

ÇİFT TUTUCULU ROBOTİK HÜCRELERDE ÜRETİM HIZININ
EN BÜYÜKLENMESİ: SADE ÇEVİRİMLER

ÖZDEN ONUR DALGIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU
Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. TAHİR HANALİOĞLU
Anabilim Dalı Başkanı

ÖZDEN ONUR DALGIÇ tarafından hazırlanan ÇİFT TUTUCULU ROBOTİK HÜCRELERDE ÜRETİM HIZININ EN BÜYÜKLENMESİ: SADE ÇEVİRİMLER adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. M. Selim AKTÜRK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özden Onur DALGIÇ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2013

Özden Onur DALGIÇ

ÇİFT TUTUCULU ROBOTİK HÜCRELERDE ÜRETİM HIZININ EN BÜYÜKLENMESİ: SADE ÇEVİRİMLER

ÖZET

Bu çalışmada, sade çevrimlerin kullanıldığı m adet makine ve çift tutuculu robotun bulunduğu bir robotlu üretim hücresi ele alınmıştır. Makinelerin yüklenme/boşaltması ve malzeme taşıma işlemleri robot tarafından gerçekleştirilmektedir. Çift tutuculu robotlar aynı anda iki parça taşımaya olanak sağlamaktadır. Özdeş parçaların işlem gördüğü sistemde makinelerin bir parçaya uygulanması gereken bütün işlemleri yapabilecek kabiliyette oldukları varsayılmıştır. CNC makineleri gibi esnek makinelerin bulunduğu sistemlerde bu tip durumlar ortaya çıkmaktadır. Çalışmada ele alınan sade çevrimler her parçanın sadece bir makinede işlem gördüğü ve her makinenin bir çevrimde bir defa işlem yaptığı çevrimleri ifade etmektedir. Öncelikle sade çevrimlerin olurluluk koşulları belirlenerek, bu olurluluk koşulları üzerinden çalışan ve makine sayısı verildiğinde tüm olurlu sade çevrimleri oluşturan bir algoritma geliştirilmiştir. İki makineli robotlu hücreler ayrıntılı olarak incelenmiş ve çok sayıda olurlu sade çevrim arasından eniyi çözümün belirli beş tanesinden biri tarafından verildiği ispatlanmıştır. Problem parametrelerine bağlı olarak bu beş çevrimden her birisinin eniyi oldukları parametre değerleri belirlenmiştir. İki makineli robotik hücrede, iki tutuculu robotların kullanımının tek tutuculu robotlara göre her zaman daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Problem parametreleri kullanılarak bir deneysel çalışma yapılmış çift tutuculu robotların tek tutuculu robotlara oranla sağladığı ortalama ve en büyük fayda değerleri belirlenmiş, parametrelerin elde edilen sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robotik hücreler, çift tutuculu robotlar, sade çevrimler.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Industrial Engineering
Supervisor : Asst. Prof. Hakan GÜLTEKİN
Degree Awarded and Date : M.Sc. – September 2013

Özden Onur DALGIÇ

PURE CYCLES IN DUAL GRIPPER ROBOTIC CELLS

ABSTRACT

In this study, we discuss pure cycles in m -machine dual gripper robotic cells. A material handling robot loads/unloads the machines and transports the parts between the machines. The robot is assumed to have dual grippers so that it can carry two parts simultaneously. Identical parts are to processed on machines which have the ability to perform all the operations that a part requires. Manufacturing systems in which there are flexible machines like CNC machines have this kind of ability. We consider pure cycles where each part is processed by only one of the machines and each machine processes exactly one part in a cycle. We first determine the feasibility conditions for the pure cycles and an algorithm that generates all feasible pure cycles for a given number of machines. We analyse 2-machine robotic cells in detail and prove that one of the particular five pure cycles among a huge number of feasible pure cycles always provides the optimal solution. We determine the parameter values in which each of the five cycles is optimal. In 2-machine robotic cells, we show that pure cycles in dual gripper robotic cells always dominate pure cycles in single gripper robotic cells. By using problem parameters, an experimental study is performed and the average and maximum benefits of using a dual gripper robot instead of a single gripper robot are determined. The effects of problem parameters are also examined.

Keywords: Robotic cells, dual gripper robots, pure cycles.

TEŐEKKÜR

Bu çalıőmamı tamamlamamda büyük emeği olan tez danıőmanım Yrd. Doç. Dr. HAKAN GÜLTEKİN, tezim boyunca bana yol gösteren Prof. Dr. M. SELİM AKTÜRK'e, tezimi okuyarak tavsiyelerde bulunan Yrd. Doç. Dr. AYŞEGÜL ALTIN KAYHAN'a, desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaőlarım ve niőanlıma teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Robotlu Üretim Hücrelerinde Çizelgeleme	5
2.1.1 Çift tutuculu robotlu hücreler	7
2.2 Üretimde Esneklik ve Esnek Robotlu Hücreler	9
2.2.1 Sade çevrimler	12
2.3 Özet	13
3 PROBLEM TANIMI	14
3.1 Sade Çevrimlerin Tanımlanması	16
4 2 MAKİNE DURUMUNDA ENİYİ SADE ÇEVİRİMLER	25
4.1 2 makine durumu için sade çevrimlerin sınıflandırılması	28
5 ÇİFT TUTUCULU ROBOTLARIN FAYDA ANALİZİ	41
6 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	48

KAYNAKLAR	51
EKLER	54
EK 1.k=1 durumu için çevrim zamanı karşılaştırmaları	55
EK 2.Tek tutucu ve çift tutucu kıyaslaması için limit değerleri	56
EK 3.Tek tutuculu ve iki makineli sistemlerde sade çevrimler	60
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

1.1	m makineli bir robotlu hücrenin yerleşimi	2
3.1	2 makine durumu için bir sade çevrimin durumlar ile ifade edilmesi. . .	18
4.1	$\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ durumunda eniyi çevrimler.	40
4.2	$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ durumunda eniyi çevrimler.	40

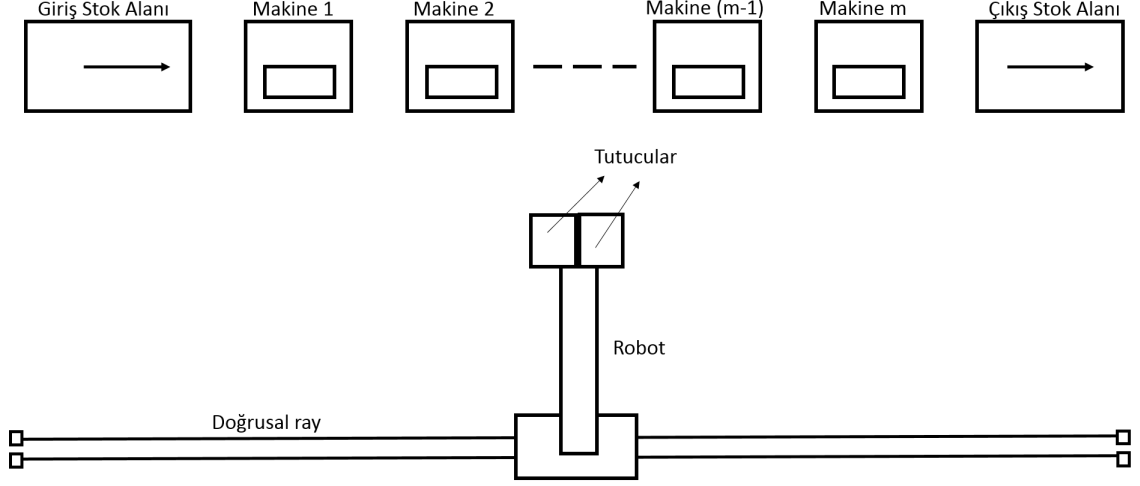
TABLolarIN LİSTESİ

3.1	Çalışmada kullanılan notasyon	15
3.2	Aktiviteler arası mesafeler	23
4.1	İki makine durumu için eniyi sade çevrimler	27
4.2	Ardışık giriş ve çıkış stoku aktiviteleri bulunan sade çevrimlerin aktivite dizileri	32
5.1	Çift tutuculu ve tek tutuculu sistemlerin çevrim zamanı karşılaştırması	43
5.2	Etmenler ve etmen seviyeleri	43
5.3	Tek tutuculu sistemlerin alt sınır değeri ile çift tutuculu sistemlerin eniyi çevrim zamanı için deneysel çalışma	46
5.4	$\frac{P}{\delta}$ için seviye ortalamaları	47
5.5	$\frac{\theta}{\delta}$ için seviye ortalamaları	47
5.6	$\frac{\theta}{\varepsilon}$ için seviye ortalamaları	47
E.1	Tek tutuculu ve 2 makineli sistemlerdeki sade çevrimler ve çevrim zamanları	60

1. GİRİŞ

Robotlu hücreler, içlerinde makinelerin ve makinelere parça yükleme, boşaltma ve makineler arası parça taşıma işlemlerini yapan bir robotun bulunduğu üretim merkezleridir. Ayrıca parça akışını, girişini ve çıkışını sağlayan giriş ve çıkış stokları bulunmaktadır. m adet makinenin bulunduğu bir robotlu hücre Şekil 1.1'de görülebilir. Robotlu hücreler elektronik ve metal kesme gibi bir çok endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Teknolojideki son ilerlemeler ile birlikte, bu üretim hücrelerinde kullanılan makineler kabiliyetleri bakımından son derece gelişmiştir. Özellikle CNC makinelerin kullanıldığı robotlu hücreler üretim sistemleri için büyük bir esneklik sağlamaktadırlar. CNC makineleri, magazinlerinde bulunan çeşitli uçlar sayesinde birçok işlemi basit uç değiştirme hareketleri ile aynı makine üzerinde yapabilme imkanı sağlarlar. Robotun kabiliyeti ise robotlu hücrelerde ortaya çıkan başka bir ölçüttür. Özellikle robotun sahip olduğu tutucu sayısı, robot kabiliyetinde önemli bir etkiye sahiptir. Tutucular, robotun işlenecek parçaları tutmak için kullandığı bileşenleridir.

Bu çalışmada, doğrusal bir yerleşime sahip olan m adet özdeş makinenin (giriş ve çıkış stokları hariç) bulunduğu bir sistem ele alınmıştır. Makineler arasında ara stok alanı bulunmamaktadır. İşlenecek parçalar özdeştir ve makineler üzerinde yapılması gereken bir takım işlemler bulunmaktadır. Tüm makineler bir parçanın ihtiyaç duyduğu tüm işlemleri yapabilecek esnekliğe sahiptir. Aynı zamanda makineleri yükleyen, boşaltan ve parçaların makineler arasında taşınmasını sağlayan iki tutuculu bir robot bulunmaktadır. Robotun iki tutuculu olması, iki tutucunun da yükleme, boşaltma ve parça taşıma işlemlerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Robot, yükleme boşaltma işlemlerinde etkin olarak (aynı anda) sadece bir tutucusunu kullanabilir. Bir tutucu etkinken diğerini etkin hale getirebilmek için belirli bir zaman harcaması gerekmektedir. Robotun makineler



Şekil 1.1: m makineli bir robotlu hücrenin yerleşimi

arasında hareket ederken veya makine önünde dururken tutucu değişimini (bir tutucuyu etkin hale getirme) yapabildiği varsayılmıştır.

Ayrıca makinelerin bir parçanın ihtiyaç duyduğu bütün işlemleri yapabilecek esnekliğe sahip olması, sade çevrim adı verilen robot hareket çevrimlerinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır [24]. Geleneksel robotlu hücrelerde, akış tipi üretim sistemleri ve bunlara karşılık gelen robot hareket çevrimleri kullanılmaktadır. Akış tipi sistemlerde, tüm parçalar belirli bir sırayı takip ederek robotlu hücrede bulunan tüm makineleri ziyaret ederler. Bahsi geçen sade çevrimlerde ise giriş stokundan alınan parçalar sadece bir makineye yüklenir ve gerekli olan tüm işlemler yüklendikleri makine üzerinde tamamlandıktan sonra (bir makinenin tüm gerekli işlemleri yapabileceği esnekliğe sahip olduğu varsayımı altında) çıkış stokuna bırakılarak robotlu hücreden çıkışları sağlanır. Aynı zamanda tüm makinelerin tek bir çevrim içerisinde tam olarak bir defa yüklenmesi ve boşaltılması gerekmektedir. Tüm makinelerin yüklenmesi ve boşaltılması sebebiyle bir çevrimde toplamda makine sayısı (m) kadar parça üretilir. Bu çalışmada sade çevrimlerin ele alınmasının sebebi bu çevrimlerin geleneksel akış

tipi robotlu hücrelerde bulunan robot hareket çevrimlerinden daha iyi sonuç vermesidir [23]. Ayrıca literatürde sade çevrimlerin ve çift tutuculu robotların kullanımının bir arada incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada amaç, en küçük çevrim zamanını veren sade çevrimi bulabilmektir.

Yapılan çalışma kapsamında öncelikle iki tutuculu robotlu hücrelerde sade çevrim kullanımının çerçevesi oluşturulmuştur. Ayrıca, sade çevrimlerin ve çevrim zamanlarının hesaplama yöntemleri sunulmuştur. Problemim özel bir durumu incelenerek bu özel durum için eniyi sade çevrimi veren prosedür geliştirilmiştir. Ek olarak, bu özel durumun tek tutuculu sistemlerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Tez çalışması 6 bölüm halinde incelenecektir. Bir sonraki bölümde akış tipi üretim sistemlerinde çizelgeleme, üretimde esneklik, iki tutuculu robotlar ve problemle ilgili yapılmış çalışmaların derlendiği literatür taraması yer almaktadır. 3'üncü bölümde detaylı problem tanımı anlatılmaktadır. 4'üncü bölümde iki makineli sistemlerin detaylı incelemesi yapılmaktadır. 5'inci bölümde problemin tek tutuculu sistemlerle karşılaştırılması ve faktör analizi yapılmaktadır. Son bölüm çalışmayla ilgili genel sonuçlar ve yorumların yanında gelecekte yapılabilecek çalışmalar için ayrılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çizelgeleme konusunda yapılan ilk çalışmalar 50'li yıllarda başlamış ve günümüze kadar bu alanda birçok çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışmalar başlangıçta çok temel çizelgeleme problemlerini kapsasa da ilerleyen yıllarda gerçek hayat problemlerine yoğunlaşmıştır. Başlangıçtaki basit ve küçük sayıdaki makineli sistemlerden çok makineli ve karmaşık yapılı üretim sistemlerine kadar bir çok konuda çalışmalar yapılmıştır.

Üretim sistemlerinde kullanılan teknolojinin de gelişmesiyle birlikte farklı üretim sistemi modelleri çalışılmıştır. Akış tipi, atölye tipi, paralel makine çizelgeleme gibi geleneksel üretim sistemi modelleri esneklik kavramıyla bütünleştirilerek çizelgeleme literatürü altında incelenmeye başlanmıştır. Ayrıca malzeme elleçleme sistemlerindeki gelişmeler robotlu üretim sistemlerini çizelgeleme alanının araştırma konularından biri haline getirmiştir.

Bu çalışma kapsamında ele aldığımız sade çevrimlerin bulunduğu çift tutuculu robotlu üretim hücresi probleminin literatür araştırması bu alanda yapılan çalışmalara göre iki başlık altında toplanmıştır. İlk başlıkta robotlu üretim hücreleri üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiş ve farklı sayıda tutuculara sahip robotların bulunduğu sistemler üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. İkinci başlıkta ise üretimde esneklik ve esnek makineleri içeren çalışmalar ele alınmış ve esnek makinelerin bulunduğu robotlu üretim hücrelerinin dikkate alındığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.1 Robotlu Üretim Hücrelerinde Çizelgeleme

Son yıllarda, üretim teknolojisinin özdevinimi ile birlikte üretim sistemlerinde kullanılan donatımlar önemli ölçüde etkilenmiştir. Özellikle malzeme elleçleme işlemlerinde kullanılan robotlar üretim sistemleri için hız, kalite, güvenlik ve ekonomi gibi bir çok konuda kolaylık sağlamaktadır. Bu sistemlerin kullanımının iyileştirilmesi ve verimlerinin artırılması da doğal olarak çizelgeleme literatüründe araştırma konuları haline gelmiştir.

Robotlu hücre çizelgeleme problemlerinde genel olarak aynı tip parçaların üretildiği (özdeş parçalı üretimi) sistemler ve farklı tip parçaların üretildiği (çoklu parça üretimi) sistemler ele alınmıştır. Çalışmaların genel olarak amacı özdeş parça üretimi için uzun dönem ortalamasında 1 parçayı üretebilmek için gerekli en düşük çevrim zamanını veren robot hareket çevrimini elde edebilmek ve çoklu parça üretimi için *en küçük parça kümesi* için en düşük zamanı veren parça sıralaması ve robot hareket çevrimini bulabilmektir. Burada en düşük parça kümesinden kasıt tüm üretim partisini oransal olarak ifade eden en küçük parça adetleridir. Crama vd. [1] ve Dawande vd. [2] bu konuda detaylı literatür taramaları yapmışlardır.

Robotlu üretim hücresi çizelgeleme problemlerinde genel olarak parça üretimi sonsuz sayıdadır. Yani üretilecek toplam parça sayısı belirli değildir. Bu yüzden problemler sonucunda bu sonsuz üretimi ifade edebilecek çözümler aranmaktadır. Dawande vd. [3] robotlu üretim hücresi çizelgeleme problemlerinde sadece çevrimsel robot hareketlerinin incelenmesi gerektiğini göstermiştir. Çevrimsel robot hareketleri, robotun belirli bir hareket kümesini aynı sırayla ve sürekli tekrar etmesidir. Bu hareket kümesinin bir tekrarına bir robot hareket çevrimi adı verilir. Bu sebeple literatürde bulunan çalışmalarda genelde eniyi robot hareket çevrimlerinin bulunması hedeflenmektedir.

