlemektedir. Bir MPS'de, $i = 1, \dots, k$ olduğu durumda, i tipi r_i parçaları üretilmektedir. Bir çevrimdeki tamamlanmış parça sayısı ise, $n = r_1 + \dots + r_k$, olarak tanımlanmıştır. Bir MPS çevrimi, MPS parçalarının girişte sisteme girdiği, sonrasında işlendiği, çıkışta sistemden ayrılarak sistemi başlangıçtaki aynı durumuna döndürdüğü bir döngü olarak tanımlanmıştır. Ayrıca MPS çevrimi, MPS parçalarının girişten hücrenin içine girdiği sıranın ve hücre içindeki bu parçalarda gerçekleştirilecek işlemlerin çizelgenmesi olarak da tanımlanabilmektedir.

MPS parçalarının sıralanmasına, MPS parça dizisi adı verilmiştir. MPS robot hareket dizisi, bir MPS çevrimi sırasında gerçekleştirilen robot aktivitelerinin sıralanmasıdır. Minimum çevrim süresi ile bir MPS çevriminin hesaplanması iki kat zor olmaktadır. Şöyle ki, bu durumda iki karar alınması gerekmektedir: (a) bir robot hareket sırası seçmek, ve (b) bir parça sırası belirlemektir. Robotik bir hücredeki parçaların optimal olarak çizelgelenmesinin amacı, minimum çevrim süresi ile MPS çevrimini bulmaktır. Bu, çevrim süresinin minimize edilebilmesi için, bir parçanın sırasının ve robot hareket sırasının aynı anda belirlenmesini gerektirmektedir.

Bir makinenin, bir parça türünün tüm işlemlerini gerçekleştirebileceğini ve bu işlemlerin işleme sırasının değiştirilebileceğini belirten operasyonel ve süreç esneklikleri tanımlarına dayanılarak; gerekli tüm işlemleri gerçekleştirebilen, aynı özdeş makinelerin bulunduğu sıralı bir robotik hücre düşünülmektedir. Şekil 2.1 'de bu tür hücreler gösterilmektedir. Her bir parçanın faaliyet göstereceği bilinen işlem sürelerine sahip olduğu kabul edilmektedir. Robotik hücre sistemlerini etkin bir şekilde kullanabilmek için, robot hareketlerinin çizelgelenmesi ve her bir parçanın işlenmesine yönelik makinelerin belirlenmesi problemleri çözülmelidir. Bu çalışmada, işlemleri kendilerine tahsis ederek, makinelerde işlenecek parçalar ve ortaklaşa çevrim süresini minimize edecek robot hareket döngüsü bulunmaya çalışılacaktır.



Şekil 2.1: Paralel makineli robotik hücrelerde örneği

Bu çalışma süresince, parçaların işlem sürelerinin tam sayı değerinde olacağını varsayılmaktadır.

Çalışmamızda ve literatürdeki çalışmalarının bir çoğunda yaygın olan temel varsayımlar şu şekildedir:

- Tüm veriler deterministiktir.
- Parçalar her zaman giriş tamponunda mevcuttur ve çıkış tamponunda daima boş bir yer bulunmaktadır.
- Makineler arasında tampon bellek yoktur, her bir parça, bir makinede veya robot tarafından işlenmektedir.
- Hem robot hem de makineler herhangi bir zamanda birden fazla parçaya sahip olamamaktadır.
- Robot ve işleme makineleri hiçbir zaman arıza yaşamamakta ve asla bakım gerektirmemektedir. Ayrıca, kurulum sürelerinin ihmal edilebilir olduğu varsayılmaktadır.
- Herhangi bir işleme, süreçte öncelik tanınmamaktadır

Yukarıda belirtildiği gibi, bu çalışmada odak noktası olarak çok parçalı üretim alınmıştır. Dolayısıyla, parçaların makinelere tahsis edilmesi, parçaların çizelgelenmesi ve robotik hücreler için robot hareketlerinin sıralanması gibi tüm problemlerin çözülmesi gerekmektedir. Araştırmacılar, optimum parça dizisi ve robot hareket döngüsü için, çevrim süresini verilen işlem süresine göre minimize etmeyi hedeflemektedir.

Çoklu parça türüne sahip olduğu halde, aynı parça türüne ait iki özdeş parça farklı yerleşimlerde olabilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında MPS' deki her bir bölüm, bağımsız bir parça türü olarak değerlendirilmektedir.

Paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli, işlemlerin tamamlanma sürelerine dayalı olarak ürün üretim süresini minimize etmek için önerilmiştir. Açıkça görülmektedir ki, ürün üretim süresini minimize etmek iş hacmini arttırmaktadır. Geliştirilen model aşağıda sunulmaktadır:

2.1 Matematik Problem

2.1.1 İndisler:

$$J = \text{Parça sayısı}, j \in \{1, 2, \dots, J\},$$

$$S = \text{Giriş ve çıkış aşamaları dikkate alınan kademe sayısı}, s \in \{1, 2, 3\},$$

$M_s =$ Giriş ve çıkış aşamalarının sadece bir makineye sahip olduğu s aşamasındaki ilgili makinelerin sayısı, $m \in \{1, 2, \dots, M_s\}$,

$$W = \text{Robotun taşıma işlemlerinin sayısı}, f \in \{1, 2, \dots, W\},$$

2.1.2 Parametreler:

$P_j =$ İşlem aşamasındaki j inci parçanın giriş ve çıkış aşamalarındaki (sırasıyla, $s = 1, 3$) tüm bölümlerin işlem süresi sıfıra eşit olan standart işlem süresi,

$$SP = \text{Robotun işleme hızı},$$

$$BM = \text{çok büyük sayı, geleneksel "Büyük M"}.$$

2.1.3 Karar Değişkenleri:

$X_{j,j'}$ = Eğer j inci parça işlem aşamasında j' inci parçadan önce işlenirse 1; aksi takdirde 0'dır,

$Z_{j,s,f}$ = Eğer s aşamasındaki j parçası, robot tarafından bir sonraki aşamaya aktarılabilirse f inci işlem ise 1,

$Y_{j,s,m}$ = Eğer m makinesi s aşamasında j parçasını işliyor ise 1, aksi takdirde 0'dır.

$D_{j,s}$ = s aşamasından j inci parçanın ayrılma zamanı,

C_{MAX} = Tüm parçaların çıkış cihazına ulaşma süresi.

2.2 Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar:

Minimize : C_{MAX}

$$D_{j,2} + BM \times (2 - (Y_{j,2,m} + Y_{j,1,m'})) \geq D_{j,1} + (SP \times (1 + |m - m'|)) + P_{j,2} \quad (1)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}; m \in M_2; m' \in M_1$$

$$(\sum_m^{M_s} Y_{j,s,m}) = 1 \quad (2)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}; s \in \{1,2,3\}$$

$$(\sum_{f=1}^W Z_{j,s,f}) = 1 \quad (3)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}; s \in \{1,2\}$$

$$(\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^2 Z_{j,s,f}) = 1 \quad (4)$$

$$f \in \{1,2, \dots, W\}$$

$$(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j,2,f}) - BM \times (1 - Z_{j,1,f'}) \leq 0 \quad (5)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}; f' \in \{1,2, \dots, W\}$$

$$(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j,1,f}) - BM \times (3 - Y_{j',2,m} - Y_{j,2,m} - Z_{j',2,f'} + X_{j,j'}) \leq 0 \quad (6)$$

$$j, j' \in \{1,2, \dots, J\}, j \neq j'; m \in M_s; f' \in \{1,2, \dots, W\}$$

$$(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j',1,f}) - BM \times (4 - Y_{j',2,m} - Y_{j,2,m} - Z_{j,2,f'} - X_{j,j'}) \leq 0 \quad (7)$$

$$j, j' \in \{1, 2, \dots, J\}, j \neq j'; m \in M_s; f' \in \{1, 2, \dots, W\}$$

$$D_{j,s} + \left(BM \times (5 - Y_{j,s,m} - Y_{j',s',m'_1} - Y_{j',s'+1,m'_2} - Z_{j',s',f-1} - Z_{j,s,f}) \right) \geq D_{j',s'} + \left(SP \times \left((|s' - (s' + 1)| + |m'_1 - m'_2|) + (|(s' + 1) - s| + |m'_2 - m|) \right) \right) \quad (8)$$

$$j, j' \in \{1, 2, \dots, J\}, j \neq j'; s, s' \in \{1, 2\}; \quad m'_1 \in M_{s'}; m'_2 \in M_{s'+1}; \quad m \in M_s; f \in \{2, \dots, W\}$$

$$C_{MAX} + BM \times (2 - Y_{j,2,m} - Z_{j,2,W}) \geq D_{j,2} + (SP \times (1 + |1 - m|)) \quad (9)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; m \in M_2$$

$$X_{j,j'}, Y_{j,s,m}, Z_{j,s,f} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

Kısıt (1); sadece, giriş aygıtından ayrılmış ve robot ile işlem aşamasına taşınmış bir parçanın işlenebileceğini belirtmektedir. Başka bir deyişle, bir parçanın işlem aşamasından ayrılma süresinin, giriş cihazından ayrılma süresi ile ulaştırma ve işlem sürelerinin toplamına eşit veya bundan daha büyük olmalıdır.

Kısıt (2); bir parçanın yalnızca giriş ve çıkış aşamalarının sıfır-işlem süresi olan tek bir makineye sahip olduğu kabul edilen her aşamadaki makinelerden birinde işlenmesini sağlamaktadır.

Kısıt (3, 4); robotun bir seferde yalnızca bir parçayı transfer ettiğinden emin olmaktadır.

Kısıt (5); bir parçanın ancak bir önceki aşamayı geçtikten sonra, bir sonraki aşamaya geçebileceğini belirtmektedir.

Kısıt (6, 7); aynı makinede bir aşamada işlenen işlem sırasının, robotun boşaltma sırasına göre belirlendiğini belirtmektedir.

Kısıt (8); robot tarafından aynı anda iki boşaltma işleminin gerçekleştirilmemesini sağlamaktadır. Ayrıca bu kısıt, robot tarafından işlenen boşaltma işlemlerinin sırasını da belirtmektedir.