Robotlu üretim hücre çizelgeleme sistemleri literatüründeki ilk çalışmalardan biri Sethi vd. [4] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada 2 ve 3 makineli, akış tipi, robotlu üretim hücrelerinde özdeş ve çoklu parça üretimi ele alınmıştır. Ayrıca tek tutucuya sahip robot, dairesel biçimde yerleşmiş makinelerin merkezinde

bulunmaktadır. Bu şekilde yerleşimi olan robotlu hücelere, robot merkezli hüceler adı verilir. Makineler arasında da bir ara stok bölgesi bulunmamaktadır. Çalışmada 1-birim çevrimleri ele alınmış ve m makinenin bulunduğu bir robotlu hücrede $m!$ tane 1-birim çevriminin olduğu gösterilmiştir. n -birim çevrimi, robotun hareketlerinin bir çevrimi sonucunda n adet parça üretildiği çevrimlerdir. Çalışmada ilgili problem için 2 ve 3 makineli sistemlerde eniyi 1-birim çevrimini veren parametrelere bağlı bir karar ağacı geliştirmişlerdir. Aynı zamanda 2 makineli robotlu hücelerde optimal çözümün 1-birim çevrimler tarafında verildiği bu çalışmada ispatlanmıştır. Daha sonra Hall vd. [5] tarafından 1-birim çevrimlerinin 3 makineli robotlu hücelerde de eniyi olduğu gösterilmiştir. 2 makine ve çoklu parça üretimi içinde parça sıralamasını ve robot hareketlerini veren polinom zamanlı bir algoritma geliştirilmiştir.

Crama ve Van de Klundert [6] tarafından yapılan başka bir çalışmada ise m adet makinenin bulunduğu robotlu hücelerde eniyi 1-birim çevrimini bulan bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma dinamik programlama tabanında çalışarak $O(m^3)$ zamanda eniyi 1-birim çevrimini bulabilmektedir. 1-birim çevrimlerinin makine sayısının 3'ten fazla olduğu ($m \geq 4$) durumlarda da her zaman eniyi çevrim olmadığı ise Brauner ve Finke [7] tarafından ispatlanmıştır. Bu çalışmada makine sayısının $m \geq 4$ olduğu durumlarda 2-birim çevrimlerinin daha tüm 1-birim çevrimlerinden daha düşük zaman verdiği çeşitli örnekler ile gösterilmiştir. m makinenin bulunduğu bir robotlu hücrede eniyi çevrimi kaç birimlik döngülerin verdiği problemi hala açıktır.

Geismar vd. [8] robotlu üretim hüclerinde paralel makine kullanımı üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada tek tutuculu bir robotlu üretim hüccesinde parçaların ihtiyaç duyduğu bazı işlemlerin birden fazla makinede yapılabilmesi söz konusudur. Çalışma kapsamında *LCM (Least Common Multiple)* adında yeni bir robot hareket çevrimi tanımlanmıştır. Bu hareket çevriminin baskın bir çevrim olduğu ve uygulamada geçerli makine işlem zamanlarının komşu iki makine arasında robot yolculuk zamanından yüksek olması varsayımı altında eniyi çevrim olduğu gösterilmiştir. Ayrıca gerekli olan paralel makine sayısını hesaplayan bir formül geliştirmişlerdir.

Steiner ve Xue [9] *tekrar işlemeli* robotlu hücelerde çoklu parça üretimi üzerinde

çalışmışlardır. Bu çalışmada geleneksel akış tipi sistemlerde parçaların makineleri en fazla birer defa ziyaret etme koşuluna karşıt olarak parçaların birkaç kez makineleri ziyaret edebileceği sistemler incelenmiştir. Yapılan çalışmada 2-makineli durumun Gezgin satıcı probleminin (GSP) özel bir formu olarak modellenip polinom zamanda çözülebileceği gösterilmiştir. Ayrıca makine sayısının 3 olduğu durumda *döngüsel tekrar işleme* adında yeni bir çevrim sınıfı tanımlanarak bu sınıfta en iyisinin bulunması probleminin *NP-Zor* olduğu ispatlanmıştır.

2.1.1 Çift tutuculu robotlu hücreler

Robotlu üretim hücrelerinde son yıllarda ortaya çıkan bir diğer problem ise robot özelliklerinin dikkate alınmasıdır. Burada robot özelliklerinden kasıt genel olarak robotun tutucu kabiliyetidir. Sethi vd. [10] çift tutuculu robotlu hücrelerde 1-birim çevrimleri üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada 2 makineli robotlu hücreler ayrıntılı olarak ele alınmış ve toplam 52 adet 1-birim çevrimi arasından 13 adet başatlanmayan çevrim olduğu gösterilmiştir. Ayrıca m adet makinenin bulunduğu sistemlerde çift tutuculu robot kullanımının üretim hızında en fazla %100 artış sağlayabileceği gösterilmiştir.

Drobouchevitch vd. [11] ise yine çift tutuculu robotların bulunduğu hücrelerde 1-birim çevrimleri incelemiştir. Bu çalışma kapsamında özdeş parçaların üretildiği robotlu hücrelerde bile makine sayısındaki artışın, olası 1-birim çevrimlerinin sayısında tek tutuculu sistemler ile karşılaştırıldığında üssel bir büyümeye sebep olduğu gösterilmiştir. Bu artış, çift tutucu problemini tek tutucu problemine göre çok daha karmaşık hale getirmektedir. Örnek olarak $m = 10$ olduğu durumda çift tutuculu bir sistemde $6,4 \cdot 10^{11}$ adet 1-birim çevrimi bulunurken tek tutuculu sistemlerde $10! = 3,6 \cdot 10^6$ adet 1-birim çevrimi bulunmaktadır. Bunun yanında problemin tutucu değiştirme zamanlarının çok küçük olduğu özel durum için en iyi 1-birim çevrimi elde edebilmek için polinom zamanlı bir algoritma geliştirilmiştir.

Drobouchevitch vd. [12] çift tutuculu robotlu hücrelerde çoklu parçaların işlem gördüğü problemi ele almışlardır. Bu çalışmada belirli 1-birim robot hareket dizilerinin altında eniyi parça sıralamasını bulunmasına odaklanılmıştır. En kötü

durumda $3/2$ yaklaşık performans sağlayan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın performansı hesaplanırken bir alt sınır hesaplaması yapılmadan ve robotlu hücre çizelgelemesi problemlerinde daha önce kullanılmayan LP yaklaşımını kullanılmıştır. Sriskandaraiah vd. [13] aynı problemi iki makine durumunda *CRM (Concatenated Robot Move)* çevrimleri şeklinde adlandırılan yeni bir çevrim sınıfı altında incelemiştir. Bu çevrimler en küçük parça kümesindeki özdeş parçaların 1-birim çevrimlerinin arka arkaya sıralanmasıyla elde edilir. Bu çevrimlerin uygulamada kolay ifade edilebilir olduğu belirtilmiş ve iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. İki makine durumu için 52 adet başatlanmayan CRM çevrimi olduğu gösterilmiştir. Uygulamada geçerli olan küçük tutucu değiştirme zamanları varsayımı ile birlikte CRM çevrimlerinin yapılan deneyler çerçevesinde ortalamada alt sınırdan %10 uzak olduğu gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar tek tutuculu sistemler ile karşılaştırılarak %18 ile %36 arasında iyileşme olduğu gösterilmiştir.

Geismar vd. [14] paralel makinelerin bulunduğu çift tutuculu robotlu hücreler üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında uygulamada sıklıkla karşılaşılan bazı varsayımlar altında hem basit robotlu hücreler için hem de paralel makinelerin bulunduğu robotlu hücreler için eniyi çevrimler belirlenmiştir. Ayrıca bu çevrimlerin tek tutuculu robotlu hücrelerdeki olası eniyi çevrimden daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Diğer bir çalışmada Faumani ve Jenab [15] tekrar işlemeli robotlu hücreleri dikkate almışlardır. Bu çalışmada iki makinenin bulunduğu sistemde robotun tek tutucusunun olmasına rağmen dolu olan bir makineyi boşalttıktan sonra çıkış stoku alanına gitmeden üzerinde bulunan işlenmemiş parça ile değiştirebileceği varsayılmıştır. Bu özelliğe *değiştirme (swap)* adı verilir ve yapı olarak çift tutuculu robotların bulunduğu sistemlere benzerlik göstermektedir. Çalışma kapsamında tüm 1-birim çevrimleri bulunmuş ve tekrar işleme tanımına göre en fazla 2 veya 3 çevrimin eniyi olduğu gösterilmiştir.

2.2 Üretimde Esneklik ve Esnek Robotlu Hücreler

Günümüze kadar üretimde esneklik konusunda bir çok çalışma yapılmış ve esneklik ile ilgili bir çok tanım yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle yeni esneklik tanımlamaları ve mevcut sistemlerde bulunan ya da bulunabilecek esneklik tanımlarının belirtilmesi üzerinedir. Bazı çalışmalarda ise esneklik kullanımının maliyeti ve getirisi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar esnekliğin karmaşık ve farklı açılardan incelenebilen bir kavram olduğunu göstermektedir ([16], [17], [18]).

Literatürde şimdiye kadar çok fazla esneklik tanımı yapılmış olmasını rağmen Sethi ve Sethi [16] yaptıkları çalışmada 11 ayrı esneklik tanımı sunmuşlardır. Belirtilen esneklik türleri kısaca aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

- **Makine Esnekliği:** Bir makinenin değişik tipteki operasyonları kolaylıkla yapabilecek kabiliyette olmasıdır.
- **Malzeme Elleçleme Esnekliği:** Farklı parça tiplerini uygun konumlara yerleştirme ve üretim tesisi boyunca işleme için etkin bir biçimde taşıma yeteneğidir.
- **Operasyon Esnekliği:** Bir parçanın farklı şekillerde üretilmesidir.
- **Süreç Esnekliği:** Bir üretim sisteminin temel kurulumları yapılmadan üreteceği parça çeşitleri kümesi ile ilişkilidir.
- **Ürün Esnekliği:** Mevcut parçalar için yerine koyma veya ekleme kolaylığıdır. Üretilen farklı bir parçadan diğerine geçişin ucuz ve hızlı olmasını sağlayan ürün esnekliğidir.
- **Rota Esnekliği:** Sistem boyunca farklı rotalar ile parça üretebilme yeteneğidir. Alternatif rotalar farklı makineler, farklı operasyonlar ya da farklı operasyonların sıralamaları kullanarak yapılabilir.
- **Hacim Esnekliği:** Farklı çıktı seviyelerinde kârlı çalışma yeteneğidir.
- **Büyüme Esnekliği:** Gerektiğinde kapasite artırılabilme kolaylığıdır.

- **Program Esnekliği:** Süreç ve rotalama esnekliklerine bağlı olup hazırlık zamanlarını azaltarak toplam üretim zamanının azaltılması, denetim ve ölçümünün geliştirilmesi ile ilgilidir.
- **Üretim Esnekliği:** Temel sermaye ekipmanları eklenmeksizin üretim sisteminin ürettiği parça çeşitleridir.
- **Market Esnekliği:** Üretim sisteminin değişen piyasa koşullarına uyum sağlama kolaylığıdır.

Bu çalışma ile en çok ilgili olan esneklik türü *makine esnekliği* ve *malzeme elleçleme esnekliği*dir. Bu esneklik Sethi ve Sethi [16] tarafından tanımlandığı şekliyle detaylı olarak aşığıda belirtilmiştir.

“*Makine esnekliği*, bir makinenin makine üzerinde uygulanabilen bir işlemden diğerine geçerken, engelleyici bir etki olmadan değişik işlemleri yapabilme kabiliyetidir. Engelleyici etki, maliyet ya da zamanla ifade edilebilir. Makine esnekliği , parti boyutlarının küçülmesinde, envanter maliyetlerinin azaltılmasında ve makine kullanımlarının artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Malzeme elleçleme esnekliği, farklı parçaların etkili bir şekilde imalat sistemi içerisinde taşınmasıdır. Bu tanım imalat sistemlerinde makinelerin yüklenmesi, boşaltılması, parçaların makinelere götürülmesi ve stoklanması konularını kapsamaktadır. Esnek bir malzeme elleçleme sistemine sahip olunması makinelerin uygunluğunu ve kullanımını artırmakta ve üretimi hızlandırmaktadır.”

Esnek üretim sistemleri, çizelgeleme literatüründe bir çok kez çalışılmıştır. Esnek üretim sistemlerinde çizelgeleme çalışmalarıyla ilgili daha detaylı bilgiye Gupta vd. [19]’denulaşılabilir. Robotlu üretim hücrelerinin çalışılmasıyla da birlikte, esnek üretim sistemlerinin bu alandaki etkileri incelenmeye başlanmıştır. Geismar vd. [20] esnek üretim sistemlerinin getirileri üzerinde çalışmışlardır. Burada esnek üretim sisteminden kasıt parçalara uygulanacak işlemlerin farklı makinelere atanabilmesi esnekliğidir. Çalışma sonucunda 2 makine durumunda bu esnekliğin

bir getirisinin olmadığı, 3 ve 4 makineli durumda ise en fazla $\%14\frac{2}{7}$ getiri sağladığı gösterilmiştir.

Akturk vd. [21] 2 makineli özdeş parça üretimi olan robotlu üretim hücrelerinde operasyon esnekliği üzerinedir. Bu çalışmada özdeş parçaların makineler üzerinde yapılması gereken bir takım işlemleri bulunduğu varsayılmıştır. Çalışmanın amacı parçaların işlemlerinin makinelere atanarak en küçük çevrim zamanını veren robot hareket çevrimini bulabilmektir. Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri esnek olamayan akış tipi üretim sistemlerinde en iyi robot hareket çevriminin 1-birim çevrimi olmasına rağmen burada bazı durumlarda 2-birim çevrimlerinin tüm 1-birim çevrimlerinden iyi sonuç verebileceği gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada makine yükleme/boşaltma zamanları ve robot yolculuk süresi üzerinde hassasiyet analizi yapılarak eniyilik bölgesinin değişimi incelenmiştir.

Gultekin vd. [22] robotlu hücrelerde operasyon ve süreç esnekliği üzerinedir. Bu çalışmada 3 makinenin bulunduğu bir robotlu hücre ele alınmıştır. Özdeş parçaların işlendiği sistemdeki tüm makineler bir parçaya uygulanması gereken tüm işlemleri yapabilecek esnekliğe sahip olduğu varsayılmıştır. Bu sayede makinelere işlemlerin ataması yapılabilmektedir. Sonuçta makinelerdeki parça işlem süreleri karar değişkeni haline getirilmiştir. Bu esneklik sayesinde yeni bir robot hareket çevrimi tanımlanmış ve bu çevrimin geleneksel akış tipi sistemlerde bulunan biri dışında tüm 1-birim çevrimlerine ve tüm 2-birim çevrimlerine baskın olduğu gösterilmiştir.

Gultekin vd. [23] daha sonra [22]'de bahsi geçen çalışmayı daha ileri seviye götürmüş ve m makineli genel durum için sonuçlar ortaya koymuştur. Önerilen çevrimlerin 2 makineli durumda tüm akış tipi robot hareket çevrimlerine baskın olduğu gösterilmiş ve $m \geq 3$ durumu için akış tipi robot hareket çevrimlerine baskın olduğu bölgeler belirtilmiştir. Ayrıca baskın olmadığı diğer bölgeler içinde en kötü durum analizi yapılmıştır.

2.2.1 Sade çevrimler

Esneklik üzerine yapılan çalışmalardan bir diğeri Gultekin vd. [24]'dir. Bu çalışmada metal kesme işlemleri için kullanılabilir m makineli ve tek tutuculu robotun bulunduğu bir robotlu hücre ele alınmıştır. Bu tip imalat hücrelerinde bulunan makinelerin genelde *CNC* makineler adı verilen makinelerden oluştuğu ve bu sebeple çok esnek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, özdeş parçaların üretildiği bu hücrelerde makinelerin bir parçaya uygulanması gereken tüm işlemleri uygulayabilecek kabiliyette olduğu varsayılmıştır. Bu esneklik sayesinde sade çevrimler adı verilen yeni bir tür robot hareket çevrimi tanımlanmıştır. Problemden robotun makineleri yükleme/ boşaltma, parça alma ve parça bırakma işlemlerini belirten aktivite tanımları yapılmış ve aktiviteler arası harcanması gereken zamanlar özel bir mesafe matrisinde sunularak problemin *GSP* şeklinde modellenmesi yapılmıştır. İyi sonuç veren iki sade çevrim belirlenerek, bu çevrimlerin eniyi sonucu verdikleri parametre değerleri ve eniyi olmadıkları bölgeler için en kötü durum analizi yapılmıştır. Ayrıca sade çevrimlerin tüm akış tipi robot hareket çevrimlerine baskın olduğu gösterilmiştir. Böylece bu çevrimlerin sadece uygulamada basit olmadıkları, aynı zamanda iyi sonuç verdikleri gösterilmiştir.

Faamani ve Jenab [25], 2-makineli robotlu hücrelerde geliştirilmiş sade çevrimler üzerine çalışmışlardır. Robotun değiştirme (swap) özelliği bulunmaktadır. Sade çevrimlerden farklı olarak geliştirilmiş sade çevrimler kullanıldığında çevrim sonunda makine sayısı kadar parça üretilme zorunluluğu ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca geliştirilmiş sade çevrimlerin tüm sade çevrimlere baskın olduğu gösterilmiştir.

Sade çevrimlerin bulunduğu problemler ortak bir servis sağlayıcının bulunduğu Hall vd. [26]'de incelenen paralel makine çizelgeleme problemlerine benzetilebilir. Bu çalışmalarda sade çevrimlerden farklı olarak, makine hazırlık zamanları (işlenecek parçaların giriş stok alanından makineye götürme zamanı) bir problem parametresi olarak alınmıştır. Diğer taraftan, sade çevrimlerin incelendiği çalışmalarda makine hazırlık zamanı robot hareketlerine bağlı olarak değişen bir karar değişkenidir. Yine paralel makine literatüründen farklı olarak, robot

yükleme ve boşaltma işlemleri yapmakta ve sistemde sonsuz sayıda parça üretilmektedir [24]. Abdekhodae vd. [27] paralel makineli sistemlerde farklı parça üretimini ele almıştır. Genel problem güçlü $NP - Zor$ olduğu için problemin özel biri durumu olan eşit makine işlem zamanlarının bulunduğu problemi incelemişlerdir. Bu çalışma da proses zamanlarının eşit olması açısından sade çevrimlere benzemektedir [24].

2.3 Özet

Literatür araştırması bölümünde robotlu üretim hücresi çizelgeleme, üretimde esneklik ve sade çevrimler üzerinde şimdiye kadar yapılmış bir takım çalışmalar ele alınmıştır.

Gultekin vd. [24]'de ele alınan tek tutuculu robotlu üretim hücrelerinde sade çevrimlere ek olarak çift tutuculu bir robotun bu problem kapsamında ele alınması sebebiyle Gultekin vd. [24] bu tez kapsamında yapılan çalışmaya benzerlik göstermektedir. Literatürde bulunan çift tutuculu robotlu hücrelerin ele alındığı çalışmaların tek tutuculu sistemlere karşı getirisinin yüksek olması, bu tezin önemini ortaya koymaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte iki veya daha çok sayıda tutucuya sahip olan robotların üretimde kullanımının artması bu sistemlerin çizelgeleme başlığı altında incelenmelerini zorunlu hale getirmiştir. Sade çevrimlerin bulunduğu sistemler geleneksel akış tipi robotlu hücrelere olan üstünlükleri sebebiyle son yıllarda ilgi çeken araştırma konularından biridir. Bu çalışmada ele alınan çift tutuculu sistemler ve sade çevrimlerin ayrı ayrı getirilerinin yüksek olması bu problemi çalışılabilir hale getirmektedir.

İmalat sektöründe esnek üretim sistemlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple, bu tez çalışması çizelgeleme literatürünün gelişen imalat teknolojilerine ayak uydurabilmesi ve yeni çözümler üretebilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca bilindiği kadarıyla bu tez kapsamında çalışılmış olan problem daha önce hiçbir çalışmanın konusu olmamıştır.

3. PROBLEM TANIMI

Bu bölümde problem ile ilgili gerekli tanımlamalar ve kullanılan notasyon verilecektir. Robotlu üretim hücrelerinde makine üretim zamanları önemli sistem parametreleridir. Bu çalışmada tüm makineler ve üretilen parçalar özdeş oldukları için tek bir üretim zamanı değeri bulunmaktadır. Bu değer P ile gösterilecektir. Literatürde çok sayıda çalışmada da ele alındığı gibi bu çalışmada da herhangi komşu iki makine arasında robot hareket zamanının eşit olduğu varsayılmıştır. Bu süre δ ile gösterilecektir. Örnek olarak m adet makinenin olduğu bir robotlu üretim hücresinde, giriş stoku ile makine 1 arasındaki mesafe ile makine 1 ve makine 2 arasındaki mesafe birbirine eşittir. Komşu olmayan makineler içinse bu süreler toplanabilir. Örneğin makine 1 ve makine 3 arasındaki robot hareket süresi 2δ 'dır. Aynı zamanda robotun her bir makineyi yükleme/boşaltma zamanları birbirine eşittir ve ε ile gösterilecektir.

Robot iki adet tutucuya sahip olduğu için tutucuların aynı anda ikisi de aktif olamamaktadır. Bu sebeple herhangi bir tutucu aktif durumda iken diğerini aktif duruma getirebilmek için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bu süre θ ile gösterilecektir. Bu işlemin robot dururken veya belirli bir makineye doğru hareket ederken yapılabileceği varsayılmıştır. Son olarak, robot yüklü bir makineyi boşaltmak için makine önüne gittiğinde makinede hala işlem devam ediyor olabilir. Bu durumda kalan üretim süresi boyunca robotun makine önünde beklemesi gerekmektedir. Eğer robot, makine işlemini tamamladıktan sonra makine önüne gelirse bu değer sifıra eşit olacaktır. i makinesi önündeki bekleme zamanı w_i ile gösterilecektir. Robot, sade çevrimleri uygularken her bir çevrimde robot bekleme zamanları farklılık gösterebilir. Bunun sebebi robot bir makineyi yükledikten sonra, her bir çevrim işlem süresi tamamlanana kadar farklı işlemler yürütebilir. Bu da ilgili makineye varış süresini etkileyecektir. Bu sebeple robot

bekleme süreleri çevrime göre değişen bir karar değişkeni olarak ele alınmıştır.

Tablo 3.1 çalışmada kullanılan notasyonu özetlemektedir.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan notasyon

Simge	Açıklama
P	Bir parçanın herhangi bir makinedeki işlem süresi
δ	Robotun komşu iki makine arasındaki hareket süresi
ε	Makine yükleme ve boşaltma süresi
θ	Tutucu değiştirme süresi
w_i	Robotun makine i önünde bekleme zamanı

Tabloda gösterilen tutucu değiştirme zamanının (θ) genel olarak uygulamada çok küçük bir değer olduğu bu sebeple de literatürde yapılan bazı çalışmalarda da bu değer diğer sistem parametrelerine göre küçük değerler aldığı belirtilmiştir [10]. Bu çalışmada tutucu değiştirme zamanının robotun komşu iki makine arasındaki hareket süresinden küçük veya ona eşit olduğu ($\theta \leq \delta$) varsayımı yapılmıştır. Bu sebeple robot bir makineden diğerine giderken robot etkin olmayan tutucusunu etkin hale getirdiğinde tutucu değiştirme zamanının robotun toplam harcadığı süreye bir etkisi olmamaktadır. Fakat bir makine önünde dururken yapılan tutucu değiştirme işlemi θ kadarlık bir süre gerektirir ve bu süre robotun toplam harcadığı süreye eklenir.

Bu çalışmada amaç en küçük çevrim zamanını veren sade çevrimi bulabilmektir. Daha önce de belirtildiği gibi bir sade çevrim içerisinde her makine bir defa yeni bir parça ile yüklenmeli ve parçanın makine üzerindeki işlemi tamamlandıktan sonra makine boşaltılarak işlenen parça çıkış stok alanına bırakılmalıdır. Bu sebeple robot bir sade çevrim içerisinde giriş stok alanından m adet parça almalı ve her bir makineyi bu parçalarla yüklemelidir. İşlenen parçaların da, makinelerden boşaltılarak çıkış stoku alanına robot tarafından götürülmesi gereklidir. Bu çalışmada çift tutuculu robot ele alındığı için, bu işlemler yapılırken robot iki tutucusunu da kullanabilir.

Çevrim zamanı bir sade çevrimi tamamlamak için harcanan toplam süre olarak tanımlanmaktadır. Bir sade çevrim sonunda toplamda makine sayısı kadar parça

üretir. Tanımlanan sade çevrimler ve çevrim süreleri aşağıdaki semboller ile belirtilmiştir.

C_i^m : m makineli bir robotlu hücredeki i . sade çevrim

$T_{C_i^m}$: m makineli bir robotlu hücredeki i . sade çevrimin çevrim zamanı

Örnek olarak, bir sade çevrim içerisinde robotun öncelikle giriş stokundan iki adet parça alıp, makine 1'in yüklediği bir durum ele alındığında, robot öncelikle ilk parçayı giriş stokundan alması ε kadar zaman harcayacaktır. Daha sonra ikinci parçayı alabilmek için diğer tutucu aktif hale getirilmeli ki bu da θ kadar zaman alacaktır. İkinci parçayı alabilmek için robot yine ε kadar zaman harcadıktan sonra makine 1'in önüne gelecektir. Bu da δ kadar sürecektir. Makine 1'in önüne ulaşan robot makineyi yüklemek için ε kadar zaman harcayacaktır. Parça makineye yüklendikten sonra, makine P kadarlık süre boyunca parçayı işleyecek ve bu süre içerisinde başka bir işlem yapamayacaktır. Robot ise bu esnada makinenin önünde bekleyebilir veya diğer makinenin veya giriş/çıkış stokunun önüne giderek başka aktiviteler yapabilir.

3.1 Sade Çevrimlerin Tanımlanması

Sade çevrimlerin tanımlanabilmesi için bazı olurluluk koşulları bulunmaktadır. Bu olurluluk koşulları aşağıda belirtilmiştir.

- Bir sade çevrim içerisinde her bir makine bir kere yüklenir ve boşaltılır.
- Giriş stokundan m adet parça alınır ve çıkış stokuna m adet parça bırakılır.
- Robot aynı anda en fazla 2 adet parça taşıyabilir.

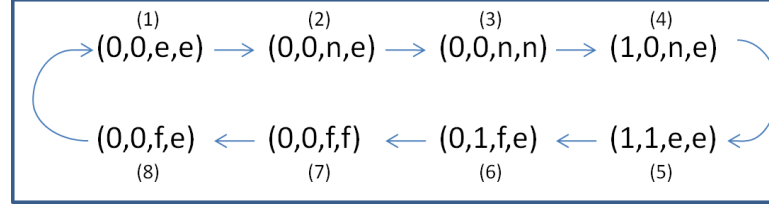
Olurluluk koşullarından da anlaşılacağı gibi bir çevrimin ifade edilebilmesi için makinelerin ve tutucuların durumlarının bilinmesi gerekir. Takip eden tanımda sade çevrimlerde makinelerin ve tutucuların çevrim içerisindeki işlevsel değişimlerini dikkate almak için kullanılmaktadır. Böylece bir sade çevrim, farklı durumların ardışık olarak sıralanmasıyla ifade edilebilecektir.

Tanım 1. *Durum*, robotun herhangi bir makine önünde o makinedeki bir işlemi tamamladıktan hemen sonra makinelerin ve tutucuların durumunu gösteren $(m+2)$ ögeli sıralı değişken grubudur. İlk m eleman makinelerin dolu olup olmadığı (dolu için 1, boş için 0) ve son iki eleman ise tutucularda hangi tür parçalar olduğu (yeni parça için n , işlenmiş parça için f , boş için e) durum tanımıyla ifade edilebilir.

Daha açık bir şekilde anlatabilmek için, 2 makineli bir robotlu üretim hücrelerini ele alalım. İki makineli bir sistemde durumlar dörtlü sıralı değişken grubu ile ifade edilebilir. Bu iki makineli sistemlere örnek olarak $(0, 0, e, e)$ durumunu ele alalım. Bu durum, her iki makinenin ve her iki tutucunun da boş olduğunu göstermektedir. $(0, 1, f, n)$ durumu ise, makine 1'in boş, makine 2'nin dolu olduğunu aynı zamanda tutucu 1'de işlenmiş tutucu 2'de ise işlenmemiş bir parçanın olduğunu göstermektedir.

Sistemde m makine olduğu durum için toplamda $9 \cdot 2^m$ adet durum bulunmaktadır (her bir makine için 2 olası durum ve her bir tutucu için 3 olası durum). Örnek olarak, makine sayısı 2 olduğunda toplam durum sayısı 36 olacaktır.

Bir sade çevrim, durumların çembersel permütasyonu ile ifade edilebilir. Burada amaç çevrim içerisinde oluşan her bir durumu ardışık olarak ifade etmektir. Her bir sade çevrimde robotun giriş stokundan m parça alması ve çıkış stokuna m parça bırakması ve m adet makinenin her birini birer defa yükleyip boşaltması gerektiği için toplam $4m$ durum ile bir sade çevrim ifade edilebilir. Yalnızca yukarıda belirtilen parça alma/bırakma ve yükleme/boşaltma işlemleri sonucunda durumlar değişmektedir. Robot makineler arasında hareket ederken veya belirli bir makine önünde beklerken sistemi o an için ifade eden durum değişiklik göstermez. Örnek olarak, 2 makinenin bulunduğu bir sistemde sade çevrimler 8 adet durum ile ifade edilebilir. Örnek bir sade çevrim olan C_2^2 sade çevrimindeki durumların değişimi Şekil 3.1'de görülebilmektedir.



Şekil 3.1: 2 makine durumu için bir sade çevrimin durumlar ile ifade edilmesi.

Durumlar ile ifade edilen sade çevrimlerde robotun hangi makineler önünde hangi işlemleri yaptığı doğrudan anlaşılabilir. Fakat ardışık iki durum incelenerek robotun işlemi yaparken bulunduğu pozisyon belirlenebilir. Bu inceleme yapılırken ardışık iki durum arasındaki farklılıklar gözlemlenir. Örnek olarak, bir sade çevrimde $(0,0,e,e)$ durumunu $(0,0,e,n)$ takip ediyorsa, ikinci durumda tutucu 2’de yeni bir parça olduğu ve birinci durumda tutucu 2’de bu durum gözlemlenmediği için ilgili iki durumun bir çevrim içerisinde ardışık olarak bulunması robotun giriş stokundan parça aldığı anlamına gelmektedir.

Yukarıdaki bilgiye göre Şekil 3.1’de gösterilen C_2^2 sade çevriminde robotun yaptığı işlemler ve robotun pozisyonu bulunabilir. Bu bir çevrim olduğu için başlangıç pozisyonu herhangi bir nokta seçilebilir. Bu bağlamda $(0,0,e,e)$ durumu başlangıç olarak seçilmiş olsun. Öncelikle robot çevrim içerisinde $(0,0,e,e)$ durumundan $(0,0,n,e)$ durumunu geçtiği için robotun tutucu 1 ile giriş stokundan parça aldığı anlaşılmaktadır. Daha sonra $(0,0,n,n)$ durumuna geçerek robotun yine giriş stokundan parça aldığı görülmektedir (tutucu 2 kullanılarak). Sonrasında ise $(1,0,n,e)$ durumuna geçilmektedir ki bu da tutucu 2’deki yeni parça kullanılarak makine 1’in yüklendiğini göstermektedir. $(1,1,e,e)$ durumuna geçildiğinde ise tutucu 1’deki parça kullanılarak makine 2’nin yüklendiği görülmektedir. $(0,1,f,e)$ durumuna geçildiğinde robot tutucu 1’i kullanarak makine 1’deki işlenmiş parçayı boşaltmıştır. Daha sonra $(0,0,f,f)$ durumda robot tutucu 2’yi kullanarak makine 2’yi boşaltmıştır. $(0,0,f,e)$ durumuna geçebilmek için tutucu 2’de bulunan işlenmiş parça çıkış stokuna bırakılmıştır. Son olarak başlangıç durumuna döndüğünde tutucu 1’de bulunan işlenmiş parça, çıkış stokuna bırakılmıştır.

Daha öncede belirtildiği gibi sade çevrimler $4m$ durumun çembersel permütasyonları şeklinde ifade edilebilmektedir. m adet makinenin bulunduğu bir sistemde $9 \cdot 2^m$ adet durum bulunduğu için toplamda $(9 \cdot 2^m)^{4m-1}$ adet sade çevrim oluşturulabilir. Fakat bu sade çevrimlerin bir kısmı bahsettiğimiz olurluluk koşullarını ihlal etmektedir. Örneğin $(0, 0, e, e)$ durumundan $(1, 0, n, f)$ durumuna geçmek mümkün değildir. Sadece olurlu olan sade çevrimlerin incelenebilmesi için yukarıda bahsi geçen $(9 \cdot 2^m)^{4m-1}$ sade çevrim incelenerek olurlu olanlarının bulunması gerekir. Bu sebeple verilen bir makine sayısı için belirli bir durumdan başlayarak olurluluğu bozmayacak şekilde diğer durumların eklenmesiyle tüm sade çevrimler bulunur. Örnek olarak, 2 makineli bir robotlu hücrede $7.8 \cdot 10^{10}$ adet çevrimin 2574 adeti olurlu sade çevrimlerdir. Olurlu olan çevrimlerin bulunabilmesi için İki makineli bir sistem de olurlu çevrim sayısının bu kadar büyük olması incelemeyi zorlaştırmaktadır. Takip eden tanımın kullanılması ile incelenmesi gereken sade çevrimlerin sayısı önemli ölçüde azalacaktır.

Tanım 2. Aktivite, robotun belirli bir makinenin (giriş ve çıkış stokları da dahil olmak üzere) önünde yaptığı ve sonucunda sistem durumunda bir değişikliğe neden olan hareketlerdir.

I: Robotun mevcut konumundan giriş stokuna giderek parça alması (Her çevrimde m defa yapılır).

L_i: Robotun mevcut konumundan makine i 'ye giderek makineyi yüklemesi, $i=1, 2, \dots, m$ (Her çevrimde her makine için bir defa yapılır).

U_i: Robotun mevcut konumundan makine i 'ye giderek makineyi boşaltması, $i=1, 2, \dots, m$ (Her çevrimde her makine için bir defa yapılır).

D: Robotun mevcut konumundan çıkış stokuna giderek parça bırakması (Her çevrimde m defa yapılır).

Aktivitelere örnek olarak, $(0, 0, e, e)$ ve $(0, 0, n, e)$ durumlarının bir çevrimde ardışık olarak yer aldığını düşünelim. Burada iki durumun bir birinin takip edebildiği bir çevrimde robotun giriş stokundan parça almış olması gerekmektedir. O halde karşılık gelen aktivite, *I* aktivitesi olacaktır. Aynı şekilde ardışık olarak gelen $(1, 1, e, e)$ ve $(0, 1, f, e)$ durumları *U₁* aktivitesinin yapıldığını göstermektedir. Bir sade çevrimde $4m$ adet durum olduğu için çembersel yapıda bir sade çevrimi ifade eden durum değişikliği de $4m$ adet olacaktır. Bu sebeple m

adet makinenin bulunduğu bir robotlu hücrede, bir sade çevrimi ifade edebilmek için $4m$ adet aktivite kullanılmalıdır. Örnek olarak, Şekil 3.1'deki sade çevrim $C_2^2 = I - I - L_1 - L_2 - U_1 - U_2 - D - D$ aktivite dizisiyle ifade edilebilir. Ancak görülebildiği gibi aktiviteler ile ifade edilen bir çevrimde sadece makinelerin durumdaki değişimler takip edilebilir. Tutucularda hangi tip parça olduğu ve aktivitelerde hangi tutucuların kullanıldığı belirli değildir.

Şimdi 2 makinenin bulunduğu bir sistemde her biri bir sade çevrimi ifade eden aşağıdaki durum dizilerini ele alalım.