Kısıt (9); ürün üretim süresinin, son parçanın ayrılma zamanının, işlem aşaması ve nakliye süresinin toplamından çıkarılmasına eşit veya bundan daha büyük olduğunu belirtmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: ÇÖZÜM PROSEDÜRÜ: MANTIK TABANLI BENDERS AYRIŞTIRMA METODU

Benders Ayırıştırma (BD) algoritması, Benders (1962) tarafından önerildiğinden bu yana elli yıldan fazla bir süre geçmiştir. Temel amaç, geçici olarak sabitlendiğinde çözülmesi kolaylaşan karmaşık değişkenler ile problemi çözmektir. BD yöntemi (değişken bölümlenme ve dış doğrusallaştırma olarak da adlandırılır), en yaygın kullanılan kesin algoritmalarından biri haline gelmiştir, çünkü problemin yapısından yararlanmakta ve toplam hesaplama yükünü ortadan kaldırmaktadır. Bu yöntem ile birçok çeşitli alanda başarılı uygulamalar bulunmaktadır; planlama ve çizelgeleme Canto (2008) ve Hooker (2007) sağlık Luong (2015) ulaştırma ve telekomünikasyon Costa (2005) enerji ve kaynak yönetimi vd. (2006) ve kimyasal işlemler tasarımı Zhu ve Kuno (2003) dahil olmak üzere, bu uygulamalar. Tablo 3-1 de gösterilmektedir:

Tablo 3- 1 Benders ayrıştırma yönteminin bazı uygulamaları

	Referans	Uygulama
1	Behnamian (2014)	Üretim Planlama
2	Adulyasak vd. (2015)	Üretim Rotalama
3	Boland vd. (2015)	Tesis Yeri
4	Boschetti ve Maniezzo (2009)	Proje Çizelgeleme
5	Botton vd. (2013)	Ağ Tasarımı
6	Cai vd. (2001)	Su Kaynakları Yönetimi
7	Canto (2008)	Bakım Çizelgesi
8	Codato ve Fischetti (2006)	Haritalama
9	Cordeau vd. (2006)	Mantıksal Ağ Tasarımı
10	Cordeau vd. (2001a)	Lokomotif Ataması
11	Cordeau vd. (2001b)	Havayolu Çizelgesi
12	Corréa vd.(2007)	Araç Rotalama
13	Côté vd. (2014)	Şerit Paketleme
14	Fortz ve Poss (2009)	Ağ Tasarımı
15	Gelareh vd. (2015)	Taşımacılık
16	Jenabi vd. (2015)	Güç Yönetimi
17	Jiang vd. (2009)	Dağıtım Planlama
18	Kim vd. (2015)	Stok kontrol
19	Laporte vd. (1994)	Seyyar Satış
20	Luong (2015)	Sağlık Planlaması
21	Maravelias ve Grossmann (2004)	Kimyasal İşlemler Tasarımı
22	Moreno-Centeno ve Karp (2013)	IHS
23	Oliveira vd. (2014)	Yatırım Planlama
24	Osman ve Baki (2014)	Transfer Hattı Dengelemesi
25	Pérez-Galarce vd. (2014)	Kapsama Ağacı
26	Pishvaei vd. (2014)	Tedarik Zinciri Ağı Tasarımı
27	Rubiales vd. (2013)	Hidrotermal Koordinasyon
28	Saharidis vd. (2011)	Rafineri Sistemi Şebeke Planlaması
29	Sen vd. (2015)	Bölüm Dağılımı
30	Bloom (1983)	Kapasite Genişletme
31	Wang vd. (2016)	Optimal Güç Akışı

BD yöntemi, bir proje planlama dizisi, dış doğrusallaştırma ve hafifletmeye dayanmaktadır. Geoffrion (1970a ve 1970b). Bu yüzden, model ilk önce, karmaşık değişkenler kümesi tarafından tanımlanan alt uzay üzerine yoğunlaşmaktadır. Ortaya çıkan formül, sonrasında dualize edilmekte, ilişkili sınır doğruları ve noktaları sırasıyla olurluluk gereksinimlerini (olurlu kesmeler) ve karmaşık değişkenlerin öngörülen maliyetlerini (optimumluk kesmeleri) tanımlamaktadır.

Böylece, eşdeğer bir formülasyon tüm sınır noktaları ve doğruları numaralandırılarak oluşturulabilmektedir. Bununla birlikte, bu numaralandırmayı gerçekleştirmek ve daha sonra ortaya çıkan formülasyonu çözmek, imkansız olmasa da, genellikle hesaplama açısından yorucu olmaktadır. Bu nedenle, olurluluk ve optimumluk kesmelerine bir hafifletme stratejisi uygulanarak eşdeğer modeli çözülmektedir. İhlal edilen kesmeleri oluşturmak ve arama sürecini yönlendirmek için sırasıyla tekrarlı bir şekilde çözülen bir Ana Problem (MP) ve bir alt problem beraberinde getirmektedir.

BD algoritması, önceleri karma tamsayı doğrusal programlama (MILP) problemleri için önerilmiştir. Tamsayı değişkenleri sabitlendiğinde ortaya çıkan problem, kesmeleri geliştirmek için standart dualite teorisi kullanılabilinen sürekli (kesiksiz) doğrusal programlamadır (LP). Birçok ekleme ile, algoritma daha geniş bir problem aralığına uygulanmak için geliştirilmiştir Geoffrion (1972) ve (Hooker ve Ottosson 2003).

Bazı optimizasyon sınıfları üzerinde algoritmanın etkinliğini artırmak için diğer gelişmeler önerilmiştir Costa vd. (2012) ve (Crainic vd. 2014). Buna ek olarak, BD, sıklıkla problemler için etkin sezgisel yöntemlerin tasarımı için bir temel oluşturmaktadır Cote (1984) Raidl (2015). BD yaklaşımı, Tablo 3-2 'de gösterildiği gibi doğrusal, doğrusal olmayan, tamsayı, stokastik, çok aşamalı, iki seviyeli ve diğer optimizasyon problemleri için yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Tablo 3- 2 Benders yöntemi ile ele alınan optimizasyon problemlerine örnekler

Referans	Model
1 Adulyasak vd. (2015)	Çok aşamalı Stokastik Problem
2 Behnamian (2014)	Çok amaçlı MILP
3 Cai vd. (2001)	Çok amaçlı konveks ve doğrusal olmayan problem
5 Cordeau vd. (2001b)	Pure 0–1 formülasyonu
6 Corréa vd. (2007)	Mantıksal ifadeler ile binary problem
7 Gabrel vd. (1999)	Artan maliyet
8 Côté vd. (2014)	Mantıksal kısıtlı MILP
9 de Camargo vd. (2011)	Karma-tamsayılı doğrusal olmayan program (MINLP)
10 Emami vd. (2016)	Robust optimizasyon problemi
11 Fontaine ve Minner (2014)	İki-seviyeli kısıtlı çift-doğrusal problem
12 Fortz ve Poss (2009)	Çok katmanlı kapasite ağ problemi
13 Gendron vd. (2014)	Doğrusal olmayan kısıtlarla binary problem
14 Grothey vd. (1999)	Konveks-doğrusal olmayan problem
15 O’Kelly vd. (2014) İçbükey amaç fonksiyonu ve merdiven kısıt matris yapısı ile MINLP	
16 Jenabi vd. (2015)	Kesitsel doğrusal karma-tamsayı problemi
17 Kim vd. (2015)	Çok aşamalı stokastik program
18 Laporte vd. (1994)	Olasılıksal tamsayı formülasyonu
19 Li (2013)	Büyük ölçekli konveks olmayan MINLP
20 Moreno-Centeno ve Karp (2013)	Önceden bilinmeyen kısıtlamalar problemi
21 Bloom (1983)	Güven kısıtlı doğrusal olmayan çok periyotlu problem
22 Osman ve Baki (2014)	Doğrusal olmayan tamsayı formülasyonu
23 Pérez-Galarce vd. (2014)	En küçük/En büyük pişmanlık problemi
24 Pishvaei vd. (2014)	Çok Amaçlı Olasılıksal Programlama Modeli
25 Raidl vd. (2014)	Tamsayılı, iki-seviyeli, kapasite problemi
27 Rubiales vd. (2013)	İkinci derece MILP ana problemi ve doğrusal olmayan
28 Sahinidis ve Grossmann (1991)	MINLP ve konveks olmayan problem
29 Harjunkoski ve Grossmann (2001)	Mantıksal ve Büyük-M kısıtlı çok aşamalı problem

(Costa, 2005) tarafından yapılan güncel araştırmada, yalnızca sabit bedelli ağ tasarımı problemleri incelenmektedir. Bu çalışmanın asıl amacı; bu boşluğun doldurulmasına şimdiki en son teknolojinin incelenmesi ile katkıda bulunmak, yöntemin hızlandırılması için ana fikirlere odaklanmak, daha genel sorunları halletmeyi amaçlayan ana değişkenleri ve uzantılarını tartışmak ve doğrusal olmayan / tamsayı / kısıtli programlama alt problemlerini , eğilimleri ve umut verici araştırma yönlerini belirleyebilmektir.

3.1 Benders Ayırıştırma Metodu

Bu bölümde, Benders algoritmasının klasik versiyonunu gösterilmiştir (Benders, 1962).

3.1.1 Klasik Versiyon

Modelin bir MILP olduğu düşünölmüştür:

$$\text{Minimize} \quad f^T y + c^T x \quad (1)$$

$$\text{Öyle ki} \quad Ay = b \quad (2)$$

$$By + Dx = d \quad (3)$$

$$X \geq 0 \quad (4)$$

$$y \geq 0 \quad (5)$$

$y \in \mathcal{R}^{n1}$ karmaşık değişkenleri; $A \in \mathcal{R}^{m1 \times n1}$ bilinen bir matris ve $b \in \mathcal{R}^{m1}$ verilen bir vektör olmak üzere, $Ay = b$ kısıt setini karşılaması ve pozitif tam sayı değerlerini alması gerekmektedir. Sürekli değişken $x \in \mathcal{R}^{n2}$, y değişkenleri ile birlikte, $By + Dx = d$ bağlanma kısıtını , $B \in \mathcal{R}^{m2 \times n1}$, $D \in \mathcal{R}^{m2 \times n2}$ ve $d \in \mathcal{R}^{m2}$ ile karşılamalıdır. Amaç fonksiyonu, toplam maliyeti $f \in \mathcal{R}^{n1}$ ve $c \in \mathcal{R}^{n2}$ maliyet vektörleri ile minimize etmektedir.