- $(0, 0, e, e)-(0, 0, e, n)-(0, 0, n, n)-(1, 0, e, n)-(1, 1, e, e)-(0, 1, f, e)$
 $-(0, 0, f, f)-(0, 0, e, f)$
- $(0, 0, e, e)-(0, 0, e, n)-(0, 0, n, n)-(1, 0, n, e)-(1, 1, e, e)-(0, 1, e, f)$
 $-(0, 0, f, f)-(0, 0, e, f)$
- $(0, 0, e, e)-(0, 0, e, n)-(0, 0, n, n)-(1, 0, n, e)-(1, 1, e, e)-(0, 1, f, e)$
 $-(0, 0, f, f)-(0, 0, f, e)$

Bu sade çevrimlerin hepsi, $I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$ aktivite dizisine karşılık gelmektedir. Bunun sebebi, aktiviteler yardımıyla tutucu kullanımlarının belirlenememesidir. Farklı çevrimleri aynı aktivite dizisine sahip olması, çevrimler içerisinde iki tutucunun da aynı işleve sahip olduğu durumlarda ortaya çıkar. Aynı işlevden kasıt robotun sonraki aktivitesinin iki tutucu tarafından da gerçekleştirilebilmesidir. Örneğin, robot çıkış stokuna parça bırakırken iki tutucuda da işlenmiş bir parça olması durumu düşünülebilir. Bu durumlar (e, e) (her iki tutucunun boş olması), (n, n) (her iki tutucuda işlenmemiş parça olması) ve (f, f) (her iki tutucuda işlenmiş parça olması) şeklindedir. Tutucular çevrim içerisinde belirtilen durumlarla çok kez karşılaştıkları için bir aktivite dizisi bir çok sade çevrime karşılık gelebilir.

Takip eden tanımlar ve önteoremler ile, bir aktivite dizisine karşılık gelen sade çevrimlerden birinin diğerlerine baskın olduğu gösterilecektir. Böylece en iyi çevrimler aranırken bir çok sade çevrim, incelenecek sade çevrim sayısı önemli ölçüde azaltılacaktır. Aynı zamanda, geriye kalan sade çevrimler için durum

dizileri ile ifade edilen karmaşık çevrim yapısı kullanılmayıp, yalın aktivite dizileri kullanılabilir.

Tanım 3. *Etkin tutucu*, robotun hali hazırda kullanıma hazır olan tutucusudur.

Örnek olarak, $(0, 0, e, e)$ durumunu ele alalım. Bu durumda I aktivitesi yapıldıktan sonra sistem ya $(0, 0, n, e)$ ya da $(0, 0, e, n)$ durumuna geçecektir. Eğer sistem $(0, 0, n, e)$ durumuna geçti ise aktivite tutucu 1 ile yapıldığı için etkin tutucu, tutucu 1 olacaktır, diğer durumda ise etkin tutucu, tutucu 2 olacaktır. Daha önce belirtildiği gibi etkin tutucunun değiştirilebilmesi için robotun θ kadar zaman harcaması gerekmektedir. Takip eden önteorem ile sistem belirli bir durumda ve bir aktivite yapılacakken hangi tutucunun kullanılması gerektiğini belirtmektedir.

Önteorem 1. *Eğer sistemde tutucular, (e, e) , (f, f) ya da (n, n) durumlarından birine sahip ise, takip eden aktivitenin etkin tutucu ile yapıldığı bir eniyi sade çevrim vardır.*

İspat Belitilen durumlardan sonra, her iki tutucu da sonraki aktiviteyi yapabilmek için uygun durumdadırlar. Eğer etkin tutucu kullanılmazsa, fazladan bir θ süresi boyunca robot diğer tutucuyu etkin tutucu yapmak için zaman harcayacaktır. Tutucu değiştirme işlemiyle koşul olarak aynı anda yapılabilecek işlemlerin (örnek olarak tutucu değiştirme ve makinede parça işleme ya da tutucu değiştirme ve bir makineden diğerine hareket etme) zamanlarına bağlı olarak, tutucu değiştirme işlemi çevrim zamanını artırabilir. Diğer taraftan tutucuların değiştirilememesi ve etkin tutucunun kullanılmaya devam edilmesi çevrim zamanını artırmayacaktır. \square

Tanım 4. *Bir sade çevrimin tamamlayıcı çevrimi*, aynı aktivite dizisine sahip çevrimlerden, aktiviteler yapabilmek için kullanılan etkin tutucularının hepsinin asıl çevrimdekinden farklı olanıdır.

Bu tanımı açıklamak için $I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$ aktivite dizisine karşılık gelen aşağıdaki iki sade çevrimi ele alalım.

- $(0, 0, e, e) - (0, 0, n, e) - (0, 0, n, n) - (1, 0, e, n) - (1, 1, e, e) - (0, 1, f, e) - (0, 0, f, f) - (0, 0, e, f)$
- $(0, 0, e, e) - (0, 0, e, n) - (0, 0, n, n) - (1, 0, n, e) - (1, 1, e, e) - (0, 1, e, f) - (0, 0, f, f) - (0, 0, f, e)$

G_1 tutucu 1'in ve G_2 de tutucu 2'nin kullanımını göstermek üzere, her bir aktiviteye karşılık gelen etkin tutucu dizileri sırasıyla $G_1 - G_2 - G_1 - G_2 - G_1 - G_2 - G_1 - G_2$ ve $G_2 - G_1 - G_2 - G_1 - G_2 - G_1 - G_2 - G_1$ şeklindedir. Bu iki diziden görülebileceği gibi aktivitelerde etkin olan tutucular iki çevrim için tamamıyla birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu da bu iki sade çevrimin, birbirlerinin tamamlayıcı çevrimleri olduğunu belirtmektedir.

Tamamlayıcı sade çevrimlerin çevrim zamanlarının birbirlerine eşit olduğu aşıkardır. Bu sebeple, genelliği kaybetmeden, tamamlayıcı sade çevrimlerden yalnızca birinin incelenmesi yeterli olacaktır. Bu sebeple, tamamlayıcı çevrimler arasından sadece ilk aktivitesinin etkin tutucusu (1. durumdan 2. duruma geçerken), "tutucu 1 (G_1)" olanları incelenecektir. Ayrıca çevrimler çembersel yapıda oldukları için, genelliği kaybetmeden, çevrimin ilk aktivitesinin I olduğu sade çevrimler incelenecektir.

Belirtilen bu kurallar ile birlikte etkin çevrimler aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Tanım 5. *Etkin çevrim, çevrimin ilk aktivitesinin I olduğu, bu aktivitenin tutucu 1 tarafından yapıldığı ve çevrimdeki etkin tutucuların Önteorem 1'de belirtildiği gibi olduğu sade çevrimdir.*

Etkin çevrim tutucu geçişleri Önteorem 1'de belirtildiği gibi yapıldığından aynı aktivite dizisine karşılık gelen farklı sade çevrimler arasında en düşük çevrim zamanına sahip olanıdır. Bu sebeple problem parametreleri ne olursa olsun optimal olan en az bir etkin çevrim bulunabilir.

Etkin çevrimlerin ilk aktiviteleri, bu aktiviteyi yapan etkin tutucusu ve tutucu geçişleri bilindiği için bu çevrimlere karşılık gelen aktivite dizileri benzersizdir. Yani herhangi iki etkin çevrim aynı aktivite dizisine sahip olamaz. Örnek olarak, iki makine için $I - I - L_1 - L_2 - U_1 - U_2 - D - D$ aktivite dizisi verilmiş olsun. İlk iki

aktivite I olduğu için çevrimin başında iki tutucunun da boş olduğu düşünülebilir. Ardından gelen L_1 ve L_2 aktiviteleri de iki makinenin de başlangıçta boş olduğunu göstermektedir. Bu sebeple ilk durum $(0, 0, e, e)$ olur. İlk aktivite olan I tutucu 1 tarafından gerçekleştirileceği için 2. durum $(0, 0, n, e)$ olur. İkinci aktivite yine I olduğu için bu kez tutucu 2 kullanılır. Sonuç olarak 3. durum $(0, 0, n, n)$ şeklindedir. Daha sonra robot makine 1'i yüklemek için önüne gittiğinde son aktivitede kullanılan etkin tutucu, tutucu 2 olduğu için makine 1 tutucu 2'deki yeni parça ile yüklenir (4. durum: $(1, 0, n, e)$). Daha sonra makine 2, tutucu 1'de bulunan parça ile yüklenir (5. durum: $(1, 1, e, e)$). Makine 1'i boşaltmak için son aktivitenin etkin tutucusu olan tutucu 1 kullanılır (6. durum: $(0, 1, f, e)$). Makine 2, tutucu 2 kullanılarak boşaltılır (7. durum: $(0, 0, f, f)$). Makine 2 boşaltıldıktan sonra parçalar bırakılmak için çıkış stokuna gidildiğinde iki tutucuda da işlenmiş parça bulunmaktadır. Yine son aktivitenin etkin tutucusu olan tutucu 2'deki parça çıkış stokuna bırakılır (8. durum: $(0, 0, f, e)$). Son olarak tutucu 1'de bulunan işlenmiş parça çıkış stokuna bırakılarak başlangıç durumu olan $(0, 0, e, e)$ elde edilir.

Daha önce belirtildiği gibi, etkin çevrimlerde bulunan etkin tutucular Önteorem 1'de belirtildiği gibi olduğundan, aynı aktivite dizisine sahip diğer sade çevrimlerden küçük veya onlara eşit çevrim zamanlarına sahiptirler. Etkin çevrimler kullanıldığında incelenecek sade çevrim sayısı önemli ölçüde azalmaktadır. Örnek olarak 2 makineli bir robotlu hücrede toplam olurlu sade çevrim sayısı 2574 iken etkin çevrim sayısı 266 olarak bulunmuştur.

Etkin çevrimlerin çevrim zamanları da Tablo 3.1 kullanılarak hesaplanabilir. Bu tabloda bir etkin çevrim içerisinde ardışık iki aktiviteden biri tamamlandıktan sonra diğerinin tamamlanabilmesi için gereken zamanlar bulunmaktadır.

Tablo 3.2: Aktiviteler arası mesafeler

	L_j	U_j	I	D
L_i	$\max\{ i-j \delta, \theta\} + \varepsilon$	$ i-j \delta + \varepsilon + w_j$	$i\delta + \varepsilon$	$\max\{(m+1-j)\delta, \theta\} + \varepsilon$
U_i	$\max\{ i-j \delta, \theta\} + \varepsilon$	$\max\{ i-j \delta, \theta\} + \varepsilon + w_j$	$\max\{i\delta, \theta\} + \varepsilon$	$(m+1-j)\delta + \varepsilon + w_j$
I	$j\delta + \varepsilon$	$\max\{j\delta, \theta\} + \varepsilon + w_j$	$\theta + \varepsilon$	$\max\{m\delta, \theta\} + \varepsilon$
D	$\max\{(m+1-j)\delta, \theta\} + \varepsilon$	$(m+1-j)\delta + \varepsilon + w_j$	$m\delta + \varepsilon$	$\theta + \varepsilon$

Tabloda görüle w_j değerleri makine j , ($j = 1, 2, \dots, m$) önündeki bekleme zamanı değerlerini ifade eder. Bekleme zamanları sabit bir değer olmadığı ve aktivitelerin

yapılış sırasına göre farklılık gösterdiği için tabloda bulunan w_j değerleri çevrime göre değişen birer karar değişkenidir. Örneğin $L_1 - I - U_1$ diziliminin bir çevrim içerisinde yer aldığını düşünelim. Tablodan görülebileceği gibi L_1 aktivitesinden sonra I aktivitesinin yapılabilmesi için $\delta + \varepsilon$ 'luk zaman gerekmektedir. Daha sonra U_1 aktivitesinin yapılabilmesi için robotun δ kadar sürede makine 1'nin önüne gelmesi gerekmektedir. Bu makine önündeki bekleme süresi (w_1) ise parçanın işlemi tamamlanmamış ise işlem süresinden (P) tekrar makine 1'in önüne gelene kadar harcadığı toplam zamanın çıkartılmasıyla elde edilebilir. Eğer bu değer 0'dan küçük ise bekleme zamanı 0'a eşit olacaktır. O halde makine 1 önündeki bekleme zamanı $w_1 = \max\{0, P - (\varepsilon + 2\delta)\}$ şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca literatürde robotlu hücrelerde ele alınan robot bekleme zamanları kısmi ve tam bekleme olmak üzere iki kavram altında incelenmiştir. Kısmi bekleme, robotun makineyi yükledikten sonra başka aktiviteler yapıp tekrar makineyi boşaltmaya geldiği durumdaki bekleme olarak tanımlanmaktadır. Yukarıda $L_1 - I - U_1$ şeklinde belirtilen dizilim kısmi beklemeye örnek olarak verilebilir. Tam bekleme ise, robotun makineyi yükledikten sonra parçanın işlem süresi boyunca makinenin önünde beklediği durumdur ve bu durumda bekleme zamanı işlem süresi (P) kadardır. Bir çevrimde tam bekleme olabilmesi için, herhangi bir makine için $L_i - U_i$, $i = 1, 2, \dots, m$ dizilimin çevrim içerisinde bulunması gerekir.

4. 2 MAKİNE DURUMUNDA ENİYİ SADE ÇEVİRİMLER

Bu bölümde, 2 makineli bir robotlu hücre ele alınmıştır. 2-makine durumunun ayrıca ele alınmasının sebebi iki makinenin bulunduğu sistemlerle gerçek hayatta sıklıkla karşılaşılmasıdır. m -makine durumunun karmaşıklığının yüksek olmasından dolayı 2-makineli sistemler m -makine durumuna genelleme yapabilmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde de bir çok çalışmada 2-makine durumunun, m -makine genel durumu için elle tutulur sonuçlar ortaya çıkardığı belirtilmiştir.

2-makine durumunda eniyi çevrimleri belirleyebilme amacıyla öncelikle çevrim zamanları için bir alt sınır belirlenmiş, sonrasında ise bu alt sınır kullanılarak, verilen problem parametreleri için $(P, \varepsilon, \delta, \theta)$ en iyi sade çevrim belirlenmiştir. Takip eden önteoremden, çevrim zamanı değerleri için bir alt sınır elde edilmiştir.

Önteorem 2. *2 makineli robotlu hücrelerde, olurlu olan herhangi bir sade çevrimin çevrim zamanı aşağıda verilen T_{LB} değerinden küçük olamaz.*

$$T_{LB} = \max\{8\varepsilon + 6\delta + 2 \min\{P, \delta\} + 2\theta, P + 2\varepsilon + \theta\}. \quad (4.1)$$

İspat Max işlecindeki ilk terim robotun bir çevrimde yapması gereken minimum hareket miktarını göstermektedir. Herhangi bir sade çevrimde makinelerin her birinin 1 defa yüklenmesi (2ε), bir defa boşaltılması (2ε), iki defa giriş stokundan parça alınması (2ε) ve iki defa çıkış stokuna parça bırakılması (2ε) gerekmektedir. Bu işlemlerin toplam zamanı 8ε olacaktır. Ayrıca, herhangi bir çevrimde robot giriş stokundan çıkış stokuna hareket etmek zorundadır. Bu sebeple robot en az 3δ kadar hareket edecektir. Çevrim sonunda robot giriş stokuna tekrar geri dönmek zorunda olduğu için toplamda 6δ kadar zaman harcayacaktır.

Son olarak, herhangi bir çevrimde, robot bir makineyi yükledikten sonra, ya o makinenin önünde bekleyecektir ya da başka bir makineye (giriş ve çıkış stok alanları da makine olarak düşünülebilir) hareket edecektir. Bu da $\min\{P, \delta\}$ kadar zaman sürecektir. Hücrede iki adet makine olduğu için toplamda $2 \min\{P, \delta\}$ kadar zaman alacaktır. Benzer şekilde, giriş ve çıkış stoklarında da robot ya art arda iki parça alma/bırakma işlemi yapacaktır ya da başka bir makineye hareket edecektir. Robotun arka arkaya iki parça alma ya da bırakma işlemi yapabilmesi için tutucu değişimi yapması gerekmektedir ki bu da θ kadar zaman almaktadır. Bu durumda robot $2 \min\{\theta, \delta\}$ kadar zaman harcayacaktır. Daha önce bahsedilen tutucu değiştirme zamanları herhangi iki makine arasındaki hareket zamanından küçük olduğu varsayımı altında ($\theta \leq \delta$), $2 \min\{\theta, \delta\} = 2\theta$ olacaktır.

Max işlecindeki ikinci terim ise herhangi bir makinenin ardışık iki yüklemesi arasındaki en küçük zamanı göstermektedir. Bunun sebebi, çevrim zamanı sistemdeki herhangi bir makinenin ardışık iki yüklemesi arasında geçen süreden daha uzun olmak zorundadır. Bu zamanı en küçük olacak hale getirebilmek için makinenin boş kaldığı zamanın en küçüklenmesi gerekir. Herhangi bir makine çevrim içerisinde işlediği parçanın işlemi bittikten sonra boşaltma işlemi başlayana kadar veya makine boşaltıldıktan sonra tekrar yeni parça yüklenmeye başlanana kadar makine boş kalır. Boş kalmadığı durumlarda makine ya parça işler ya da parça yükleme/boşaltma işlemi yapar. Parça işleme süresi ve yükleme/boşaltma işlemlerinin toplamda $P + 2\varepsilon$ kadar süre alır. Bunun dışında makinenin boş kaldığı sürenin en küçüklenmesi için makinenin parça işlemi bittiği anda boşaltma işlemine başladığı durumu ele alalım. Bu durumda parça işlemi bittikten sonra tekrar yüklenmeye başladığı zaman arasında makinenin boş kaldığı süre 0 olur. Bu sebeple makine boşaltıldıktan sonra tekrar parça yüklenmeye başladığı ana kadar geçen süre makinenin boş kaldığı toplam süredir. Bu sürenin en küçüklenebilmesi için robotun bir makineyi boşalttıktan sonra yapabileceği iki alternatif de ele alınmalıdır. İlk alternatifte, robot makineyi boşalttıktan sonra başka bir makinede bir aktivite yapar ve yeni parçayı yüklemek için makineye geri döner. Bu durumda en yakın makineye olan yolculuk mesafesi (gidiş ve dönüş) 2δ ve bir işlem yapma süresi ε olduğu için toplamda en az $2\delta + \varepsilon$ süre boyunca makine boş kalacaktır. İkinci alternatifte ise robot makineyi boşalttıktan hemen sonra etkin olmayan tutucusunda bulunan işlenmemiş parçayı

yükler. Robotun etkin olmayan tutucuyu etkin hale getirmesi θ kadar zaman almaktadır ve makine bu süre boyunca boş kalır. ($\theta \leq \delta$) varsayımı altında ikinci alternatif daha az zaman alacağından toplamda $P + 2\varepsilon + \theta$ kadar süre boyunca diğer yükleme gerçekleştirilemez.