Model (1-5) şu şekilde yeniden ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \text{Min } \{f^T \bar{y} + \min \{c^T x: D_x = d - B\bar{y}\},\} \\ \hat{y} \in Y \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

İç minimizasyon, $Y = \{y/A_y = b, y \geq 0\}$ kısıt kümesiyle ilişkili π dual değişkenleri vasıtasıyla dualleştirilebilen sürekli bir doğrusal problemdir $Dx = d - B\bar{y}$:

$$\begin{aligned} \text{Min } \{\pi^T d - B\bar{y}\}: \pi^T D \leq c\} \\ \pi \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (7)$$

Dualite teorisine dayanarak, birincil ve dual formülasyonlar, aşağıdaki eşdeğer formülasyonu çıkarmak için değiştirilebilmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Min } \{f^T \bar{y} + \max \{\pi^T d - B\bar{y}\}: \pi^T D \leq c\} \\ \hat{y} \in Y \quad \pi \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (8)$$

İç maksimizasyonun olurlu alanı, şöyle ki, $F = \{\pi \mid \pi^T D \leq c\}$, \bar{y} 'nin seçiminden bağımsızdır. Dolayısıyla, F boş küme değilse, iç problem, herhangi bir \bar{y} rastgele seçimi için sonsuz ya da olurlu olabilmektedir. İlk durumda; $r^T (d - B\bar{y}) > 0$, r_q , $q \in Q$ için; sonsuzluk mevcuttur; Bu durumdan kaçınılmalıdır, çünkü \bar{y} 'nin çözümsüzlüğünü belirtmektedir. Kesme eklendiği

$$r_q^T (d - B\bar{y}) \leq 0 \quad \forall q \in Q \quad (9)$$

Model (9) un tüm kesmelerini dış minimizasyona eklersek, iç problemin değeri kendi sınır noktalarından biri olacaktır. Bu nedenle, model (8) şu şekilde yeniden formüle edilebilmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Min } \quad f^T \bar{y} + \max \{\pi_e^T (d - B\bar{y})\} \\ \hat{y} \in Y \quad e \in E \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Öyle ki} \quad r_q^T (d - B\bar{y}) \leq 0 \quad \forall q \in Q \quad (11)$$

Bu problem, Benders Ana Problemi (MP) olarak adlandırdığımız problem (1-5) için aşağıdaki denk formülasyon ile sürekli bir değişken olan $\eta \in \mathcal{Q}$ vasıtasıyla kolay bir şekilde doğrusal hale getirilebilmektedir:

$$\text{Min}_{\hat{y}, \eta} \quad f^T y + \eta \quad (12)$$

$$\text{Öyle ki} \quad Ay = b \quad (13)$$

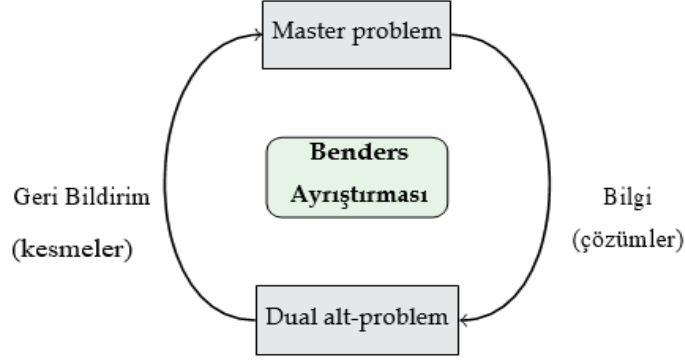
$$\eta \geq \pi^T (d - By) \quad \forall e \in E \quad (14)$$

$$0 \geq r^T (d - By) \quad \forall q \in Q \quad (15)$$

$$y \geq 0 \text{ ve tamsayı}$$

Kısıt (14) ve (15) 'e sırasıyla optimumluk ve olurluluk kesmeleri adı verilmiştir. Bu kesmelerin bütün olarak listelenmesi genellikle pratik değildir. Bu nedenle, Benders (1962), olurluluk ve optimallik kesmelerine bir hafifletme ve iteratif bir yaklaşım önermiştir. Böylece, BD algoritması, y değişkenleri için bir deneme değeri elde etmek için (14) ve (15) kısıtlarının sadece bir alt kümesini içeren MP'yi tekrarlı bir şekilde çözmektedir. Daha sonra y^- ile birlikte alt problemi çözmektedir. Alt problem olurlu ve sınırlanmışsa, (14) tipi bir kesme üretilmektedir. Alt problem sınırlanmamışsa, (15) teki türde bir kesim üretilmektedir. Kesmeler mevcut çözüm ile ihlal edilirse, bunlar mevcut MP'ye sokulmakta ve süreç tekrarlanmaktadır.

Şekil.3.1 BD algoritmasını göstermektedir. İlk MP ve altproblemi türettikten sonra, algoritma, MP ve altproblem arasında (MP'den başlayarak) en uygun çözüm bulunana kadar sürekli olarak, sıra ile yapılmaktadır. MP'nin amaç fonksiyonu, eşdeğer Benders-yeniden formülasyonunun bir hafifletmesi olduğundan optimum maliyet üzerinde geçerli düşük bir sınır vermektedir. Bunun yanı sıra, orjinal formülasyonda y^- ifadesini sabitlemeye eşdeğer olan alt problemin objektif değeri ile y^- çözümünün birleştirilmesi, optimal maliyet üzerinde geçerli bir üst sınır getirmektedir.



Şekil 3.1 Benders ayrıştırma yönteminin şematik gösterimi.

3.2 Benders Ayrıştırması için Model Seçimi

Verilen bir problem, genellikle farklı ama eşdeğer formülasyonlar ile modellenebilmektedir. Bununla birlikte, hesaplama açısından çeşitli formülasyonlar eşdeğer olmayabilmektedir. Geoffrion ve Graves (1974) formülasyonun BD' nin performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Magnanti ve Wong (1981) daha güçlü bir doğrusal programlama hafifletmesine sahip bir formülasyonun daha iyi performans göstereceğini göstermiştir. Bu, daha küçük kesirli değişkenlerin sayısının ve ayrıca kesme kısımların büyük olasılıkla daha güçlü olması nedeniyle oluşmaktadır.

Sahinidis ve Grossmann (1991) sıfır NLP hafifletme aralığına sahip karma tamsayı doğrusal olmayan programlama (NLP) formülasyonuna uygulanan BD yönteminin yakınsama için sadece en uygun çözüme karşılık gelen kesmenin gerekliliğini kanıtlamıştır. Cordeau vd. (2006) stokastik bir lojistik ağ tasarımı problemi üzerinde çalışmışlardır. Orijinal formülasyon bir dizi geçerli eşitsizlikler (VIs) ile güçlendirildiğinde BD yönteminin performansının önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır.

Bu gözlemler, BD yöntemi bağlamında sıkı formülasyonların önemini açığa çıkarmıştır. Bununla birlikte, sıkı formülasyonlar genellikle ek kısıtlar eklenerek elde edilmektedir. Bu, daha yüksek derecede yakınsama gösterebilen, daha zaman alıcı bir alt problemin ortaya çıkmasıyla sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle, iterasyon sayısındaki azalma ile alt probleme gelecek ek zorluklar arasında bir dengeleme olmalıdır.

3.3 Diğer Ayrıştırma Metodları ile İlişkiler

BD yöntemi, doğrusal programlama için Dantzig-Wolfe ve Lagrangian optimizasyonu gibi diğer ayrıştırma yöntemleriyle yakından ilişkilidir (Lim 2010). Özellikle, bir doğrusal programlamanın Dantzig-Wolfe ayrıştırması ile çözülmesi, BD yaklaşımına dualite uygulanmasına eşdeğerdir. Dantzig-Wolfe ile BD yöntemleri arasında problemler için karmaşık değişkenlerin dual olması nedeniyle son derece açık bir ilişki mevcuttur. Alt problemlerin iki yöntemde de eşdeğer olduğu unutulmaması gerekmektedir. BD yöntemi, ayrıca Lagrange dualine uygulanan bir kesen düzlem metoduna eşdeğerdir.

Tamsayılı programlamada, durum daha karmaşıktır ve ayrıştırma yöntemleri arasında basit bir ilişki bulunmamaktadır. Lagrange hafifletmesi ve Dantzig-Wolfe ayrıştırmasının aksine, BD yöntemi, sorunun hafifletilmesinden ziyade MILP' ye doğrudan optimal bir çözüm getirmektedir.

Son olarak, Benders kesmeleri ile çeşitli klasik eşitsizlikler arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır (Magnanti vd. 1986). Örneğin, Costa vd. (2009) eşitsizliklerin temelde Benders olurluluk kesmeleri olduğunu göstermiştir. Klasik BD yöntemi, çeşitli artırma ve ivme stratejileri önerilen sayısal ve teorik sınırlamalara sahiptir.

Bu tez, kaynak kısıtları ile paralel makine çizelgelemesi gibi imalat bağlamında sıklıkla ortaya çıkan bir çizelgeleme problemini ele almaktadır. Parçalar, tesislere atanmalı ve her tesis üzerinde, işlem sürelerine bağlı olarak çizelgelenmelidir. Belirli bir tesise atanan parçalardan bazıları herhangi bir zamanda paralel olarak çalışmamaktadır. Öncelikli kısıtlar, parçaların nakliye işlemleri nedeniyle gözardı edilmektedir. Amaç, üretim süresini minimize etmektir. Bu tür problemler sıklıkla ortaya çıkmasına rağmen, çözümün oldukça zor olduğu kanıtlanmıştır. Etkili bir biçimsel algoritmanın yokluğunda, uygulamada genellikle sağduyulu bir yaklaşım kullanılmaktadır. Problem, atama kısmı ve çizelgeleme kısmı olarak ayrıştırılabilmektedir. Probleme bir çözüm metodolojisi olarak Benders ayrıştırma yöntemi uygulanabilmektedir.

Benders ana problemi, tesislere bölümler tahsis etmekte; alt problem ise, birkaç bağımsız çizelgeleme problemlerine ayrılmaktadır. Benders ana problemine eklenen kesmeler, ilgili tahsislerden kaçınmak için olan operasyonların matematiksel karşılıklarıdır. Normal koşullar altında, Benders algoritması, toplam tahsis ve çizelgeleme problemlerinin optimal çözümü ile son bulmaktadır.

Alt problem, ya sürekli doğrusal ya da doğrusal olmayan bir programlama problemi olmasını gerektirdiğinden, klasik Benders yaklaşımı Benders (1962) ve Geoffrion (1972) bu problem için uygun olmamaktadır. Çizelgeleme; herhangi bir doğrusal veya doğrusal olmayan programlama modeline sahip olmayan, oldukça kombinasyonel bir problemdir. Neyse ki Benders ayrıştırma fikri, kesikli bir çizelgeleme problemi gibi rastgele bir alt probleminin yer aldığı mantık tabanlı bir forma genişletilebilmektedir. Bu çalışma, mantık tabanlı Benders yönteminin paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemine nasıl uygulanabileceğini araştırmaktadır.

Klasik Benders yaklaşımının aksine, mantık tabanlı Benders, Benders kesmelerini üretmek için standart bir şema oluşturamamaktadır. Her bir problem sınıfı için kesmeler oluşturulmalıdır ve bu araştırmanın temel hedefi, bu eylemin paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemi için yapılabileceğini göstermektir.

Klasik Benders ayrıştırması, birincil değişkenlerin değerlerini numaralandırarak problemi çözmektedir. Numaralandırılan her bir değer kümesi için, birincil değişkenlerin bu değerlere sabitlenmesinden kaynaklanan alt problemi çözülmektedir. (Bizim çalışmamızda, birincil değişkenler parçaların makinalara tahsisini ifade etmektedir.) Alt problemin çözümü, numaralandırılmış sonraki tüm çözümlerde birincil değişkenleri karşılaşmasını gerektiren Benders kesmesini üretmektedir.

Benders kesmesi, bir alt problem dualinin çözümünden elde edilen Lagrange çarpanlarına dayanan lineer bir eşitsizliktir. Birincil değişkenler için bir sonraki değer kümesi, şimdiye kadar üretilen tüm Benders kesmelerini içeren ana problemi çözerek elde edilmektedir. Süreç, ana problem ve alt problem bir değerde birleşinceye kadar devam etmektedir. Mantık tabanlı Benders ayrıştırması, Hooker ve Yan (1995) tarafından mantık devresi doğrulaması bağlamında açıklanmıştır. Fikir, resmen Hooker (2000) tarafından geliştirilmiş ve Hooker ve Ottosson (2003) tarafından 0-1 programlaması üzerinde uygulanmıştır.

Mantık tabanlı Benders ' da, Benders kesmeleri, alt problemin tahmin duali çözülerek elde edilmektedir. Tahmin dualinin çözümü, birincil değişkenler mevcut değerlerine sabitlendiğinde bir optimallik ispatı olarak görülmektedir. Benders kesmesi, birincil değişkenler başka değerler aldığı anda optimum değer üzerinde geçerli bir sınır elde etmek için bu aynı ispat kullanılarak oluşturulmuştur. Mantık tabanlı Benders kesmeleri, herhangi bir formda varsayılabilecek olmasına

rağmen, mevcut bağlamda doğrusal eşitsizlikler olarak formüle edilmelidir; çünkü ana problem MILP'dir.

Mantık tabanlı Benders uygulaması, planlama ve çizelgeleme için Hooker (2000) tarafından önerilmiş ve ilk kez Jain ve Grossmann (2001) tarafından uygulanmıştır. Bu fikri, kümülatif çizelgeleme problemlerine uygulamaktan çok; alt problemlerinin görevlerin tek tek yapılması gereken ayrık çizelgeleme problemi olduğu, minimum maliyetli planlama ve çizelgeleme problemlerine uygulamışlardır. Harjunkoski ve Grossmann (2002) bu çalışmayı çok aşamalı problemlere kadar genişletmiştir. Benders kesmeleri bu durumlarda özellikle basittir, çünkü alt problem bir optimizasyon probleminden çok, bir olurluluk problemidir. Hooker (2005) gecikmiş iş sayısını minimize etmek için Benders yöntemini uygulamıştır. Chu ve Xia (2005) alt problemin tamsayı programlama modeliyle Benders kesmeleri üreterek minimum üretim süresi problemini çözmüşlerdir, fakat hızlanmalar burada rapor edilenlerden önemli ölçüde daha az olmuştur. Hooker (2000) ana problemin yalnızca bir kez, Benders kesmelerini ürettikçe biriktiren bir dallanma algoritması ile çözülmesi gerektiğini gözlemlemiştir.

Thorsteinsson (2001) bu yaklaşımın, Jain ve Grossmann (2001) ın problemleri üzerinde standart mantık tabanlı Benders 'lardan çok daha iyi bir performans sergileyebileceğini göstermiştir. Mantık tabanlı Benders yöntemleri, tamsayı programlama problemlerini Chu ve Xia (2004) Hooker ve Ottosson (2003) ve önermeli tatmin edilebilirlik problemini Hooker (2000) Hooker ve Ottosson (2003) çözüme üzerine uyarlamıştır.

Benzer düşünceler, otomatik kılavuzlu araçların minimum sevkiyat sürelerine Correa vd. (2004) çelik üretim çizelgelemesine Harjunkoski ve Grossmann (2002) bilgisayar işlemcilerinin gerçek zamanlı çizelgelemesine Cambazard vd. (2004) trafik güzergah yöntemine Chu ve Xia (2004) Kimyasal bir fabrikada parti çizelgeleme Maravelias ve Grossmann (2004) ve polipropilen parti çizelgeleme Timpe (2002) çalışmalarında uygulanmıştır. Bütün bu uygulamalarda (tamsayı programlama hariç) alt problem olurluluk problemidir.

Mantık Tabanlı Benders Ayrıştırması (LBBD), Hooker (2000) Hooker ve Ottosson (2003) Hooker ve Yan (1995) tarafından geliştirilen klasik Benders Ayrıştırması'nın Benders (1962) genellemesidir. Mantıksal devrelerin doğrulanması Hooker ve Yan (1995) planlama ve çizelgeleme Bajestani ve Beck (2013) Benini vd. (2005) Hooker (2005, 2007) stokastik ve deterministik konum / filo yönetimi Fazel-Zarandi ve Beck (2012) Fazel-Zarandi vd. (2013) ve

kuyruk tasarımı ve kontrolü Terekho vd. (2009) çalışmalarını içeren çok çeşitli kombinasyonel optimizasyon problemlerinde uygulanmıştır.

Bu çalışmada, Hooker ve Ottosson (2003) 'a göre notasyon ve açıklama sunulmaktadır. LBBD de bir problemi modellemek için, öncelikle karar değişkenlerini iki vektöre (x ve y) ayırmak gerekmektedir. Genellikle, problem aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize } f(x, y) \quad (16)$$

$$\text{s.t. } (x, y) \in S, \quad (17)$$

$$x \in D_x, y \in D_y \quad (18)$$

Burada; f: gerçekteğerli bir fonksiyondur; S: olurlu küme (genellikle kısıtların toplanmasıyla tanımlanmaktadır) ve D_x ve D_y : sırasıyla x ve y 'nin etkinlik alanlarıdır. Problem, sadece x'i içeren veya ana problem değişkenleri ve alt problem değişkenleri x ve y 'yi karıştıran kısıtlara bölünmüştür. Ana problemde yalnızca x değişkenleri dikkate alındığından, olurlu set S, hafifleticidir ve S^- olarak gösterilmektedir. Klasik Benders ayrıştırılmalarından farklı olarak, ayrışmanın farklı bileşenleri üzerinde yapısal kısıtlamalar (ör.doğrusallık) yoktur. Ana problem aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir:

$$\text{Minimize } z \quad (19)$$

$$\text{s.t. } x \in \bar{S}, \quad (20)$$

$$z \geq \beta_{x^k}(x), \quad k=1, \dots, K \quad (21)$$

$$x \in D_x . \quad (22)$$

Burada z , gerçek değerli bir karar değişkenidir; S^- , S 'nin bir hafifletmesidir ve $\beta^k(x)$ 'in x^k 'ye sabitlenmesinde bulunan amaç fonksiyonu $f(x, y)$ üzerindeki Benders kesmeleridir. Kısıt (20), alt problemin çözülmesinden türetilir ve $x^1 \dots x^k$, önceki iterasyonlarda bulunan ana problem çözümlerindeki x değişkeninin değerleridir. İterasyon- k için alt problem:

$$\text{Minimize } f(x^k, y) \quad (23)$$

$$\text{s.t. } (x^k, y) \in S \quad (24)$$

$$y \in D_y. \quad (25)$$

Bir LBBD modelinin çözülmesi, tekrarlı bir şekilde ana problemin ve alt problemlerin yakınsanmasına kadar çözülmesini içermektedir. Ana problem, iterasyon- k da, z^k maliyeti ile x^k üretmek amacıyla optimal durum için çözülmüştür. Daha sonra bu çözüm, her biri z üzerinde üretilen sınırlayıcı fonksiyonların (Benders kesenleri) çözülmesi, bir veya daha fazla alt problemi formüle etmek için kullanılmıştır. Eğer k inci ana problemin çözümü iterasyon-1 den iterasyon- k ya kadar elde edilen tüm yeni sınırlayıcı fonksiyonları karşılırsa, yöntem optimum çözüme yakınsanmıştır ($z^k = f(x^k, y^k)$; y^k , Alt problemin çözümü). Aksi takdirde, Ana problem tekrar çözülmeli ve iterasyonlar devam etmelidir. Uygun koşullar altında Benders kesmeleri üzerinde, işlemin sonlu sayıda iterasyonlarla optimal bir çözüme yaklaştığı gösterilebilmektedir (Chu ve Xia 2005).