O halde robotun ve makinenin durumları göz önüne alındığında $\max\{8\varepsilon + 6\delta + 2 \min\{P, \delta\} + 2\theta, P + 2\varepsilon + \theta\}$, bir çevrimin çevrim zamanının alabileceği en küçük değerdir. \square

Bu alt sınır ifadesi, çevrimlerin çevrim zamanlarının bu alt sınırla kesişme bölgelerini belirlemek için kullanılmıştır. Bunun sebebi belirli bir aralıkta alt sınırla aynı çevrim zamanı değerine sahip olan çevrimin bulunabilmesidir. İlgili aralıkta daha düşük bir çevrim zamanına sahip olan başka bir çevrim bulunamayacağı, alt sınıra eşit olduğu aralık boyunca bu çevrimin optimal olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1'de 5 adet sade çevrimin aktivite dizisi ve çevrim zamanı ifadesi bulunmaktadır.

Tablo 4.1: İki makine durumu için eniyi sade çevrimler

Sade Çevrim	Aktivite Dizisi	Çevrim Zamanı
C_1^2	$I-I-L_1-U_1-L_2-U_2-D-D$	$8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P$ (4.2)
C_2^2	$I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (\varepsilon + 2\delta)\}$ (4.3)
C_3^2	$I-I-L_1-U_2-L_2-U_1-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\}$ (4.4)
C_4^2	$I-L_1-I-D-U_2-D-L_2-U_1$	$8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\}$ (4.5)
C_5^2	$I-U_1-L_1-I-D-U_2-L_2-D$	$8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + \max\{0, P - (6\varepsilon + 10\delta + \theta)\}$ (4.6)

Takip eden önteorem ile birlikte, C_1^2 , C_2^2 ve C_5^2 sade çevrimlerinin optimal oldukları parametre değerleri verilmiştir.

Önteorem 3. *2 makineli çift tutuculu bir robotlu üretim hücresinde*

1. *Eğer $P \leq \delta$ ise, C_1^2 sade çevrimi,*
2. *Eğer $\delta < P \leq \varepsilon + 2\delta$ ise, C_2^2 sade çevrimi,*
3. *Eğer $10\delta + 6\varepsilon + \theta \leq P$ ise, C_5^2 sade çevrimi,*

en küçük çevrim zamanını veren sade çevrimlerdir.

İspat

1. Eğer $P \leq \delta$ ise, Denklem (4.1)'de verilen alt sınır $8\varepsilon + 6\delta + 2P$ değerine eşittir. Bu değer C_1^2 sade çevriminin Denklem (4.2)'de verilen çevrim zamanının ilgili aralıktaki değeridir.
2. Eğer $\delta < P \leq \varepsilon + 2\delta$ ise, Denklem (4.1)'de verilen alt sınır $8\varepsilon + 6\delta + 2\delta$ değerine eşittir. Bu değer C_2^2 sade çevriminin Denklem (4.3)'te verilen çevrim zamanının ilgili aralıktaki değeridir.
3. Eğer $10\delta + 6\varepsilon + \theta \leq P$ ise, Denklem (4.1)'de verilen alt sınır $P + 2\varepsilon + \theta$ değerine eşittir. Bu değer C_5^2 sade çevriminin Denklem (4.6)'da verilen çevrim zamanının ilgili aralıktaki değeridir.

Böylece ispat tamamlanır. □

Önteorem 3 ile birlikte $P \in [0, \varepsilon + 2\delta] \cup [6\varepsilon + 10\delta + \theta, +\infty)$ için eniyi sade çevrimler belirlenmiştir. Takip eden kısımlarda, geriye kalan $P \in (\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta)$ için daha detaylı bir inceleme yapılacaktır.

4.1 2 makine durumu için sade çevrimlerin sınıflandırılması

Bu kısımda, 2 makineli robotlu hücrelerde bulunan sade çevrimlerin hepsi farklı sınıflara ayrılarak, her sınıf için eniyi çevrim bulunmuştur. Sonra bu sınıf en iyileri bir birleriyle kıyaslanarak 2 makine probleminin eniyi çözümü bulunmuştur. Sade çevrimler çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Bunlardan biri robotun bir çevrim içerisindeki toplam yolculuk (robotun makineler arası katettiği yol) süresidir. Daha önce Önteorem 2'de bahsedildiği gibi robot bir çevrim içerisinde en az 6δ 'lık yolculuk yapmalıdır. Makineler arası fazladan yapılan tüm yolculuklar bu yolculuk zamanını 6δ 'nın üzerine çıkaracaktır. Robot bir çevrimde döngüsel hareketler yaptığı için (robot çevrim sonunda başlangıç pozisyonuna döndüğü ve katedilen her yolu geri dönmek zorunda olduğu için), 6δ 'nın üzerine fazladan

katedilen yollar δ 'nın çift katları şeklinde olmalıdır. Bu sebeple, bir sade çevrimdeki, robotun toplam yolculuk zamanı $(6 + 2k)\delta$, $k = 0, 1, \dots$ ile ifade edilebilir.

Başka bir sınıflandırma ölçütü bir çevrimdeki toplam tutucu değiştirme sayısıdır. Bu da çevrim zamanı ifadesindeki toplam θ sayısına karşılık gelmektedir. Robotun makineler arasında hareket ederken tutucularını değiştirebildiği ve $\theta \leq \delta$ varsayımının yapıldığı bazı çevrimlerin, çevrim zamanı ifadelerinde θ bulunmayabilir. Diğer durumlarda çevrim zamanı ifadesinde θ ve katları bulunacaktır ($\theta, 2\theta, 3\theta, \dots$). Bu durumlarda robot aynı makine önünde iki tane aktivite yaptığı için, tutucu değiştirme zamanları çevrim zamanı ifadesinde kesinlikle bulunacaktır.

- Robot giriş stokundan ardışık olarak iki parça alırsa (karşılık gelen ardışık aktiviteler $I-I$)
- Robot çıkış stokuna ardışık olarak iki parça bırakırsa (karşılık gelen ardışık aktiviteler $O-O$)
- Robot makine i'yi boşaltmasının hemen sonrasında tekrar yüklerse (karşılık gelen ardışık aktiviteler U_i-L_i , $i = 1, 2$)

Yukarıdaki durumların hepsinin bir çevrimde bulunması halinde çevrim zamanı ifadesi en fazla 4θ içerebileceği görülebilir. Takip eden önteorem bir çevrimde bulunan toplam tutucu değiştirme zamanı için bir üst sınır getirmektedir.

Önteorem 4. *Herhangi bir sade çevrimin çevrim zamanı en fazla 3θ içerebilir.*

İspat Çevrim zamanı ifadesinde 4θ bulunabilmesi için, yukarıda bahsi geçen ($I-I, O-O, U_1-L_1, U_2-L_2$) durumlarının hepsinin aynı sade çevrim içerisinde yer alması gereklidir. Çevrim içerisinde $I-I$ bulunduğunda, giriş stokundan arka arkaya iki tane parça alındığı ve bu durumda iki tutucu da yeni parçayla dolu olduğu için bir sonraki aktivitenin bir makine yükleme (L_i , $i = 1, 2$) işlemi olması gerekir. Bu da bir çevrimin 4θ içirme koşulunda bulunan U_i-L_i , $i = 1, 2$ durumlarından birini engelleyecektir. Sonuç olarak bir sade çevrimin çevrim zamanı ifadesi en fazla 3θ içerebilir. Böylece ispat tamamlanır. \square

Diğer taraftan, bir çevrimin çevrim zamanı ifadesinde bu üst sınır değeri (3θ) tam olarak yer alabilir. Örnek olarak, C_3^2 sade çevrimini ele alalım. Bu çevrimin aktivite dizisi $I-I-L_1-U_2-L_2-U_1-D-D$ şeklindedir. Bu çevrim içerisinde $I-I$, $D-D$ ve U_2-L_2 bulunduğu için, çevrim zamanı ifadesi 3θ içermektedir. Önteorem 4'ün sonucu olarak, iki makineli sistemde sade çevrimler, çevrim zamanı ifadesinde bulunan $t\theta$, $t=0,1,2,3$ olmak üzere sınıflandırılabilir.

Bahsi geçen iki sınıflandırma yöntemi (fazladan yolculuk zamanı ve tutucu değiştirme zamanı) kullanılarak sade çevrimler sınıflara ayrılmıştır. Önteorem 3'te belirtilen ve eniyi çevrimin belirlenmediği $P \in (\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta)$ aralığı için takip eden önteorem ile birlikte C_5^2 sade çevriminin belirli sınıflarda bulunan çevrimlere baskın olduğu (daha düşük veya eşit çevrim zamanı değeri verdiği) ispatlanmıştır.

Önteorem 5. *Eğer $P \in (\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta)$ ise, C_5^2 sade çevrimi toplam yolculuk süresi $(6 + 2k)\delta$, $k \geq 3$ olan tüm çevrimlerden daha düşük veya onlara eşit çevrim zamanı vermektedir.*

İspat C_5^2 sade çevriminin Denklem (4.5)'te verilen çevrim zamanı ifadesi $T_{C_5^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + \max\{0, P - (6\varepsilon + 10\delta + \theta)\}$ şeklindedir. Bu sebeple, $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ durumunda, bu ifade $T_{C_5^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta$ şeklini alır. $\theta \leq \delta$ olduğu için $T_{C_5^2} \leq 8\varepsilon + 12\delta$ yazılabilir. Diğer taraftan, tüm çevrimlerde 8ε 'luk bir yükleme boşaltma zamanı olduğu için toplam robot yolculuk süresi $(6 + 2k)\delta$, $k \geq 3$ tüm çevrimlerin çevrim zamanı değeri toplamda en az $8\varepsilon + 12\delta$ olacaktır ki bu değer ilgili aralıkta $T_{C_5^2}$ ifadesine eşittir. \square

Önteorem 5 kullanılarak, incelenecek sınıflar $k = 0, 1, 2$ durumlarına indirgenmiştir. Takip eden alt bölümlerde bahsi geçen toplam robot yolculuk sürelerine göre sınıflandırma yapılarak sınıf eniyileri aranmıştır.

Durum 1: k=0

Bu sınıfta sadece C_1^2 sade çevrimi olurludur. Bu sade çevrimin çevrim süresi denklem (4.2)'de verildiği gibi $8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P$ şeklindedir.

Durum 2: k=1

Bu sınıfta bir çok olurlu sade çevrim bulunmaktadır. $k = 1$ olduğu için robot

yolculuk süresi 8δ 'dır. Takip eden gözlem sınıf eniyisini bulabilmek için etkili bir arama sağlamaktadır.

Gözlem 1. $k = 1$ olduğu tüm sade çevrimler için, giriş stoku aktiviteleri (I) veya çıkış stoku aktiviteleri (D) ardışık olmayan sade çevrimlerin çevrim zamanı $8\varepsilon + 8\delta + P$ değerinden küçük olamaz.

Bu gözlemi daha açık bir şekilde ifade edebilmek için bahsedilen durumları ele alalım. Eğer robot giriş stokundan tek seferde iki parça almazsa, ikinci parçayı almak için çevrim içerisinde tekrar giriş stokuna dönmesi gerekmektedir. Bu da robotun 6δ üzerine fazladan δ kadar zaman harcamasına sebep olup toplam yolculuk süresini 7δ 'ya çıkaracaktır. Daha önce bahsedildiği gibi, eğer robot bir makineyi yükledikten sonra başka bir makineye giderse geri dönmek için δ kadar zaman harcayacağından makinelerden en az birinin önünde beklemesi gerekecektir (toplam 8δ 'lık robot yolculuk süresini geçmemesi için). Bu durumda robotun makine önünde beklediği P kadarlık işlem süresi çevrim zamanına eklenecektir. Bu durumda da bahsi geçen bu tip sade çevrimlerin çevrim zamanı $8\varepsilon + 8\delta + P$ değerinden büyük veya eşit olacaktır. Bahsi geçen durum çıkış stoku aktiviteleri için de geçerlidir.

Giriş ve çıkış stoku aktivitelerinin kendi içlerinde ardışık olduğu durumlar için ise genellikle kaybedilmeden her çevrimin $I-I$ ile başlayıp $D-D$ ile bittiği söylenebilir. Bunun sebebi, giriş stokundan 2 parça birden alındığında çıkış stokuna gitmeden iki parçanın da makinelere yüklenmiş olması gerekmektedir. Aynı şekilde tek seferde çıkış stokuna işlenmiş parçaları bırakabilmek için iki makinenin de boşaltılmış olması gerekmektedir. Bu da makine yükleme ve boşaltma işlemlerinin giriş ve çıkış stoku işlemlerinin arasında olması anlamına gelir. Bunun sonucu olarak $I - I$ ile başlayıp $D - D$ ile biten ve bu ikisi arasında $\{L_1; L_2; U_1; U_2\}$ aktivitelerinin herhangi bir sıra ile yapıldığı bütün çevrimler bu sınıftadır. Bu sınıfta toplam 24 adet sade çevrim vardır.

Bununla birlikte, robot giriş stokundan 2 parçayı tek seferde aldığı için, tutucuların ikisi de dolu olduğundan $I-I$ 'yı L_1 ya da L_2 aktiviteleri takip edebilir. Bu da incelenecek toplam sade çevrim sayısını 12'ye düşürecektir. Tablo 4.2'de incelenmesi gereken sade çevrimler ve çevrim zamanları görülebilir. Tablodan

Tablo 4.2: Ardışık giriş ve çıkış stoku aktiviteleri bulunan sade çevrimlerin aktivite dizileri

Aktivite Dizisi	Çevrim Zamanı
$I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\}$
$I-I-L_1-L_2-U_2-U_1-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$
$I-I-L_1-U_1-L_2-U_2-D-D$	$k = 1$ sınıfı için uygun değil
$I-I-L_1-U_1-U_2-L_2-D-D$	olurlu değil
$I-I-L_1-U_2-L_2-U_1-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\}$
$I-I-L_1-U_2-U_1-L_2-D-D$	olurlu değil
$I-I-L_2-L_1-U_2-U_1-D-D$	$k = 1$ sınıfı için uygun değil $k = 1$
$I-I-L_2-L_1-U_1-U_2-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$
$I-I-L_2-U_2-L_1-U_1-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + 2P$
$I-I-L_2-U_2-U_1-L_1-D-D$	olurlu değil
$I-I-L_2-U_1-L_1-U_2-D-D$	$8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\}$
$I-I-L_2-U_1-U_2-L_1-D-D$	olurlu değil

$k = 1$ sınıfına uygun olmayan yani toplam robot yolculuk süresi 8δ 'dan farklı olan ve olurlu olmayan (ardışık 3 boşaltma/bırakma işlemi olan) çevrimler çıkarılıp kalan sade çevrimler incelendiğinde, C_2^2 ($I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$) ve C_3^2 ($I-I-L_1-U_2-L_2-U_1-D-D$) dizilerine karşılık gelen aktivite dizlerinin diğer çevrimler tarafından başatlanmadığı (geçerli olan tüm aralığın her bölgesinde daha iyi sonuç veren bir çevrim olmadığı) görülmüştür. İncelenen $P \in (\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta)$ aralığında C_2^2 sade çevrimi Gözlem 1'de bahsi geçen ve çevrim zamanı en az $8\varepsilon + 8\delta + P$ olan diğer sade çevrimlerden de iyi veya onlara eşit sonuç vermektedir. Bu bölüm ile ilgili çevrim zamanı karşılaştırmaları Ek 1'de sunulmuştur.

Takip eden önteorem ile C_2^2 ve C_3^2 çevrimlerinin birbirleri arasındaki baskınlık ilişkisi belirtilmiştir.

Önteorem 6. *Eğer $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta + \theta$ ise, C_2^2 sade çevrimi $k = 1$ sınıfındaki tüm çevrimlere baskındır. Eğer $\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, C_3^2 sade çevrimi $k = 1$ sınıfındaki tüm çevrimlere baskındır.*

İspat Belirtilen C_2^2 ve C_3^2 sade çevrimlerinin çevrim zamanları belirtilen aralıklarda birbirleriyle kıyaslanmıştır.

1. Eğer $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta + \theta$ ise, $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\} =$

$7\varepsilon+6\delta+2\theta+P$ ve $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta$. $P \leq \varepsilon + 2\delta + \theta$ olduğu için $T_{C_2^2} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P \leq 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta = T_{C_3^2}$ olacaktır. Bu da C_2^2 sade çevriminin C_3^2 sade çevrimine baskın olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda C_2^2 , $k = 1$ sınıfındaki diğer tüm çevrimlere de baskın olduğu için (bkz. Ek 1), belirtilen aralıkta $k = 1$ sınıfındaki tüm sade çevrimlere baskındır.

2. Eğer $\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 2\varepsilon + 2\delta + \theta$ ise, $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_3^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta = T_{C_3^2}$. $P \geq \varepsilon + 2\delta + \theta$ olduğu için $T_{C_2^2} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P \geq 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta = T_{C_3^2}$ olacaktır. Bu da C_3^2 sade çevriminin C_2^2 sade çevrimine baskın olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda C_2^2 , $k = 1$ sınıfındaki diğer tüm çevrimlere de baskın olduğu için (bkz. Ek 1), C_3^2 sade çevrimi belirtilen aralıkta $k = 1$ sınıfındaki tüm sade çevrimlere baskındır.
3. Eğer $2\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_3^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\} = 6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$. $\varepsilon \leq 0$ olduğu için $T_{C_2^2} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P \geq 6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P = T_{C_3^2}$ olacaktır. Bu da C_3^2 sade çevriminin C_2^2 sade çevrimine baskın olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda C_2^2 , $k = 1$ sınıfındaki diğer tüm çevrimlere de baskın olduğu için (bkz. Ek 1), C_3^2 sade çevrimi belirtilen aralıkta $k = 1$ sınıfındaki tüm sade çevrimlere baskındır.