3.4 Ana Problem

Burada, işleme aşamasındaki (ikinci aşama) her bir makinenin toplam işlem süresi ve de üretim süresi minimize edilirken, işler makinelere atanmaktadır. Ana problemde robot hareket süreleri dikkate alınmamaktadır. Bu atama, tüm makineler için uygulanabilir bir çizelgeyi de beraberinde getirmektedir. Ana problem aşağıda gösterilmiştir:

[MP]: Minimize C_{MAX}

Öyle ki:

$$\left(\sum_m^{M_s} Y_{j,2,m}\right) = 1 \quad (26)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}; s \in \{1,2,3\}$$

$$Y_{j,1,1} = 1 \quad (27)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}$$

$$Y_{j,3,1} = 1 \quad (28)$$

$$j \in \{1,2, \dots, J\}$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{j,2,m} \times P_{j,2} \leq C_{max} \quad (29)$$

$$m \in M_2$$

$$Cut_c \in Cutset \quad (30)$$

$$c \in \{1,2, \dots, |Cutset|\}$$

3.5 Alt problem

Ana problem işleme aşamasında işleri makinelere atamadan önce, makinelerdeki işlerin ve nakliye işlemlerinin sırası belirlenmelidir. Her makinedeki iş kümeleri bilindiği takdirde, alt problem oluşturulmaktadır. Robot tabanlı alt problem, işlerin ve nakliye operasyonlarının sırasını bulup, üretim süresini minimize etmiş olacaktır. Her bir iterasyonda, aşağıdaki alt problem çözülmüş ve makine atamaları için ilgili mantıksal kesmeler oluşturulmuştur:

[SP]: Minimize C_{\max}^{SP}

$$D_{j,2} \geq D_{j,1} + (\text{SP} \times (1 + |m - m'|)) + P_{j,2} \quad (31)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; m \in M_2; m' \in M_1; \bar{Y}_{j,2,m} = \bar{Y}_{j,1,m'} = 1$$

$$\left(\sum_{f=1}^W Z_{j,s,f} \right) = 1 \quad (32)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; s \in \{1, 2\}$$

$$\left(\sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^2 Z_{j,s,f} \right) = 1 \quad (33)$$

$$f \in \{1, 2, \dots, W\}$$

$$\left(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j,2,f} \right) - \text{BM} \times (1 - Z_{j,1,f'}) \leq 0 \quad (34)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; f' \in \{1, 2, \dots, W\}$$

$$\left(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j,1,f} \right) - \text{BM} \times (1 - Z_{j',2,f'} + X_{j,j'}) \leq 0 \quad (35)$$

$$j, j' \in \{1, 2, \dots, J\}, j \neq j'; m \in M_s; f' \in \{1, 2, \dots, W\}; \bar{Y}_{j',2,m} = \bar{Y}_{j,2,m} = 1$$

$$\left(\sum_{f=1}^{f'} Z_{j',1,f} \right) - \text{BM} \times (2 - Z_{j,2,f'} - X_{j,j'}) \leq 0 \quad (36)$$

$$j, j' \in \{1, 2, \dots, J\}, j \neq j'; m \in M_s; f' \in \{1, 2, \dots, W\}; \bar{Y}_{j',2,m} = \bar{Y}_{j,2,m} = 1$$

$$D_{j,s} + \left(\text{BM} \times (2 - Z_{j',s',f-1} - Z_{j,s,f}) \right) \geq D_{j',s'} + \left(\text{SP} \times (|(s' - (s' + 1)| + |m'_1 - m'_2|) + (|(s' + 1) - s| + |m'_2 - m|)) \right) \quad (37)$$

$$j, j' \in \{1, 2, \dots, J\}, j \neq j'; s, s' \in \{1, 2\}; m'_1 \in M_{s'}; m'_2 \in M_{s'+1};$$

$$m \in M_s; f \in \{2, \dots, W\}$$

$$; \bar{Y}_{j,s,m} = \bar{Y}_{j',s',m'_1} = \bar{Y}_{j',s'+1,m'_2} = 1$$

$$C_{\max}^{\text{SP}} + \text{BM} \times (2 - Z_{j,2,W}) \geq D_{j,2} + (\text{SP} \times (1 + |1 - m|)) \quad (38)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; m \in M_2; \bar{Y}_{j,2,m} = 1$$

$$X_{j,j'}, Z_{j,s,f} \in \{0, 1\} \quad (39)$$

3.6 Mantık Tabanlı Benders Kesmeleri

Ana problem için bir çözüm bulunduğunda, mantık tabanlı Benders kesmesi yaratılmakta ve ana probleme eklenmektedir, böylelikle daha iyi çözümler bulmak adına ana probleme etkin bir şekilde yol gösterilmektedir. Alt problemden oluşturulmuş kesmeler şu şekildedir:

$$lbcut \equiv \left\{ C_{max}^{SP} - BM \times \left(\sum_{m=1}^{M2} \sum_{j=1}^J \bar{Y}_{j,2,m}=0 Y_{j,2,m} + \sum_{m=1}^{M2} \sum_{j=1}^J \bar{Y}_{j,2,m}=1 (1 - Y_{j,2,m}) \right) \leq C_{MAX} \right\} \quad (40)$$

Burada, her bir makineye atanmış işler dolayısıyla tüm *lbcut* kesmeleri ana probleme dahil edilecektir. Bahsi geçen kesmeler, tüm nakliye operasyonlarının optimum sırasını göz önünde bulundurarak operasyonların gerçek tamamlanma zamanını sağlamaktadır.

lbcut, ana problemin amaç fonksiyonunu, tek bir robotla tahsis edilen paralel makine çizelgelemesinin amaç fonksiyonundan büyük veya eşit olmaya zorlamaktadır. Bu nedenle, ana problem, eğer mümkünse bu durumdan kurtulmak adına farklı atamalar bulmak için yol aramaktadır.

Başlatma: $UB = \infty$, $LB = 0$, $Cutset = \emptyset$

$(LB \neq UB)$ İken

- 1) **Cutset** göz önüne alınarak [**MP**] çözülür , çözüm elde edilir ($\bar{Y}_{j,s,m} \leftarrow Y_{j,s,m}$),
- 2) Update $LB \leftarrow C_{MAX}$
- 3) [**SP**] çözülür ve çözüm elde edilir C_{max}^{SP}
- 4) Update $UB \leftarrow C_{max}^{SP}$
- 5) Mantık tabanlı kesme olarak **lbcut** oluşturulur
- 6) Kesme setleri update edilir: $Cutset \leftarrow Cutset + lbcut$

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM: SAYISAL BULGULAR

Paralel makineli robotik hücrenin çizelgeleme problemi için önerilen MILP matematiksel model ve LBBD yöntemi algoritmaları, C # 2012'de kodlanmış ve 3.30 Gigahertz hız, 4 Gigabyte RAM ve WINDOWS 64-bit işletim sistemi ile Core TM i5-4590 CPU da çalışılmıştır.

Hesaplamalı analizin bu kısmı, LBBD'nin ve MILP'nin, göz önüne alınan örneklerin, çözümlene süresi açısından performans değerlendirmesiyle ilgilidir. LBBD, Visual Studio C # 2012'de kodlanmıştır ve karşılaştırma amacıyla en fazla bir saat çalışmasına izin verilmiştir. Sonuçlar sırasıyla, hem MILP hem de LBBD için oluşturulan örnekler bazında tablo 4.1'de sunulmuştur. Tabloların sütunları açıklayıcı niteliktedir. Ek olarak, tablolar, SP ve MP için toplam çözüm sürelerini (CPU zamanları) içermektedir.

Tablo 4-1'de görüldüğü üzere, LBBD yöntemi, 45 örneği, hesaplama süresinin birkaç dakikasında optimal hale getirebilmektedir, MILP ise sadece 15 problemi çözebilmektedir. Bahsedilen problemlerde 50 adet parça (16-25) bir saat içerisinde optimal duruma getirilememiştir. Elde edilen ürün üretim süresi değerleri, bir saat içinde bulunan ve optimum olmayan değerlerdir. Tablo 4. 1. önerilen LBBD yönteminin duyarlılığını göstermektedir.

Şekil 4. 1' de, her problem için, LBBD yöntemi ile çözülen tüm MP ve SP modellerinin toplam CPU süreleri karşılaştırılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, SP modellerinin çalışma süresinin toplamı, MP modellerinden daha büyüktür. MP sadece parçalar için makine atamalarını belirlemekte iken; SP probleminin karmaşıklığı, parça sıralamalarını belirleme ve nakliye operasyon sıralamalarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4. 2 de, 20 ,30,40 ve 50 parça sayısı için 3 ve 5 makineli sistemler arasındaki seri üretim farklarını göstermektedir. Parçaların sayısı arttıkça, 3-5 paralel makineler arasındaki seri üretim süresi farkının arttığı açıkça görülmektedir. Robotik hücredeki parçaların sayısı arttıkça, paralel makinelerin sayısının arttırılması daha etkili olacaktır sonucuna varılabilmektedir.

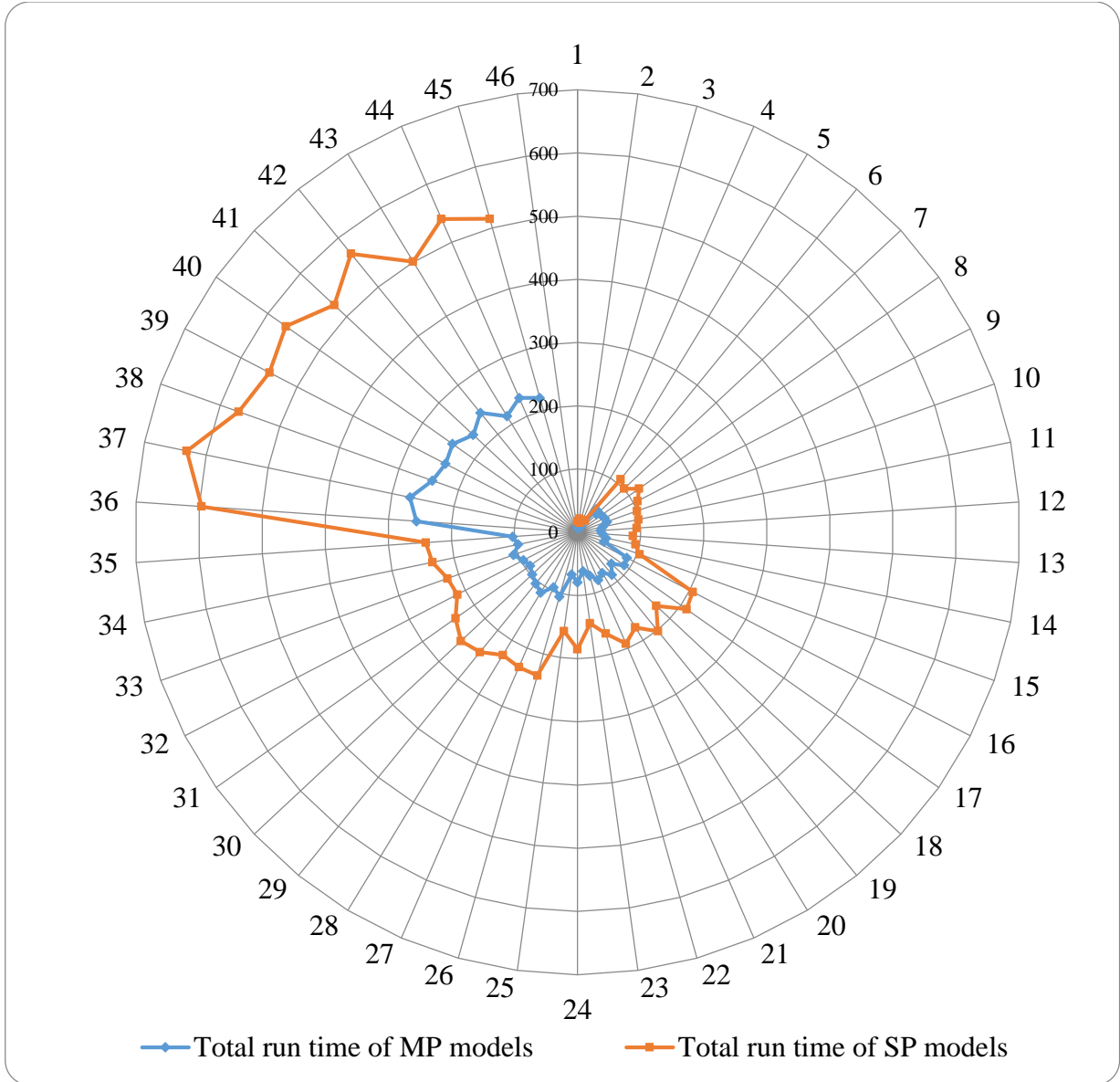
Ayrıca, paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemi için önerilen LBBD yönteminin çalışma süresi, paralel makinelerin sayısından etkilenmektedir. 6-10 ve 16-20 problemleri için LBBD yönteminin çalışma süresi, sırasıyla 11-15 ve 20-25 problemlerinden daha fazladır.

Paralel makine sayısının az olduğu durumda, her bir makineye atanan parçalar için çözüm sayısı, paralel makine sayısının çok olduğu durumdan daha fazladır. Dolayısıyla, kesme ve iterasyonların sayısı arttıkça LBBD'nin çalışma süresi artmaktadır.

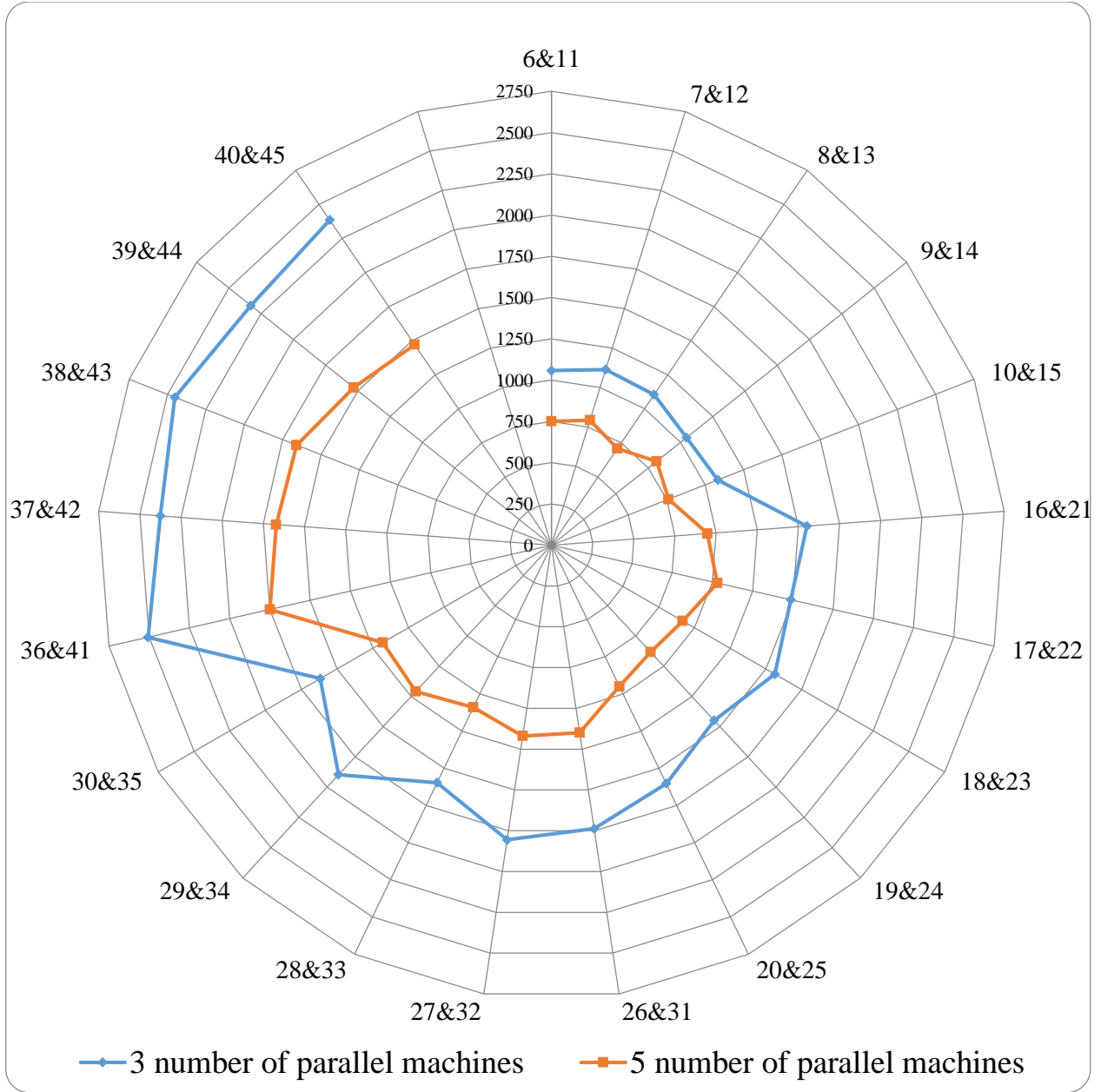
Tablo 4- 1 Paralel makine robotik hücre çizelgeleme problemi için önerilen MILP modeli ve LBBD yönteminin hesaplama sonuçları.

parça	Makine	Üretim Süresi		CPU Süresi		Toplam CPU Süresi		GAP %	Problem
		MILP	LBBD	MILP	LBBD	MP	SP		
10	3	492	492	1105.38	24.35	7.06	17.28	0	1
		421	421	1214.15	31.61	9.79	21.81	0	2
		503	503	1005.54	22.26	6.67	15.58	0	3
		516	516	1116.54	26.81	7.50	19.30	0	4
		488	488	1204.64	33.10	10.92	22.17	0	5
20	3	1058	1058	2166.72	154.75	46.42	108.32	0	6
		1114	1114	2018.33	142.29	41.26	101.02	0	7
		1104	1104	1974.87	165.67	46.38	119.28	0	8
		1046	1046	2083.77	155.15	48.09	107.05	0	9
		1083	1083	2117.33	149.31	49.27	100.03	0	10
	5	751	751	3124.12	138.85	40.26	98.58	0	11
		793	793	3101.52	130.19	36.45	93.73	0	12
		709	709	3204.96	127.73	39.59	88.13	0	13
		815	815	2961.24	139.95	46.18	93.76	0	14
		762	762	3087.57	149.11	44.73	104.37	0	15
30	3	1731	1552	3600	293.47	88.04	205.42	-10.34	16
		1803	1487	3600	301.91	90.57	211.33	-17.52	17
		1792	1563	3600	243.55	73.06	170.48	-12.77	18
		1649	1449	3600	288.47	86.54	201.92	-12.12	19
		1711	1603	3600	251.79	75.53	176.25	-6.31	20
	5	1293	947	3600	274.61	82.38	192.22	-26.75	21
		1351	1031	3600	237.89	71.36	166.52	-23.68	22
		1285	918	3600	208.06	62.41	145.64	-28.56	23
		1291	883	3600	264.44	79.33	185.10	-31.60	24
		1163	949	3600	225.71	67.71	157.99	-18.40	25
40	3	1933	1737	3600	341.18	105.7658	235.41	-10.13	26
		1967	1805	3600	327.75	95.0475	232.70	-8.23	27
		1849	1597	3600	339.51	112.0383	227.47	-13.62	28
		2013	1897	3600	349.47	104.841	244.62	-5.76	29
		1784	1617	3600	350.47	98.1316	252.33	-9.36	30
	5	1352	1149	3600	328.15	91.882	236.26	-15.01	31
		1374	1169	3600	310.59	96.2829	214.30	-14.91	32
		1289	1091	3600	325.94	107.5602	218.37	-15.36	33
		1417	1209	3600	330.07	95.7203	234.34	-14.67	34
		1286	1180	3600	343.95	103.185	240.76	-8.24	35
50	3	3094	2507	3600	851.85	255.55	596.29	-18.97	36
		3271	2376	3600	902.56	270.76	631.79	-27.36	37
		3158	2451	3600	812.93	243.87	569.05	-22.38	38
		2974	2329	3600	784.40	235.32	549.08	-21.68	39
		3052	2385	3600	806.95	242.08	564.86	-21.85	40
	5	2842	1749	3600	752.17	225.65	526.51	-38.45	41
		2937	1672	3600	811.49	243.44	568.04	-43.07	42

2566	1659	3600	715.62	214.68	500.93	-35.34	43
2732	1532	3600	771.91	231.57	540.33	-43.92	44
2691	1471	3600	735.41	220.62	514.78	-45.33	45



Şekil 4. 1 LBBD yöntemi ile çözülen tüm MSve MP modellerinin toplam CPU zamanları.