Böylece ispat tamamlanır. □

Önteorem 6 ile birlikte $k = 1$ sınıfı için iki farklı eniyi sade çevrim bulunmuştur.

Durum 3: k=2

Bu sınıfta bulunan sade çevrimlerin, robot yolculuk zamanı 10δ 'ya eşittir. Takip eden önteoremde C_4^2 sade çevriminin belirli bir aralıkta bu sınıftaki diğer tüm çevrimlere baskın olduğu gösterilmiştir.

Önteorem 7. *Eğer $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$ ise, C_4^2 sade çevrimi $k = 2$ sınıfındaki tüm çevrimlere baskındır.*

İspat P için verilen aralıkta, $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta$. $k = 2$ sınıfında, robot yolculuk

süresi 10δ olduğundan ve bütün sade çevrimlerde 8ε 'luk bir yükleme boşaltma süresi bulunduğundan, $k = 2$ sınıfındaki çevrimlerin, çevrim zamanlarının en küçük değeri $8\varepsilon + 10\delta$ değerine eşittir. Sonuç olarak ilgili aralık için C_4^2 sade çevrimi $k = 2$ sınıfındaki tüm çevrimlere baskındır. \square

Takip eden önteoremden t bir çevrimin çevrim zamanı ifadesinde bulunan θ 'ların sayısını göstermek üzere $t \leq 1$ olan tüm sade çevrimlerin çevrim zamanının alabileceği en küçük değer belirtilmiştir.

Önteorem 8. *$t \leq 1$ olan tüm sade çevrimlerin çevrim zamanı $3\varepsilon + 2\delta + P$ değerinden küçük olamaz.*

İspat Eğer $t \leq 1$ ise, makinelerden en az biri için geçerli olmak üzere, tutucu değiştirme zamanından kaçınabilmek için ilgili makine boşaltıldıktan sonra ve makineye yeni bir parça yüklenmeden önce robot başka bir makinede (makine 1, 2, giriş stoku veya çıkış stoku) bir aktivite yapmalıdır. Bu makinenin makine 1 olduğunu varsayalım. Makine 1 boşaltıldıktan sonra (U_1), robot L_1 aktivitesini yapmadan önce başka bir makineye gidip bir aktivite yapmalı ve makine 1'e geri dönmelidir. Robotun bu aktiviteyi yapmak için harcadığı süre boyunca makine 1 boş kalacaktır. Makine 1'in boş kaldığı bu sürenin en küçük değeri $\varepsilon + 2\delta$ (en yakın makineye gidiş-dönüş süresi (2δ) ve en az bir yükleme/boşaltma veya parça alma/bırakma süresi (ε)) değerine eşittir. Ayrıca makine $2\varepsilon + P$ (parça işleme süresi (P), makineyi yükleme/boşaltma süresi (2ε)) boyunca da başka bir işlem yapamayacaktır. O halde, toplamda $3\varepsilon + 2\delta + P$ süre boyunca makine 1 takip eden çevrim için hazır olmayacaktır. Aynı durum makine 2 için de geçerlidir. Böylece ispat tamamlanır. \square

Takip eden önteoremden C_4^2 sade çevriminin, yukarıda bahsi geçen $t \leq 1$ sade çevrimlerinden $k = 2$ sınıfında olanlarına belirli bir aralıkta baskın olduğu gösterilmiştir.

Önteorem 9. *Eğer $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, C_4^2 sade çevrimi $k = 2$ sınıfındaki $t \leq 1$ olan tüm sade çevrimlere baskındır.*

İspat Eğer $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, C_4^2 sade çevriminin çevrim zamanı $T_{C_4^2} = 3\varepsilon + 2\delta + P$ şeklindedir. Önteorem 8'de, $t \leq 1$ olan çevrimlerin çevrim

zamanı değerlerinin $3\varepsilon + 2\delta + P$ değerinden küçük olamayacağı gösterilmiştir. C_4^2 sade çevriminin çevrim zamanı değeri bu alt sımra eşit olduğu için, ilgili aralıkta $k = 2$ sınıfında bulunan ve $t \leq 1$ olan tüm sade çevrimlere baskındır. \square

$k = 2$ sınıfında bulunan çevrimlerin incelenmesi sırasında şu ana kadar $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$ aralığında baskın olan bir çevrim bulunmuştur. Geriye kalan $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ aralığında $t \leq 1$ olan çevrimlere de C_4^2 çevriminin baskın olduğu gösterilmiştir. Takip eden önteoremden ise C_5^2 çevriminin $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ aralığında $t \geq 2$ olan çevrimlere baskın olduğu gösterilecektir.

Önteorem 10. *Eğer $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, C_5^2 sade çevrimi $k = 2$ sınıfında bulunan ve $t \geq 2$ olan tüm sade çevrimlere baskındır.*

İspat P için verilen aralıkta, C_5^2 sade çevriminin çevrim zamanı $T_{C_5^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta$ şeklindedir. $t \geq 2$ olan çevrimlerde en az 2θ bulunacağı için, bu çevrimlerin çevrim zamanı $T_{C_5^2}$ değerinden daha küçük olamaz. Bu sebeple C_5^2 bu çevrimlere baskındır. \square

Önteoremler 9 ve 10'un sonucunda $P \in [5\varepsilon + 8\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ olduğu aralıkta $k = 2$ sınıfındaki diğer çevrimlere baskın olan iki adet sade çevrim bulunmaktadır, C_4^2 ve C_5^2 . Önteorem 7'de, $P \in [\varepsilon + 2\delta, 5\varepsilon + 8\delta]$, olduğu aralık için C_4^2 sade çevriminin bu sınıfta kalan diğer tüm çevrimlere baskın olduğu gösterilmişti. Fakat $P \in [5\varepsilon + 8\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ durum için C_4^2 ve C_5^2 arasında böyle bir ilişkiden şu an için söz edilemez. Takip eden önteoremden iki sade çevrim arasındaki ilişkiyi, çevrim zamanı kıyaslaması yaparak göstermektedir.

Önteorem 11. *Eğer $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ ise, C_4^2 sade çevrimi C_5^2 sade çevrimine baskındır. Eğer $5\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ ise, C_5^2 sade çevrimi C_4^2 sade çevrimine baskındır.*

İspat Bu iki çevrimin ilgili aralıklarda çevrim zamanları kıyaslanarak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

1. $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ iken, $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 3\varepsilon + 2\delta + P$ ve $T_{C_5^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + \max\{0, P - (6\varepsilon + 10\delta + \theta)\} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta$

olacaktır. $P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ olduğu için $T_{C_4^2} = 3\varepsilon + 2\delta + P \leq 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta = T_{C_5^2}$ olmaktadır. Bu da C_4^2 sade çevriminin C_5^2 çevrimine baskın olduğunu gösterir.

2. $5\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ iken, $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 3\varepsilon + 2\delta + P$ ve $T_{C_5^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + \max\{0, P - (6\varepsilon + 10\delta + \theta)\} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta$ olacaktır. $P \geq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ olduğu için $T_{C_4^2} = 3\varepsilon + 2\delta + P \geq 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta = T_{C_5^2}$ olmaktadır. Bu da C_5^2 sade çevriminin C_4^2 sade çevrimine baskın olduğunu gösterir.

Böylece ispat tamamlanır. □

Önteorem 11 ile birlikte C_4^2 ve C_5^2 arasındaki baskınlık ilişkisi gösterilmiştir. Buna göre $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ iken C_4^2 sade çevrimi, $5\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq P \leq 6\varepsilon + 10\delta + \theta$ iken C_5^2 sade çevrimi baskın olan çevrimlerdir.

Şimdiye kadar $P \in (\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta)$ aralığında $k = 0, 1, 2, 3$ sınıfları için baskın olan çevrimler ayrı ayrı bulunmuştur. Bu aşamadan sonra bu baskın olan sade çevrimlerin çevrim zamanları birbirleriyle kıyaslanarak ilgili aralıktaki eniyi çevrimler aranacaktır. Takip eden önteoremden C_1^2 ve C_2^2 arasındaki ilişki belirtilmektedir.

Önteorem 12. $P \geq \delta$ iken, C_2^2 sade çevrimi C_1^2 sade çevrimine baskındır.

İspat Eğer $P \geq \delta$ ise, $T_{C_1^2} = 8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P$ ve $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - \varepsilon - 2\delta\}$ şeklindedir. $P \leq \varepsilon + 2\delta$ iken $2P \geq 2\delta$ olduğu için bu aralıkta $T_{C_1^2} \geq T_{C_2^2}$ olmaktadır. $P \geq \varepsilon + 2\delta$ iken $2P \geq 2P - 2\varepsilon$ olduğu için bu aralıkta $T_{C_1^2} \geq T_{C_2^2}$ olmaktadır. □

Önteorem 12 ile birlikte, $P \in [\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ aralığında eniyi çözümün bulunabilmesi için C_2^2 , C_3^2 , C_4^2 ve C_5^2 çevrimlerinin birbirleriyle kıyaslanmasının yeterli olacağı gösterilmiştir. Takip eden önteorem ile birlikte C_2^2 ve C_4^2 sade çevrimleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Önteorem 13. $P \in [\varepsilon + 2\delta, \varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken C_2^2 sade çevrimi C_4^2 sade çevrimine baskındır, $P \in [\varepsilon + 4\delta - 2\theta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ iken C_4^2 sade çevrimi C_2^2 sade çevrimine baskındır.

İspat

- $P \in [\varepsilon + 2\delta, \varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (\varepsilon + 2\delta)\} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 8\varepsilon + 10\delta$ olmaktadır. $P \leq \varepsilon + 4\delta - 2\theta$ olduğu için $T_{C_2^2} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P \leq 8\varepsilon + 10\delta = T_{C_4^2}$ olmaktadır. O halde $T_{C_2^2} \leq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [\varepsilon + 4\delta - 2\theta, 5\varepsilon + 8\delta]$ iken $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (\varepsilon + 2\delta)\} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 8\varepsilon + 10\delta$ olmaktadır. $P \geq \varepsilon + 4\delta - 2\theta$ olduğu için $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + P \geq 8\varepsilon + 10\delta = T_{C_4^2}$ olmaktadır. O halde $T_{C_2^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [5\varepsilon + 8\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ iken $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (\varepsilon + 2\delta)\} = 7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 3\varepsilon + 5\delta + P$ olmaktadır. $4\varepsilon + \delta + 2\theta \geq 0$ olduğu için $T_{C_2^2} = 8\varepsilon + 10\delta + 2\theta + P \geq 3\varepsilon + 5\delta + P = T_{C_4^2}$ olmaktadır. O halde $T_{C_2^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.

Böylece ispat tamamlanır. □

Takip eden önteoremdede C_3^2 ve C_4^2 sade çevrimleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Önteorem 14. *Eğer $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ise, $P \in [\varepsilon + 2\delta, 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken C_3^2 sade çevrimi C_4^2 sade çevrimine baskındır, $P \in [2\varepsilon + 4\delta - 2\theta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ iken C_4^2 sade çevrimi C_3^2 sade çevrimine baskındır. Eğer $\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ise C_4^2 sade çevrimi C_2^2 sade çevrimine baskındır.*

İspat Eğer $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ise,

- $P \in [\varepsilon + 2\delta, \varepsilon + 2\delta + \theta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 8\varepsilon + 10\delta$ olur. $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ olduğu için $8\varepsilon + 8\delta + 3\theta \leq 8\varepsilon + 10\delta$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \leq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [\varepsilon + 2\delta + \theta, 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon + 8\delta + 3\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 2\delta + \theta)\} = 6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta + \max\{0, P - (5\varepsilon + 8\delta)\} = 8\varepsilon + 10\delta$ olur. $P \leq 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta$ olduğu için $6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P \leq 8\varepsilon + 10\delta$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \leq T_{C_4^2}$ olur.

- $P \in [2\varepsilon+4\delta-2\theta, 5\varepsilon+8\delta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 6\varepsilon+6\delta+2\theta+P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon+10\delta+\max\{0, P-(5\varepsilon+8\delta)\} = 8\varepsilon+10\delta$ olur. $P \geq 2\varepsilon+4\delta-2\theta$ olduğu için $6\varepsilon+6\delta+2\theta+P \geq 8\varepsilon+10\delta$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [5\varepsilon+8\delta, \varepsilon+10\delta+\theta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 6\varepsilon+6\delta+2\theta+P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon+10\delta+\max\{0, P-(5\varepsilon+8\delta)\} = 3\varepsilon+5\delta+P$ olur. $3\varepsilon+4\delta+2\theta \geq 0$ olduğu için $6\varepsilon+6\delta+2\theta+P \geq 3\varepsilon+5\delta+P$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.

Eğer $\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ise

- $P \in [\varepsilon+2\delta, \varepsilon+2\delta+\theta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon+10\delta+\max\{0, P-(5\varepsilon+8\delta)\} = 8\varepsilon+10\delta$ olur. $\theta \geq \frac{2}{3}\delta$ olduğu için $8\varepsilon+8\delta+3\theta \geq 8\varepsilon+10\delta$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [\varepsilon+2\delta+\theta, 5\varepsilon+8\delta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 6\varepsilon+6\delta+2\theta+P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon+10\delta+\max\{0, P-(5\varepsilon+8\delta)\} = 8\varepsilon+10\delta$ olur. $P \geq \varepsilon+2\delta+\theta$ ve $\theta \geq \frac{2}{3}\delta$ olduğu için $6\varepsilon+6\delta+2\theta+P \geq 8\varepsilon+8\delta+3\theta \geq 8\varepsilon+10\delta$ ve yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.
- $P \in [5\varepsilon+8\delta, \varepsilon+10\delta+\theta]$ iken, $T_{C_3^2} = 8\varepsilon+8\delta+3\theta+\max\{0, P-(2\varepsilon+2\delta+\theta)\} = 6\varepsilon+6\delta+2\theta+P$ ve $T_{C_4^2} = 8\varepsilon+10\delta+\max\{0, P-(5\varepsilon+8\delta)\} = 3\varepsilon+5\delta+P$ olur. $3\varepsilon+4\delta+2\theta \geq 0$ olduğu için $6\varepsilon+6\delta+2\theta+P \geq 3\varepsilon+5\delta+P$ yazılabilir. O halde $T_{C_3^2} \geq T_{C_4^2}$ olur.

Böylece ispat tamamlanır.

□

Önteorem 13'te C_2^2 çevriminin C_4^2 çevrimi ile karşılaştırmaları sonucunda, işlem zamanının $P = \varepsilon + 2\delta + \theta$ ya da $P = \varepsilon + 4\delta - 2\theta$ değerinden daha büyük değerlerde C_4^2 sade çevrimi çevrim zamanı değeri C_2^2 sade çevriminin çevrim zamanı değerinden küçüktür. Benzer şekilde Önteorem 14'de C_3^2 çevriminin

C_4^2 çevrimi ile karşılaştırmaları sonucunda, işlem zamanının $P = 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta$ değerinden daha büyük değerlerde C_4^2 sade çevrimi çevrim zamanı değeri C_3^2 sade çevriminin çevrim zamanı değerinden küçüktür. Aynı zamanda Önteorem 11'de belirtilen C_4^2 ve C_5^2 çevrimlerinin karşılaştırılması sonucu işlem zamanının $P = 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ değerinden daha küçük değerlerde C_4^2 çevriminin C_5^2 çevrimine göre daha küçük veya eşit çevrim zamanı verdiği görülmüştür. Bu sebeple de aynı aralıklarda baskın olamadıkları için C_2^2 ve C_3^2 çevrimlerinin C_5^2 çevrimi ile karşılaştırılmasına gerek kalmamıştır.

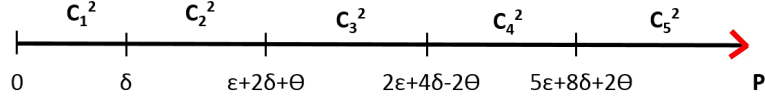
Böylece $P \in [\varepsilon + 2\delta, 6\varepsilon + 10\delta + \theta]$ aralığında baskın olan C_2^2 , C_3^2 , C_4^2 ve C_5^2 çevrimleri birbirleriyle kıyaslanmış ve baskın olduğu bölgeler belirlenmiştir. Takip eden teoremden 2 makine problemi için sistem parametreleri verildiğinde eniyi çevrimi veren sade çevrimin nasıl bulunacağı belirtilmiştir.

Teorem 1. *Takip eden çevrimler, 2 makine problemi için ilgili aralıklarda eniyi sade çevrimlerdir.*

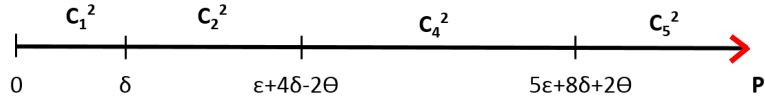
1. $P \in [0, \delta]$ iken C_1^2 ,
2. Eğer $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ise;
 - $P \in [\delta, \varepsilon + 2\delta + \theta]$ iken C_2^2 ,
 - $P \in [\varepsilon + 2\delta + \theta, 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken C_3^2 ,
 - $P \in [2\varepsilon + 4\delta - 2\theta, 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta]$ iken C_4^2 ,
3. Eğer $\delta \geq \theta \geq \frac{2}{3}\delta$ ise;
 - $P \in [\delta, \varepsilon + 4\delta - 2\theta]$ iken C_2^2 ,
 - $P \in [\varepsilon + 4\delta - 2\theta, 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta]$ iken C_4^2 ,
4. $P \in [5\varepsilon + 8\delta + 2\theta, +\infty]$ iken C_5^2 en iyi sade çevrimdir.

İspat İspat doğrudan daha önce ispatlanan Önteorem 6, Önteorem 11, Önteorem 12, Önteorem 13 ve Önteorem 14'te bulunan baskınlık aralıklarının birleştirilmesiyle ortaya çıkmaktadır. \square

Böylece 2 makineden oluşan bir robotlu hücrede sistem parametrelerinin değişimine göre eniyi çevrim zamanını veren sade çevrim Teorem 1'deki prosedüre göre bulunabilir. $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $\delta \geq \theta \geq \frac{2}{3}\delta$ durumları için eniyi olan çevrimler sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'den görülebilir.



Şekil 4.1: $\theta \leq \frac{2}{3}\delta$ durumunda eniyi çevrimler.