Şekil 4.2 Aynı parça sayıları ile 3 ve 5 makineli hücrelerin bitiş zamanı karşılaştırmaları;
 {20 parça: 6&11, ...,10&15}, {30 parça: 16&21, ...,20&25}, {40 parça: 26&31, ...,30&35},
 {50 parça: 36&41, ...,40&45}

SONUÇ

Bu çalışma, tek bir nakliye robotu ile Paralel Makineli Robotik Hücre Çizelgeleme problemini ele almaktadır. Başlangıçta, makina atamaları sorununu aynı anda gidermek ve makinedeki işleme parçaları ve robot hareketleri için en iyi sıralamayı belirleyen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (MILP) geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni MILP modeli, nakliye kısıtlamalarını dikkate alarak, paralel makineli robotik hücre çizelgeleme problemini en aza indirmektedir. Dikkate alınan problem NP-zor olduğundan, geliştirilen modeli sezgisel olarak çözmek için bir Bender Ayrıştırma algoritması önerilmiştir. Dikkate alınan problem, özelliklerinden dolayı Mantık Tabanlı Bender Ayrıştırması (*Logic Based Bender's Decomposition*, LBBD) uygulanmaya elverişli olmaktadır.

Önerilen MILP modeli, robot hareket sıralaması içeren alt problemlerin paralel makine çizelgelemesini ve makine atama alt problemlerini içermektedir. Bu yapı kullanılarak ve makine atamasının bu problemin kilit parçası olduğunu düşünülerek, atama alt problemini ana problem gibi çözümlen, parça ve robot hareket sıralaması alt problemlerini mantık tabanlı Benders üretmek için kesen bir Benders ayrıştırması algoritması geliştirilmiştir. Robotik hücre çizelgeleme problemleri ile ilgili mevcut literatür, bu problemlerin tam olarak çözümü ile ilgili eksikliği açıkça göstermektedir; çünkü mevcut matematiksel programlama modelleri yalnızca küçük boyutlu örnekleri çözümlenebilmektedir.

Önerilen MILP modeli ve LBBD yöntemi, 5 kategori ve 45 rastgele oluşturulmuş problem örneği üzerinde test edilmiştir. Bu çalışma, paralel makineli robotik hücre çizelgeleme probleminde ayrıştırma yöntemlerini kullanmanın avantajlarını ve LBBD yönteminin oldukça başarılı olduğu göstermektedir.

Bu çalışmada tanımlanan Benders ayrıştırma algoritması, robotik hücre çizelgeleme problemi ile ilgili araştırmalarda Benders kesme optimalliğini kullanan ilk çalışma olacak, bu sınırların ötesine geçerek orta ve büyük boyutlu problem örneklerine tam çözüm sağlayacaktır.

Ayrıca, elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın hesaplama süreleri bakımından oldukça üstün performans gösterdiğini doğrular niteliktedir. Gelecekte yapılacak olan araştırmalarda, çift tutuculu robotların da göz önüne alınmasıyla çalışmada incelenen problem genişletilebilecektir.

Ayrıca, önerilen Benders ayrıştırma yaklaşımı, diğer robotik hücre çizelgeleme problemleri için genişletilebilmektedir.

KAYNAKÇA

- Agnetis, A. (2000). Scheduling no-wait robotic cells with two and three machines. *European Journal of Operational Research*, 123(2), 303-314. doi:Doi 10.1016/S0377-2217(99)00258-1
- Agnetis, A., & Pacciarelli, D. (2001). Number Sequencing in Three Machine No-Wait Robotic Cells. *Operations Research Letters*, 27(4), 185–192.
- Aneja, Y. P., & Kamoun, H. (1999). Scheduling of parts and robot activities in a two machine robotic cell. *Computers & Operations Research*, 26(4), 297-312. doi:Doi 10.1016/S0305-0548(98)00063-X
- Bajestani, M. A., & Beck, J. C. (2013). Scheduling a Dynamic Aircraft Repair Shop with Limited Repair Resources. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 47, 35-70.
- Batur, G. D., Karasan, O. E., & Akturk, M. S. (2012). Multiple part-type scheduling in flexible robotic cells. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 726-740. doi:10.1016/j.ijpe.2011.10.006
- Benders, J. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4(1), 238-252.
- Benini, L., Bertozzi, D., Guerri, A., & Milano, M. (2005). Allocation and scheduling for MPSoCs via decomposition and no-good generation. *Principles and Practice of Constraint Programming - Cp 2005, Proceedings*, 3709, 107-121.
- Bilge, U., & Ulusoy, G. (1995). A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS. *Operations Research*, 43(6), 1058-1070. doi:DOI 10.1287/opre.43.6.1058
- Cai, X. M., McKinney, D. C., Lasdon, L. S., & Watkins, D. W. (2001). Solving large nonconvex water resources management models using generalized benders decomposition. *Operations Research*, 49(2), 235-245. doi:DOI 10.1287/opre.49.2.235.13537
- Cambazard, H., Hladik, P. E., Deplanche, A. M., Jussien, N., & Trinquet, Y. (2004). Decomposition and learning for a hard real time task allocation problem. *Principles and Practice of Constraint Programming - Cp 2004, Proceedings*, 3258, 153-167.

- Canto, S. (2008). Application of Benders' decomposition to power plant preventive maintenance scheduling. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 759-777. doi:10.1016/j.ejor.2006.11.018
- Carlier, J., Haouari, M., Kharbeche, M., & Moukrim, A. (2010). An optimization-based heuristic for the robotic cell problem. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 636-645. doi:10.1016/j.ejor.2009.06.035
- Chen, H. X., Chu, C. B., & Proth, J. M. (1997). Sequencing of parts in robotic cells. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 9(1), 81-103. doi:10.1023/A:1007930010707
- Chu, Y. Y., & Xia, Q. S. (2004). Generating benders cuts for a general class of integer programming problems. *Integration of Ai and or Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 3011, 127-141.
- Chu, Y. Y., & Xia, Q. S. (2005). A hybrid algorithm for a class of resource constrained scheduling problems. *Integration of Ai and or Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 3524, 110-124.
- Cordeau, J. F., Pasin, F., & Solomon, M. M. (2006). An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144(1), 59-82. doi:10.1007/s10479-006-0001-3
- Correa, A. I., Langevin, A., & Rousseau, L. M. (2004). Dispatching and conflict-free routing of automated guided vehicles: A hybrid approach combining constraint programming and mixed integer programming. *Integration of Ai and or Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 3011, 370-379.
- Costa, A. M. (2005). A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems. *Computers & Operations Research*, 32(6), 1429-1450. doi:10.1016/j.cor.2003.11.012
- Costa, A. M., Cordeau, J. F., & Gendron, B. (2009). Benders, metric and cutset inequalities for multicommodity capacitated network design. *Computational Optimization and Applications*, 42(3), 371-392. doi:10.1007/s10589-007-9122-0
- Costa, A. M., Cordeau, J. F., Gendron, B., & Laporte, G. (2012). Accelerating Benders decomposition with heuristic master problem solutions. *Pesquisa Operacional*, 32(1), 3-20.

- Cote, G., & Laughton, M. A. (1984). Large-Scale Mixed Integer Programming - Benders-Type Heuristics. *European Journal of Operational Research*, 16(3), 327-333. doi:10.1016/0377-2217(84)90287-X
- Crainic, T. G., Hewitt, M., & Rei, W. (2014). Partial decomposition strategies for two-stage stochastic integer programs. *Publication CIRRELT-2014-13, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada.*
- Dawande, M., Geismar, H. N., Sethi, S. P., & Sriskandarajah, C. (2005). Sequencing and scheduling in robotic cells: Recent developments. *Journal of Scheduling*, 8(5), 387-426. doi:10.1007/s10951-005-2861-9
- Fazel-Zarandi, M. M., & Beck, J. C. (2012). Using Logic-Based Benders Decomposition to Solve the Capacity- and Distance-Constrained Plant Location Problem. *Inform Journal on Computing*, 24(3), 387-398. doi:10.1287/ijoc.1110.0458
- Fazel-Zarandi, M. M., Berman, O., & Beck, J. C. (2013). Solving a stochastic facility location/fleet management problem with logic-based Benders' decomposition. *Iie Transactions*, 45(8), 896-911. doi:10.1080/0740817x.2012.705452
- Foumani, M., & Jenab, K. (2013). Analysis of flexible robotic cells with improved pure cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(3), 201-215. doi:10.1080/0951192x.2012.684722
- Geismar, H. N., Dawande, M., & Sriskandarajah, C. (2004). Robotic cells with parallel machines: Throughput maximization in constant travel-time cells. *Journal of Scheduling*, 7(5), 375-395. doi:10.1023/B:JOSH.0000036861.28456.5d
- Geismar, H. N., Dawande, M., & Sriskandarajah, C. (2006). Throughput optimization in constant travel-time dual gripper robotic cells with parallel machines. *Production and Operations Management*, 15(2), 311-328.
- Geismar, H. N., Pinedo, M., & Sriskandarajah, C. (2008). Robotic cells with parallel machines and multiple dual gripper robots: a comparative overview. *Iie Transactions*, 40(12), 1211-1227. doi:10.1080/07408170801965108
- Geoffrion, A. M. (1970a). Elements of large-scale mathematical programming: Part I: Concepts. *Management Science*, 16(11), 652-675.