Şekil 4.2: $\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ durumunda eniyi çevrimler.

Şekil 4.1, 4.2 ve Teorem 1'den görülebileceği gibi $\delta \geq \theta \geq \frac{2}{3}\delta$ durumunda C_2^3 sade çevriminin eniyi olduğu bir aralık bulunmamaktadır. Bunun sebebi, C_2^3 sade çevrimi $k = 1$ sınıfına ait bir çevrim olmasının yanında çevrim zamanı ifadesinde 3θ bulunmaktadır. $\delta \geq \theta \geq \frac{2}{3}\delta$ olduğu durumda $3\theta \geq 2\delta$ olduğu için çevrim zamanında $8\delta + 2\delta = 10\delta$ 'dan daha büyük bir değer bulunmaktadır. Bu sebeple $k = 2$ sınıfında bulunan ve θ içermeyen çevrimler tarafından doğrudan baskılanmaktadır.

Takip eden bölümde, belirlenen eniyi çevrimler kullanılarak çift tutuculu robotun sade çevrimlerdeki katkısı incelenecektir.

5. ÇİFT TUTUCULU ROBOTLARIN FAYDA ANALİZİ

Bu bölümde, 2 makineli iki tutuculu sistemler ile 2 makineli tek tutuculu sistemlerle karşılaştırılmış ve ilave tutucunun üretim hızı açısından faydaları analiz edilmiştir.

Gultekin vd. [24] tarafından ele alınan çalışmada, tek tutuculu ve m adet makinenin bulunduğu bir robotlu hücrede bir sade çevrimin çevrim zamanının $\max\{4m\varepsilon + 2m(m+1)\delta, 4\varepsilon + (2m+2)\delta + P\}$ değerinden daha düşük olamayacağı belirtilmiştir. $m = 2$ olduğu durumda, bu alt sınır $AS_{tek} = \max\{8\varepsilon + 12\delta, 4\varepsilon + 6\delta + P\}$ değerine eşit olur.

Takip eden teoremden çift tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerin her zaman tek tutuculu sistemlere baskın olduğu gösterilmiştir.

Teorem 2. C_4^2 sade çevrimi her zaman 2 makineli tek tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerden daha düşük çevrim zamanı verir.

İspat

1. Eğer $P \leq 5\varepsilon + 8\delta$ ise, $T_{C_4^2} = 8\varepsilon + 10\delta \leq \max\{8\varepsilon + 12\delta, 4\varepsilon + 6\delta + P\} = AS_{tek}$,
2. Eğer $P > 5\varepsilon + 8\delta$ ise, $T_{C_4^2} = 3\varepsilon + 2\delta + P \leq 4\varepsilon + 6\delta + P = AS_{tek}$.

Böylece ispat tamamlanır. □

C_4^2 sade çevriminin, 2 makineli ve tek tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerin çevrim zamanından her zaman küçük ya da eşit olması, her durumda 2 makineli

ve tek tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerden iyi sonuç veren bir 2 makineli iki tutuculu sade çevrim olduğunu göstermektedir.

Ayrıca eniyi çevrimlerin eniyi olduğu aralıklarda AS_{tek} değerinden ne kadar iyi olduğu Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu kıyaslama yapılırken tek tutuculu sistemlerin alt sınır ifadesi AS_{tek} ve çift tutuculu sistemlerin eniyi çevrim zamanı ifadesi (Z_{eniyi}) ’nin birbirlerine oranı $(\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}})$ hesaplanmıştır. Bu oranın alabileceği en yüksek değer dikkate alınmış ve Tablo 5.1’de $lim(\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}})$ ifadesiyle gösterilmiştir. $lim(\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}})$ ifadesinin alabileceği en yüksek değer hesaplanırken parametrelerin tanımlandıkları aralıklardaki limit değerleri kullanılmıştır. Örnek olarak, $0 \leq P \leq \delta$ olduğu aralık ele alınsın. Bu durumda $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin değeri

$$\frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 6\delta + 2P}$$

olmaktadır. Bu ifadenin limit değerleri Denklem 5.1’deki gibi yazılabilir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 6\delta + 2P} = \frac{12}{6} = 2 \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de ortaya çıkan “2” değeri, ilgili aralıkta tek tutuculu sistemlerin çevrim zamanının çift tutuculu sistemlerin en fazla %50 iyileştirme sağlayabileceğini göstermektedir. Tabloda bulunan diğer değerler için yapılan hesaplamalar, limit değerleri ile ilgili açıklamalar Ek 2’de sunulmuştur.

Tablodan görülebileceği gibi $lim(\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}})$ değerleri 6/5 ile 2 arasında değişmektedir. Bu da çift tutuculu sistemlerin en fazla %16,67 ile %50 arasında iyileştirme sağlayabileceğini göstermektedir.

Eniyi olan çevrimlerin en iyi durum analizi yapılmış olsa da çift tutuculu hücrelerin ortalama performansının incelenbilmesi hesaplamalı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Takip eden kısımda 2 makineli sistemlerde çift tutuculu robot kullanımının ortalama katkısının ölçülebilmek için yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Bu sebeple çevrim zamanını etkileyebilecek 3 farklı etmen belirlenmiştir. Bu etmenler P/δ , θ/δ ve θ/ε şeklindedir. Bu üç etmen kullanılarak sistemin sahip olduğu parametrelerinin hepsinin etkisi incelenebilir. Etmenleri belirlerken parametrelerin oranlarının kullanılmasının sebebi, parametre değerlerinin diğer parametrelere karşı büyüklükleri bilindiğinde anlamlı hale

Tablo 5.1: Çift tutuculu ve tek tutuculu sistemlerin çevrim zamanı karşılaştırması

Eniyi Olma Aralığı		Eniyi Çevrim	$\frac{AS_{tek}}{CZ_{eniyyi}}$	$\lim(\frac{AS_{tek}}{CZ_{eniyyi}})$
$0 \leq P \leq \delta$		C_1^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{8\varepsilon+6\delta+2\theta+2P}$	2
$\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta$		C_2^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{8\varepsilon+8\delta+2\theta}$	3/2
$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$	$\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta + \theta$	C_2^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{7\varepsilon+6\delta+2\theta+P}$	3/2
	$\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 2\varepsilon + 2\delta + \theta$	C_3^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{8\varepsilon+8\delta+3\theta}$	3/2
	$2\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta$	C_3^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{6\varepsilon+6\delta+2\theta+P}$	3/2
	$2\varepsilon + 4\delta - 2\theta \leq P \leq 4\varepsilon + 6\delta$	C_4^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{8\varepsilon+10\delta}$	6/5
	$4\varepsilon + 6\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$	C_4^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{8\varepsilon+10\delta}$	6/5
	$5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$	C_4^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{3\varepsilon+2\delta+P}$	7/5
$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$	$\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 4\delta - 2\theta$	C_2^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{7\varepsilon+6\delta+2\theta+P}$	9/7
	$\varepsilon + 4\delta - 2\theta \leq P \leq 4\varepsilon + 6\delta$	C_4^2	$\frac{8\varepsilon+12\delta}{8\varepsilon+10\delta}$	6/5
	$4\varepsilon + 6\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$	C_4^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{8\varepsilon+10\delta}$	6/5
	$5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$	C_4^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{3\varepsilon+2\delta+P}$	6/5
$5\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq P \leq 8\varepsilon + 10\delta + \theta$		C_5^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{8\varepsilon+10\delta+2\theta}$	7/5
$8\varepsilon + 10\delta + \theta \leq P$		C_5^2	$\frac{4\varepsilon+6\delta+P}{2\varepsilon+\theta+P}$	8/5

gelmesidir. Örneğin, yalnızca tutucu değiştirme zamanının (θ) belirli bir değere eşit olduğunun bilinmesi tek başına anlamlı bir veri olmayacaktır. Ancak θ/δ değerinin bilinmesi deney öncesinde bile çift tutuculu robotların faydasını analiz etmek için yorum yapılmasına olanak sağlar. θ/δ değerinin yüksek olduğu durumlarda çift tutuculu sistemlerin getirisinin düşük olması beklenir. Bunun sebebi tutucu değiştirme zamanının tek tutuculu sistemlerde bulunmamasıdır.

Bu deneysel çalışma yapılırken belirlenen 3 etmenin her biri için 3 farklı etmen seviyesi belirlenmiştir. $\theta \leq \delta$ varsayımı yapıldığı için, θ/δ etmeninin değerleri $[0, 1]$ arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 5.2’te, etmenler ve etmen seviyeleri bulunmaktadır.

Tablo 5.2: Etmenler ve etmen seviyeleri

Etmen	Düşük (L)	Orta (M)	Yüksek (H)
$\frac{P}{\delta}$	0.1	5.0	10.0
$\frac{\theta}{\delta}$	0.1	0.5	1.0
$\frac{\theta}{\varepsilon}$	0.1	1	2

Tablo 5.2’te belirtilen etmenler ile oluşturulan deneysel çalışma Tablo 5.3’te sunulmuştur. Bu deneysel çalışmada yine iki makineli sistemlerdeki çift tutuculu sade çevrimlerin eniyi çevrim zamanı (CZ_{eniyi}^d) ile tek tutuculu sade çevrimlerin eniyi çevrim zamanı (CZ_{eniyi}^s) değerlerinin yüzde oranı kullanılmıştır. Bu oran $\%(\text{CZ}_{eniyi}^s - \text{CZ}_{eniyi}^d) / \text{CZ}_{eniyi}^s$ olarak ifade edilebilir. Tek tutuculu ve iki makineli sistemlerde bulunan sade çevrimlere Gultekin [24] çalışmasından ulaşılabilir. Bu çevrimlerin çevrim zamanları Ek 3’te sunulmuştur.

Bu deneysel çalışma sonucunda, $\text{CZ}_{eniyi}^s / \text{CZ}_{eniyi}^d$ ifadesinin ortalama değeri %20.2 olarak bulunmuştur. Bu sonuç sade çevrimler dikkate alındığında tek tutuculu sistemlerin çevrim zamanının çift tutuculu sistemlerin çevrim zamanlarından ortalamada %20 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca deneysel çalışmanın değerlerine göre bu oran %2.2 ile %45.2 arasında değişmektedir. %2.2 (P/δ , θ/δ , θ/ϵ) faktörlerinin (M, H, L) ve (H, H, L) olduğu seviyelerde ortaya çıkmıştır. %45.2 ise faktörlerin (L, L, H) olduğu seviyelerde ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre P/δ ve θ/δ yüksek, θ/ϵ ’nin düşük olduğu yerlerde çift tutuculu robotlu hücrelerin performanslarının göreceli olarak arttığı söylenebilir. Tablo 5.4’de P/δ faktörünün düşük, orta ve yüksek seviyelerinde aldığı değerlerin ortalamaları verilmiştir.

Tablodan görülebileceği gibi çift tutuculu sistemler P/δ ’nın düşük ve yüksek seviyelerde iyi, ancak orta olduğu seviyede diğer seviyelere göre daha kötü sonuç vermektedir. Bunun sebebi P/δ değerinin düşük olduğu seviyelerde C_2^1 gibi giriş stokundan aynı anda iki parçanın birden alındığı çevrimlerin iyi sonuç vermesidir. Tek tutuculu sistemlerde robot aynı anda iki parça alamayacağı için robot giriş stokuna 2 defa gitmek zorundadır. Bu da işlem zamanına göre yüksek olan robot yolculuk süresini artırmaktadır. P/δ yüksek olduğu seviyelerde ise C_2^5 gibi robotun değiştirme (swap) özelliğini kullandığı çevrimler iyi sonuç vermektedir. Tek tutuculu robotlar değiştirme yapamadığı için çift tutuculu robotların bu P/δ değerinin yüksek olduğu seviyelerde iyi sonuç vermesi beklenen bir durumdur.

Tablo 5.5’de θ/δ faktörünün düşük, orta ve yüksek seviyelerinde aldığı değerlerin ortalamaları verilmiştir.

Tablodan görülebileceği gibi θ/δ değerinin artması sonucunda çift tutuculu

robotların getirisinin azaldığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, çift tutuculu sistemlerin çevrim zamanı ifadelerinde θ değeri bulunmasına rağmen tek tutuculu sistemlerde bir tutucu değiştirme zamanı olmadığı için çevrim zamanlarında böyle bir değer bulunmayacaktır. Sonuç olarak θ/δ değerinin yüksek olduğu durumda çift tutuculu sistemlerin getirisinin azalması beklenen bir durumdur.

Tablo 5.6'de θ/ε faktörünün düşük, orta ve yüksek seviyelerinde aldığı değerlerin ortalamaları verilmiştir.

Tablodan da görülebileceği gibi θ/ε değeri arttıkça çift tutuculu sistemlerin getirisinin de arttığı görülmektedir. Bunun sebebi toplam yükleme/boşaltma zamanlarının tek ve çift tutuculu sistemlerde aynı olmasıdır. Hem çift tutuculu sistemlerde hem de tek tutuculu sistemlerde 8ε 'dur. Yükleme/boşaltma zamanlarının azalması çift tutuculu sistemlerin getirisini daha belirgin hale getirmektedir. Hatta tutucu değiştirme zamanının (θ) artması çift tutuculu sistemler için negatif bir etki yapmasına rağmen θ/ε oranının arttığı durumda çift tutuculu sistemlerinin getirisinin artması, ε parametresinin başlı başına etkili bir faktör olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3: Tek tutuculu sistemlerin alt sınır değeri ile çift tutuculu sistemlerin eniyi çevrim zamanı için deneysel çalışma

P/δ	θ/δ	θ/ε	QZ_{eniyi}^d	QZ_{eniyi}^s	$\%(QZ_{eniyi}^s - QZ_{eniyi}^d / QZ_{eniyi}^s)$
L	L	L	144	200	28.0
		M	72	128	43.8
		H	68	124	45.2
	M	L	94.4	104	9.2
		M	22.4	32	30.0
		H	18.4	28	34.3
	H	L	88.2	92	4.1
		M	16.2	20	19.0
		H	12.2	16	23.8
M	L	L	172	200	14.0
		M	108	134	20.6
		H	104	132	21.8
	M	L	98	104	5.8
		M	28	32	12.5
		H	24	28	17.2
	H	L	90	92	2.2
		M	18	20	10.0
		H	14	16	12.5
H	L	L	180	220	18.2
		M	110	184	33.7
		H	106	182	35.0
	M	L	99	104	4.8
		M	28	40	26.3
		H	25.5	38	27.1
	H	L	90	92	2.2
		M	18	22	18.2
		H	14	20	26.3
Ortalama					20.2

Tablo 5.4: $\frac{P}{\delta}$ için seviye ortalamaları

$\frac{P}{\delta}$	$\zeta Z_{eniyi}^s / \zeta Z_{eniyi}^d$
L	28.7
M	13.4
H	22.8

Tablo 5.5: $\frac{\theta}{\delta}$ için seviye ortalamaları

$\frac{\theta}{\delta}$	$\zeta Z_{eniyi}^s / \zeta Z_{eniyi}^d$
L	30.6
M	19.0
H	14.0

Tablo 5.6: $\frac{\theta}{\varepsilon}$ için seviye ortalamaları

$\frac{\theta}{\varepsilon}$	$\zeta Z_{eniyi}^s / \zeta Z_{eniyi}^d$
L	10.7
M	25.3
H	28.3

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada m makineden oluşan bir robotlu hücre problemi ele alınmıştır. Özdeş parçaların işlendiği sistemde makineler arası yükleme, boşaltma ve parça taşıma işlemlerini yapan çift tutuculu bir robot bulunmaktadır. Ayrıca sistemde bulunan tüm makinelerin her birinin özdeş parçaların ihtiyaç duyduğu tüm işlemleri yapacak esneklikte olduğu varsayılmıştır. Makinelere getirilen bu esneklik ile birlikte sade çevrim adı verilen ve bir çevrim içerisinde her makinenin bir defa yüklenip boşaltılması ve sonuçta makine sayısı kadar parça üretilmesiyle sonuçlanan robot hareket çevrimleri incelenmesine olanak sağlanmıştır. Problemin amacı en küçük çevrim zamanını veren sade çevrimi bulabilmektir.

Çift tutuculu robotların robotlu üretim hücrelerine kazandırdığı esneklik literatürde çok defa incelenmiştir. İmalat sistemlerinde kullanılma sıklığının artmasıyla da birlikte çift tutuculu sistemlerin çalışılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Ayrıca sade çevrimlerin de geleneksel akış tipi robotlu üretim hücrelerine göre önemli bir getiri sağladığı literatürde gösterilmiştir. Bu tez çalışmasının konusu olan çift tutuculu robotlu hücreler ve sade çevrimler daha önce hiç bir çalışmada birlikte ele alınmamıştır. Bu sebeple imalat teknolojilerindeki gelişmelere paralellik göstermesi açısından böyle bir çalışmanın yapılması önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Problem tanımlanması sırasında öncelikle sistemin yükleme, boşaltma, parça alma ve bırakma işlemleri sonucunda sistemin anlık görüntüsünü veren *durum* tanımı yapılmıştır. Durumlar ile çevrimler ifade edilerek sistemin olurluluk koşulları tanımlanmıştır. Ayrıca makine sayısının çok küçük olduğu durumlarda bile incelenecek sade çevrim sayısının yüksek olması sebebiyle etkin çevrimler tanımlanmış ve eniyi sade çevrimlerin etkin çevrimler arasında aranması gerektiğinin ispatı yapılmıştır. Böylece büyük bir sade çevrim sınıfından çok

sayıda çevrim elenerek hem analiz hem de hesaplama açısından büyük kolaylık sağlanmıştır. Ayrıca robotun makineler önünde yaptığı işlemleri (yükleme, boşaltma, parça alma ve parça bırakma) belirten aktivite tanımı yapılmıştır. Etkin çevrimlerin aktiviteler ile ifade edilebileceği gösterilerek, çevrim zamanı hesabı için aktiviteler arası mesafe matrisi tanımlanmıştır.

Sistemde iki makine olduğu durum detaylı incelenerek, eniyi olan 5 adet sade çevrim bulunmuş ve bu sade çevrimlerin eniyi oldukları aralıklar belirlenmiştir. Ayrıca bu çevrimleri tüm eniyilik bölgesini kapsadığı gösterilmiştir.