- Geoffrion, A. M. (1970b). Elements of large scale mathematical programming: Part II: Synthesis of algorithms and bibliography. *Management Science*, 16(11), 676–691.
- Geoffrion, A. M. (1972). Generalized Benders Decomposition. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 10(4), 237-260.
- Geoffrion, A. M., & Graves, G. W. (1974). Multicommodity Distribution System-Design by Benders Decomposition. *Management Science Series a-Theory*, 20(5), 822-844. doi:DOI 10.1287/mnsc.20.5.822
- Hall, N. G., Kamoun, H., & Sriskandarajah, C. (1998). Scheduling in robotic cells: complexity and steady state analysis. *European Journal of Operational Research*, 109(1), 43-65. doi:Doi 10.1016/S0377-2217(96)00333-5
- Harjunkoski, I., & Grossmann, I. E. (2002). The composition techniques for multi stage scheduling problem using Mixed–Integer and constraint programming methods. *Computers and Chemical Engineering*, 26, 1533–1552.
- Hooker, J. N. (2000). *Logic-based Methods for Optimization*: Wiley.
- Planning and Scheduling by logic-based benders decomposition 1-29 (2005).
- Hooker, J. N. (2007). Planning and scheduling by logic-based benders decomposition. *Operations Research*, 55(3), 588-602. doi:10.1287/opre.1060.0371
- Hooker, J. N., & Ottosson, G. (2003). Logic-based Benders decomposition. *Mathematical Programming*, 96(1), 33-60. doi:10.1007/s10107-003-0375-9
- Hooker, J. N., & Yan, H. (1995). Verifying logic circuits by benders decomposition. *Principles and Practice of Constraint Programming*, 269-290.
- Hurink, J., & Knust, S. (2001). Makespan minimization for flow-shop problems with transportation times and a single robot. *Discrete Applied Mathematics*, 112(1-3), 199-216. doi:Doi 10.1016/S0166-218x(00)00316-4
- Hurink, J., & Knust, S. (2002). A tabu search algorithm for scheduling a single robot in a job-shop environment. *Discrete Applied Mathematics*, 119(1-2), 181-203. doi:Pii S0166-218x(01)00273-6 .Doi 10.1016/S0166-218x(01)00273-6
- Jain, V., & Grossmann, I. E. (2001). Algorithms for hybrid MILP/CP models for a class of optimization problems. *Inform Journal on Computing*, 13(4), 258-276. doi:DOI 10.1287/ijoc.13.4.258.9733

- Kharbeche, M., Carlier, J., Haouari, M., & Moukrim, A. (2011). Exact methods for the robotic cell problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 23(2), 242-261. doi:10.1007/s10696-011-9079-2
- Lim, C. (2010). Relationship among Benders, Dantzig-Wolfe, and Lagrangian optimization. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Luong, C. (2015). *An examination of benders decomposition approaches in large-scale healthcare optimization problems*. University of Toronto.
- Magnanti, T. L., Mireault, P., & Wong, R. T. (1986). Tailoring Benders Decomposition for Uncapacitated Network Design. *Mathematical Programming Study*, 26, 112-154.
- Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1981). Accelerating Benders Decomposition - Algorithmic Enhancement and Model Selection Criteria. *Operations Research*, 29(3), 464-484. doi:DOI 10.1287/opre.29.3.464
- Maravelias, C. T., & Grossmann, I. E. (2004). Using MILP and CP for the scheduling of batch chemical processes. *Integration of Ai and or Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, 3011, 1-20.
- Nawaz, M. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, 11(1), 91-95.
- Raidl, G. R. (2015). Decomposition based hybrid metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 244(1), 66-76. doi:10.1016/j.ejor.2014.12.005
- Sahinidis, N. V., & Grossmann, I. E. (1991). Convergence Properties of Generalized Benders Decomposition. *Computers & Chemical Engineering*, 15(7), 481-491. doi:Doi 10.1016/0098-1354(91)85027-R
- Sarkheil, N., & Jenab, K. (2012). On the optimality of 1-unit cycles in flow-shop networks. *International Journal of Production Research*, 50(10), 2705-2709. doi:10.1080/00207543.2011.588268
- Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., & Kubiak, W. (1992). Sequencing of Parts and Robot Moves in a Robotic Cell. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 4, 331-338.
- Shafiei-Monfared, S., Salehi-Gilani, K., & Jenab, K. (2009). Productivity analysis in a robotic cell. *International Journal of Production Research*, 47(23), 6651-6662. doi:10.1080/00207540802372298

- Soukhal, A., & Martineau, P. (2005). Resolution of a scheduling problem in a flowshop robotic cell. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 62-72. doi:10.1016/j.ejor.2003.08.028
- Soukhal, A., Oulamara, A., & Martineau, P. (2005). Complexity of flow shop scheduling problems with transportation constraints. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 32-41. doi:10.1016/j.ejor.2003.03.002
- Sriskandarajah, C., Hall, N. G., & Kamoun, H. (1998). Scheduling large robotic cells without buffers. *Annals of Operations Research*, 76, 287-321. doi:Doi 10.1023/A:1018952722784
- Terekhov, D., Beck, J. C., & Brown, K. N. (2009). A Constraint Programming Approach for Solving a Queueing Design and Control Problem. *Inform's Journal on Computing*, 21(4), 549-561. doi:10.1287/ijoc.1080.0307
- Thorsteinsson, E. S. (2001). Branch-and-Check: A Hybrid Framework Integrating Mixed Integer Programming and Constraint Logic Programming. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 2239, 16-30. doi:10.1007/3-540-45578-7_2
- Timpe, C. (2002). Solving planning and scheduling problems with combined integer and constraint programming. *Or Spectrum*, 24(4), 431-448.
- Zahrouni, W., & Kamoun, H. (2012). Sequencing and scheduling in a three-machine robotic cell. *International Journal of Production Research*, 50(10), 2823-2835. doi:10.1080/00207543.2011.596999
- Zhang, J. L., & Ponnambalam, K. (2006). Hydro energy management optimization in a deregulated electricity market. *Optimization and Engineering*, 7(1), 47-61. doi:10.1007/s11081-006-6590-5
- Zhu, Y. S., & Kuno, T. (2003). Global optimization of nonconvex MINLP by a hybrid branch-and-bound and revised general benders decomposition approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(3), 528-539. doi:10.1021/ie0200813

Ek. 1 TEZ ÇALIŞMA ORJİNALLİK RAPORU



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:20/01/2017

Tez Başlığı / Konusu: ... **PARALEL MAKİNELİ ROBOTİK HÜCRELERDE ÇİZELGELEME PROBLEMİ**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam **54** sayfalık kısmına ilişkin, **20.12.2016** tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % **5** 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç
- 3- Alıntılar hariç/dâhil
- 4- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mohammad Reza Komari Alaie

Öğrenci No: N10240310

Anabilim Dalı: İŞLETME

Programı: DOKTORA

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

PROF.DR.Mehmet Baha
Karan

EK. 2 TEZ ÇALIŞMA ETİK KRULU İZİN MUAFİYETİ FORMU



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI ETİK KURUL İZİN MUAFİYETİ FORMU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: ...20/01.... / ...2017

Tez Başlığı / Konusu: **PARALEL MAKİNELİ ROBOTİK HÜCRELERDE ÇİZELGELEME PROBLEMİ**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmam:

1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır,
2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir.
3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir.
4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir.

Hacettepe Üniversitesi Etik Kurulları ve Komisyonlarının Yönergelerini inceledim ve bunlara göre tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kuruldan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mohammad Reza Komari Alaie

Öğrenci No: N10240310

Anabilim Dalı: İŞLETME

Programı: DOKTORA

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

20/01/2017

DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI

PROF.DR.MEHMET BAHA KARAN

Detaylı Bilgi: <http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr>

Telefon: 0-312-2976860

Faks: 0-3122992147

E-posta: sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr

ÖZGEÇMİŞ



Curriculum Vitae (CV)

Personal Information:

Name	Surname	Date of Birth	Nationality	Gender		Marital Status
				Male	Female	
Mohammad Reza	Komari Alaie	23.07.1972	Iran	•		Lecturer

Telephone			Fax	Email
Home	Office	Mobile		
00984113811550		0098-9141014640 0090-5073295610		Komari.reza@hacettepe.edu.tr Komari.reza@gmail.com

Educational Background: (last one first)

Degree	Field of Specialization	Name of Institution	City	Country	Received Date	Academic Rank
PhD. Student	Quantitative Model	Hacettepe University	Ankara	Turkey	From 2010-	Lecturer
Ms.	Production and Operation	Islamic Azad University	Tabriz	Iran	2005	
Bc.	Production and Operation	Islamic Azad University	Tabriz	Iran	1999	

Master Thesis: A study Relationship Between Manufacturer Product Strategy and Supply Chain Structure

Ph. D. Dissertation: Parallel Machine Robotic Cell Scheduling Problem

Administrative Positions:

Job Title	Place of Work	Date		Name of Institution
		From	To	
Production Management	Textile Factory	2005	2006	Mazlumiyan –Nevar Bafiy
University Lecturer	Tabriz-Bonab-Sarab-Memeqan-Hadishehr Cities	2005	2011	Islamic Azad University
Financial Management	Ahrar Office	2000	2002	Ahrar Office

Master and Doctorate Theses Supervision:

No	Students Full Name	MS / Ph. D.	Title	Date
1	Layla Sedigi	MS	A Hybrid Model of ANP and TOPSIS Multiple Attribute Decision Making for Packaging Products in the effect of improving purchasing behavior of consumers	10.01.2017
2	Ali Aliyari	MS	A Hybrid Model of ANP and TOPSIS Multiple Attribute Decision Making for Ranking Suppliers in Sustainable Supply Chain Management	10.01.2017

Publications: (papers)

Title of the Article	Journal	Date
The Presentation of Points of Strength and Weakness and Performance of Self – Assessment of Power Elements Engineering co.at Azerbaijan Based on EFQM Excellence Model	Management and Development	2008 Vol.10 No.38
A study Relationship Between Manufacturer Product Strategy and Supply Chain Structure	Management and Development	2010 Vol .11 No.43

Relationship between Manufacturer Product Strategies and Supply Chain Inventory in a Company	Life Secince Jurnal	2012. Vol.9 No.4
Effective factors in the existence of waste time and its effects on poroduct system	Advance in Environmental Biology	2012 Vol6 No.4

Publications (Conference Full Papers)

Title of the Article	Title and Place	Date
The Impact of Non-Stationary Demand on Supply Chain Inventory	International Conference on New Directions in Business, Management, Finance and Economics Famagusta, Northern Cyprus.	September 12-14, 2013
Effective Factors in the Existence of Waste Time and its Effects on the Production system	China-USA Business Review	May 2011

Membership to Scientific Associations:

Name of /Association Institution	Country	Date
Management Studies Journal	USA-(ISSN2328-2185)	2013

Research Interests:

Non-Stationary Demand in Industrial Management and Engineering
Supply Chain in Inventory Control, Manufacturer Product Strategy
Inventory Control
Operation Research