Son olarak 2 makine durumu için çift tutuculu robot kullanımının getirisi araştırılmıştır. Bu bölümde Gültekin vd. [24] tarafından yapılan çalışmadaki tek tutuculu sistemle kıyaslama yapılmıştır. Bu kıyaslama sonucunda C_4^2 sade çevriminin her durumda tek tutuculu 2 makineli robotlu hücrelerdeki sade çevrimlerin hepsinden her zaman iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Ayrıca ortalama getirinin ölçülebilmesi için deney yapılmış ve çift tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerin tek tutuculu sistemlerdekilere göre ortalamada %30 daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında çift tutuculu robotlu üretim hücrelerinde sade çevrimler ve etkilerinin araştırılması açısından önemli yol kat edilmiştir. Uygulamada çok sıklıkla karşılaşılan varsayımlar altında 2 makine durumunun incelenmesiyle birlikte sade çevrimler ve çift tutuculu sistemlerin birlikte ele alınmasının üretim hızı açısından çok iyi getiri sağladığı gösterilmiştir. Aynı zamanda çalışma kapsamında makine sayısının ikiden büyük olduğu durumlar için de önemli bir çerçeve oluşturularak gelecek çalışmalar için bir zemin hazırlanmıştır. Gültekin [24] tek tutuculu robotlu hücrelerde $(2m - 1)!$ adet sade çevrim olduğunu göstermiştir. Buna göre 2 makineli durumda 6 çevrim, 3 makineli durumda 120 ve 4 makineli durumda 5040 adet olurlu sade çevrim bulunabilmektedir. Çift tutuculu robotlu sistemlerde 2 makineli durumda 266 adet sade çevrim bulunmaktadır. Çevrim sayısının 2 makineli durumda bile bu denli yüksek olması ve tek tutuculu sistemlerde bile makine sayısı arttığında çevrim sayısının üssel bir şekilde artması çift tutuculu sistemlerde sade çevrimlerin analizinin son derece karmaşık olduğunu göstermektedir. Bu karmaşıklık gelecek çalışmalar için dikkate alındığında m makineli genel durum için kesin çözüm ortaya koyabilmek çok zor

olacaktır.

Bunun yanında bu tez çalışması kapsamında incelenen ve iyi sonuç verdiği gözlemlenen bazı çevrimlerin m makineli durum için genellemesi yapılarak, en kötü durum performansları incelenebilir. Burada karşılaşılabilecek başka bir durum ise 2 makine durumunda çevrimler için belirlenen alt sınır ifadesinin m makineli genel durum için geçerli olmamasıdır. Bu sebeple yeni alt sınırlar oluşturulmalı ve analiz bu yeni alt sınırlara göre yapılmalıdır. Ayrıca yapılabilecek gelecek çalışmalardan biri de sistem parametreleri üzerinden hassasiyet analizi yapılmasıdır. Buna göre iki tutuculu robotlu sistemlerde sistem parametrelerine göre robotlu hücrede bulunması gereken en büyük makine sayısının bulunması gibi çalışmalar yapılabilir. Ayrıca çift tutuculu sistemlerin tek tutucululu robotlu hücrelerden iyi sonuç verebilmesi için tutucu değiştirme zamanının (θ) alabileceği en büyük değeri bulabilmek için çalışmalar yapılabilir. Ayrıca farklı tip parçaların işlendiği sistemlerde de sade çevrimlerin performansının değerlendirildiği çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Crama, Y., Kats, V., Van de Klundert, J., Levner, E., Cyclic scheduling in robotic flowshops. *Annals of Operations Research*, **96**: 97-124, 2000.
- [2] Dawande, M., Geismar H.N., Sethi S., Sriskandarajah C., Sequencing and scheduling in robotic cells: recent developments. *Journal of Scheduling*, **8**: 387-426, 2005.
- [3] Dawande, M., Geismar H.N., Sethi S., Dominance of cyclic solutions and challenges in the scheduling of robotic cells. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, **47**: 709-721, 2005.
- [4] Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., Kubiak, W., Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **4**: 331-358, 1992.
- [5] Hall, N.G., Kamoun, H., Sriskandarajah, C., Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells. *Operations Research*, **45**, 421-439: 1997.
- [6] Crama, Y., Van de Klundert, J., Cyclic scheduling of identical parts in a robotic cell. *Operations Research*, **45**: 952-965, 1997.
- [7] Brauner, N., Finke, G., Cycles and permutations in robotic cells. *Mathematical and Computer Modeling*, **4**: 565-591 2001.
- [8] Geismar H.N., Dawande, M., Sriskandarajah C., Robotic cells with parallel machines: throughput maximization in constant travel-time cells. *Journal of Scheduling*, **7**: 375-395, 2004.

- [9] Steiner, G., Xue, Z., Scheduling in reentrant robotic cells: algorithms and complexity. *Journal of Scheduling*, **8**: 25-48, 2005.
- [10] Sethi, S.P., Sidney, J., Sriskandarajah, C., Scheduling in dual-gripper robotic cells for productivity gains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17** (3): 324-341, 2001.
- [11] Drobouchevitch, I., Sethi, S.P., Sriskandarajah, C., Scheduling dual-gripper robotic cell: 1-unit cycles. *European Journal of Operational Research*, **171** (2): 598–631, 2006.
- [12] Drobouchevitch, I., Sethi, S.P., Sidney, J.B., Sriskandarajah, C., A note on scheduling multiple parts in two-machine dual-gripper robot cells: heuristic algorithm and performance guarantee. *International Journal of Operations and Quantitative Management* , **10** (4): 297–314, 2004.
- [13] Sriskandarajah, C., Drobouchevitch, I., Sethi, S.P., Chandrasekaran, R., Scheduling multiple parts in a robotic cell served by a dual-gripper robot. *Operations Research* , **52** (1): 65-82, 2004.
- [14] Geismar H.N., Dawande, M., Sriskandarajah C., Throughput optimization in constant travel-time dual gripper robotic cells with parallel machines. *Production and Operations Management*, **15** (2): 311-328, 2006.
- [15] Faumani, M., Jenab, K., Cycle time analysis in reentrant robotic cells with swap ability. *International Journal of Production Research* , **50**: 6372–6387, 2012.
- [16] Sethi, A., Sethi, S., Flexibility in manufacturing: A survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **2**: 289-328, 1990.
- [17] Gerwin, D., Manufacturing dlexibility: A strategic perspective. *Management Science*, **39**,-: 395-410, 1993.
- [18] Groote, X., The flexiblity of production Process: A General Framework. *Management Science*, **40** (7): 933-945, 1994.

- [19] Gupta, Y.P., Gupta, M.C., Bector, C.R., A review of scheduling rules in flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **2** (6): 356-377, 1989.
- [20] Geismar, H.N., Sethi, S.P., Sidney, J.B., Sriskandarajah, C., A note on productivity gains in flexible robotic cells. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **17**: 5-21, 2005.
- [21] Akturk, M.S., Gultekin, H., Karasan, O.E., Robotic cell scheduling with operational flexibility. *Discrete Applied Mathematics*, **145** (3): 334-348, 2005.
- [22] Gultekin, H., Akturk, M.S., Karasan, O.E., Scheduling in a three-machine robotic flexible manufacturing cell. *Computers Operations Research*, **34**: 2463-2477, 2006.
- [23] Gultekin, H., Akturk, M.S., Karasan, O.E., Scheduling in robotic cells: process flexibility and cell layout. *International Journal of Production Research*, **46** (8): 2105-2121, 2008.
- [24] Gultekin, H., Akturk, M.S., Karasan, O.E., Pure cycles in flexible robotic cells. *Computers Operations Research*, **36**: 329-343, 2009.
- [25] Faumani, M., Jenab, K., Analysis of flexible robotic cells with improved pure cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **23** (3): 201-215, 2013.
- [26] Hall, N.G., Potts, C.N. , Sriskandarajah, C., Parallel machine scheduling with a common server. *Discrete Applied Mathematics*, **102**: 223-243, 2000.
- [27] Abdekhodae, A.H., Wirth, A., Gan, H.S., Equal processing and equal setup time cases of scheduling parallel machines with a single server. *Computers Operations Research*, **31**: 1867-1889, 2004.

EKLER

EK 1. $k=1$ durumu için çevrim zamanı karşılaştırmaları

Bu bölümde $I - I$ ile başlayan ve $D - D$ ile biten olurlu sade çevrimlerin çevrim zamanı ifadelerinin kıyaslaması yapılmıştır. Kıyaslamalar sonucunda sistem parametrelerin aldığı tüm değerlerde baskılanan çevrimler elde edilecektir.

- $I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$ (C_2^1) ile $I-I-L_1-L_2-U_2-U_1-D-D$ (C_2^6) karşılaştırması

$$T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\}$$

$$T_{C_2^6} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$

$$P \leq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq T_{C_2^6} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$

$$P \geq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 6\varepsilon + 7\delta + 2\theta + P \leq T_{C_2^6} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$
- $I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$ (C_2^1) ile $I-I-L_2-L_1-U_1-U_2-D-D$ (C_2^7) karşılaştırması

$$T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\}$$

$$T_{C_2^7} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$

$$P \leq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq T_{C_2^7} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$

$$P \geq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 6\varepsilon + 7\delta + 2\theta + P \leq T_{C_2^7} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + P$$
- $I-I-L_1-L_2-U_1-U_2-D-D$ (C_2^1) ile $I-I-L_2-U_2-L_1-U_1-D-D$ (C_2^8) karşılaştırması

$$T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + \max\{0, P - (2\varepsilon + \delta)\}$$

$$T_{C_2^8} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + 2P$$

$$P \leq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq T_{C_2^8} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + 2P$$

$$P \geq 2\varepsilon + \delta \text{ iken } T_{C_2^1} = 6\varepsilon + 7\delta + 2\theta + P \leq T_{C_2^8} = 8\varepsilon + 8\delta + 2\theta + 2P$$

Bu kıyaslamalar sonucunda tüm C_2^1 çevriminin yukarıda belirtilen C_2^6 , C_2^7 ve C_2^8 çevrimlerini baskıladığı gösterilmiştir. Böylece eniyi çevrimin aranma sürecinde dikkate alınmasına gerek kalmamıştır.

EK 2. Tek tutucu ve çift tutucu kıyaslaması için limit değerleri

Bu bölümde, Tablo 5.1'de bahsi geçen $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniye}}$ sütununda bulunan ifadelerin alabileceği en yüksek değerlerinin hesaplanması yapılmıştır. Bu ifadenin en yüksek değerinin hesaplanabilmesi için limitte payın yüksek değer, paydanın ise düşük değer alabilmesi ve sonuçta da en yüksek oranı bulmak gereklidir. Limit değerleri hesaplanırken limit ifadesini en yüksek değerini alabilmesi parametrelerin katsayı oranı en yüksek olanı tanımlandığı aralıkta alabileceği en yüksek değere götürülmüştür. Örnek olarak

$$\frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P}$$

denkleminde $(\varepsilon, \delta, \theta, P)$ değerlerine karşılık gelen katsayı oranları $(8/8, 12/6, 0/2, 0/2)$ şeklindedir. Bu oranların en büyüğü $12/6$ olduğu için δ parametresi alabileceği en yüksek değere götürülürken diğer parametreler alabilecekleri en düşük değere götürülerek limit değeri hesaplanır.

$0 \leq P \leq \delta$ durumunda eniyi çevrim C_1^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniye}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.1'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{T_{C_1^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 6\delta + 2\theta + 2P} = \frac{12}{6} = 2 \quad (\text{E.1})$$

$\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta$ durumunda eniyi çevrim C_2^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniye}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.2'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_2^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow \delta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 8\delta + 2\theta} = \frac{12}{8} = 3/2 \quad (\text{E.2})$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 2\delta + \theta$ durumunda eniyi çevrim C_2^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ 'dir.

O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.3'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_2^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow \varepsilon + 2\delta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P} = \frac{12}{8} = 3/2 \quad (E.3)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 2\varepsilon + 2\delta + \theta$ durumunda eniyi çevrim C_3^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 8\delta + 3\theta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.4'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_3^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow \varepsilon + 2\delta + \theta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 8\delta + 3\theta} = \frac{12}{8} = 3/2 \quad (E.4)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $2\varepsilon + 2\delta + \theta \leq P \leq 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta$ durumunda eniyi çevrim C_3^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.5'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_3^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 2\varepsilon + 2\delta + \theta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{6\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P} = \frac{12}{8} = 3/2 \quad (E.5)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $2\varepsilon + 4\delta - 2\theta \leq P \leq 4\varepsilon + 6\delta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 10\delta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.6'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 2\varepsilon + 4\delta - 2\theta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 10\delta} = \frac{12}{10} = 6/5 \quad (E.6)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $4\varepsilon + 6\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 10\delta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.7'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 4\varepsilon + 6\delta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{8\varepsilon + 10\delta} = \frac{12}{10} = 6/5 \quad (E.7)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{2}{3}\delta$ ve $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $3\varepsilon + 2\delta + P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.8'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 5\varepsilon + 8\delta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{3\varepsilon + 2\delta + P} = \frac{14}{10} = 7/5 \quad (\text{E.8})$$

$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ve $\varepsilon + 2\delta \leq P \leq \varepsilon + 4\delta - 2\theta$ durumunda eniyi çevrim C_2^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.9'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 2\delta/3 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_2^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 2\delta/3 \\ P \rightarrow \varepsilon + 2\delta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{7\varepsilon + 6\delta + 2\theta + P} = \frac{36}{28} = 9/7 \quad (\text{E.9})$$

$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ve $\varepsilon + 4\delta - 2\theta \leq P \leq 4\varepsilon + 6\delta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 10\delta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.10'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 2\delta/3 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 2\delta/3 \\ P \rightarrow \varepsilon + 4\delta - 2\theta}} \frac{8\varepsilon + 12\delta}{8\varepsilon + 10\delta} = \frac{12}{10} = 6/5 \quad (\text{E.10})$$

$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ve $4\varepsilon + 6\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 10\delta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.11'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 4\varepsilon + 6\delta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{8\varepsilon + 10\delta} = \frac{12}{10} = 6/5 \quad (\text{E.11})$$

$\frac{2}{3}\delta \leq \theta \leq \delta$ ve $5\varepsilon + 8\delta \leq P \leq 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta$ durumunda eniyi çevrim C_4^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $3\varepsilon + 2\delta + P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.12'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_4^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 5\varepsilon + 8\delta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{3\varepsilon + 2\delta + P} = \frac{14}{10} = 6/5 \quad (\text{E.12})$$

$5\varepsilon + 8\delta + 2\theta \leq P \leq 8\varepsilon + 10\delta + \theta$ durumunda eniyi çevrim C_5^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $8\varepsilon + 10\delta + 2\theta$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.13'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_5^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 5\varepsilon + 8\delta + 2\theta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{8\varepsilon + 10\delta + 2\theta} = \frac{14}{10} = 7/5 \quad (\text{E.13})$$

$8\varepsilon + 10\delta + \theta \leq P$ durumunda eniyi çevrim C_5^2 çevrimidir. Bu çevrimin çevrim zamanı P 'nin tanımlı olduğu aralıkta $2\varepsilon + \theta + P$ 'dir. O halde $\frac{AS_{tek}}{Z_{eniyi}}$ ifadesinin alabileceği en büyük değer Denklem E.14'de verilmiştir.

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 0}} \frac{AS_{tek}}{T_{C_5^2}} = \lim_{\substack{\delta \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow 0 \\ P \rightarrow 8\varepsilon + 10\delta + \theta}} \frac{4\varepsilon + 6\delta + P}{2\varepsilon + \theta + P} = \frac{16}{10} = 8/5 \quad (\text{E.14})$$

EK 3. Tek tutuculu ve iki makineli sistemlerde sade çevrimler

Gultekin vd. [23] tarafından yapılan çalışmada ele alınan 2 makineli ve tek tutuculu sistemlerdeki sade çevrimlerin çevrim zamanı ifadeleri Tablo E.1'da sunulmuştur.

Tablo E.1: Tek tutuculu ve 2 makineli sistemlerdeki sade çevrimler ve çevrim zamanları

Aktivite Dizisi	Çevrim zamanı
$L_1 - L_2 - U_1 - U_2$	$8\varepsilon + 12\delta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 4\delta)\}$
$L_1 - U_1 - L_2 - U_2$	$8\varepsilon + 12\delta + 2P$
$L_1 - U_2 - U_1 - L_2$	$8\varepsilon + 12\delta + \max\{0, P - (2\varepsilon + 4\delta)\}$
$L_1 - L_2 - U_2 - U_1$	$8\varepsilon + 12\delta + P$
$L_1 - U_1 - U_2 - L_2$	$8\varepsilon + 12\delta + P$
$L_1 - U_2 - L_2 - U_1$	$8\varepsilon + 14\delta + \max\{0, P - (4\varepsilon + 8\delta)\}$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : DALGIÇ, Özden Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 08.03.1988 Bartın
Medeni hali : Bekar
Telefon : +90507 468 1614
e-mail : oodalgic@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
İspanyolca (Temel Seviye)

Yayınlar

Babat, O., Bayrakci., E., Dalgic, O.O, Taskincan, A., Yuksel, S., Altin Kayhan, A. Gultekin, H., “Atatürk Hava Limanı dış hatlar terminalinde kontuar atamaları için karar destek sistemi geliştirilmesi”. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 22(3): 2-21, 2011

Dalgic, O.O, Secerdin, Y., Nemutlu, G.S., Fescioglu Unver, N., “Analysis of

Airport Check-in Counter Allocation Policies Using Simulation", MAS 2012, The 11th International Conference on Modelling and Applied Simulation, Vienna, Austria, September 19-21, 2012

Dalgic, O.O, Gultekin , H., Akturk, M.S., "Pure cycles in dual gripper robotic cells", Euro 2013, 26TH European Conference on Operational Research , Rome, Italy, July 1-4, 2012

Gultekin, H., Dag, H., Dalgic, O.O., Throughput Optimization in Flow Shops with 2-nondentical Machines and Flexible Operations, ECCO 24, 24th European Conference on Combinatorial Optimization, Amsterdam, Netherland, May 30-June 1, 2011