
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ESNEK ROBOTİK HÜCRELERDE HIZ DEĞİŞTİRME FAALİYETLİ PARALEL MAKİNE ÇİZELGELEME

İlayda BATTI PARLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

İlayda BATTI PARLAR

23/08/2024

ESNEK ROBOTİK HÜCRELERDE HIZ DEĞİŞTİRME
FAALİYETLİ PARALEL MAKİNE ÇİZELGELEME
(Yüksek Lisans Tezi)

İlayda BATTI PARLAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Bu çalışmada, esnek robotik hücrelerde hız değiştirme faaliyetli paralel özdeş makinelerdeki çizelgeleme problemi üzerinde çalışılmıştır. Uygulamada, makinelerin hız performansları yıllar içinde kullanıldıkça düşmektedir. Dolayısıyla, makineler periyodik olarak bakıma alınmakta ve makinelere performans arttırıcı revizeler yapılmaktadır. Yapılan bu performans arttırıcı işlemler literatürde Hız Değiştirme Faaliyeti olarak adlandırılır. Makinelere atanan parçaların işlem süreleri, ilgili parçanın Hız Değiştirme Faaliyeti öncesi veya sonrasına atanma durumuna göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, Hız Değiştirme Faaliyetinin uygulanacağı pozisyon çözüm kalitesini etkilemektedir. Bu çalışmada, özdeş paralel makineli esnek robotik hücrelerde Hız Değiştirme Faaliyeti pozisyonuna karar veren, aynı zamanda gezgin satıcı problemi tabanında robot rotasını optimize eden; parça atama sırasını belirlemenin yanında makinelerde ve robotta bekleme sürelerini gözeten karmaşık tam sayılı programlama tipinde bir matematiksel model kurulmuştur. Matematiksel model ile küçük çapta problemler için çözümler elde edilmiştir fakat problem yapısı büyüdükçe çözüm süresi üssel olarak artmış ve model, çözüm zamanı açısından yetersiz kalmıştır. Matematiksel modelin yetersiz kaldığı bu noktada sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Sezgisel algoritma ile çok daha büyük çapta problemlerde Hız Değiştirme Faaliyeti pozisyonu, robot rotası, makinelerdeki beklemeler ve parça atama sırası belirlenmiştir. Sezgisel model çözüm sonuçları ile deney tasarımı yapılmış; bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleriyle ilişkileri incelenmiştir.

Bilim Kodu	:	90631
Anahtar Kelimeler	:	Çizelgeleme, paralel, robotik, hız değiştirme faaliyeti, toplam tamamlanma zamanını en küçükleme
Sayfa Adedi	:	56
Danışman	:	Doç. Dr. Gül Didem BATUR SİR

SCHEDULING PARALLEL MACHINES WITH RATE MODIFYING ACTIVITY IN FLEXIBLE ROBOTIC CELLS

(M. Sc. Thesis)

İlayda BATTI PARLAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

In this study, Parallel machine scheduling with Rate Modifying Activity (RMA) in flexible robotic cells is focused on. In practice, the speed performance of machines is decreasing in the years which have been operated. Therefore, machines are maintained periodically and made revisions in order to increase their performance. These maintaining activities are named as RMA in literature. Process time of the goods that assigned to the machines, varies depending on the position which is before or after RMA position. Consequently, RMA position affects the quality of the solution. A new mathematical modal which decides RMA position, optimizes the robot routes according to TSP approach, determines prioritization of the job assignments and minimizes the wait and block times in flexible robotic cells has been developed in MIP type. This mathematical modal has solved small-sized problems but when it is big-sized, the modal has been insufficient because solution time increased exponentially. At this point, a new heuristic algorithm has been developed. Therefore, with the heuristic modal, RMA position, job orders, robot routes and wait, block times has been obtained in big-sized problems. With the results of heuristic modal, experimental design has been performed. Dependent and independent variables relations are investigated.

Science Code : 90631
Key Words : Scheduling, Parallel Machines, Rate-Modifying Activity, Robotic Cells
Page Number : 56
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gül Didem BATUR SİR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı yaparken hiçbir desteğini esirgemeyen, yüksek motivasyon sağlayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Gül Didem BATUR SİR'e, tüm şartlara rağmen her zaman destekleyen eşim Onur PARLAR'a, beni her zaman sabır ve anlayış ile karşılayan sevgili kızım Işıl Ada PARLAR'a ve yıllar boyu yanımda olan, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, annem Tülay BATTI, babam Dursun BATTI'ya minnettarlığımı karşılamaya yetmeyecek sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER……. vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ x

HARİTALARIN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ. 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. PROBLEMİN TANIMI, ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL . 9

3.1. Problemin Tanımı 9

3.2. Önerilen Matematiksel Model 10

3.3. Örnek Problem Çözümü 15

3.3.1 Çözümün düğüm diyagramı 15

4. ÖNERİLEN SEZGİSEL MODEL 19

4.1. Sezgisel Algoritma Adımları 20

4.1. Sezgisel Model Örnek Çözümü 23

5. DENEY TASARIMI 25

6. SONUÇLAR 37

KAYNAKLAR 39

Sayfa

EKLER 41

EK-1. Parça işlem süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları…..... 42

EK-2. HDF oranına göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları…. 43

EK-3. HDF süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları…. 44

EK-4. Robot taşıma süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları…..... 45

EK-5. Robot alma-bırakma süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları…. 46

EK-6. Parça adedine göre Mann-Whitney U deney sonuçları…..... 47

EK-7. Parça işlem süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları…..... 48

EK-8. HDF oranına göre Mann-Whitney U deney sonuçları…. 49

EK-9. HDF süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları…..... 50

EK-10. Robot taşıma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları…..... 51

EK-11. Robot alma-bırakma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları…..... 52

Ek-12. Literatür araştırması..... 53

EK-13. Deney tasarımı sonucu…..... 54

EK-14. Faktör düzeylerine göre deney tasarımı sonucu…..... 55

ÖZGEÇMİŞ…..... 56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Örnek problem çözümü için parametreler..... 24

Çizelge 5.1. Belirlenen faktör düzeyleri 29

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. HDF uygulanacak robotik hücre yapısı 10

Şekil 3.2. k ve k' notasyonları ilişkisi 11

Şekil 3.3. İstasyon makine ilişkisi 12

Şekil 3.4. Örnek problem çözümü düğüm diyagramı 16

Şekil 3.5. Örnek problem çözümünün Gantt Şeması 17

Şekil 4.1. Belirli bir pozisyona HDF uygulayan program 20

Şekil 4.2. Sezgisel algoritma çözümü Gantt Şeması 23

Şekil 5.1. Normal dağılım kontrolü analiz özeti 26

Şekil 5.2. Değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerleri 27

Şekil 5.3. GAP % bağımlı değişkenine ait histogram grafiği 28

Şekil 5.4. Çözüm süresi bağımlı değişkenine ait histogram grafiği 29

Şekil 5.5. GAP% bağımlı değişkenine ait Q-Q Plot grafiği 29

Şekil 5.6. Çözüm süresi bağımlı değişkenine ait Q-Q Plot grafiği 30

Şekil 5.7. Parça adet sınıfına özgü genel istatistik bilgileri 31

Şekil 5.8. Parça adet düzeylerinin örneklem sayıları ve ortalama sıra değerleri 31

Şekil 5.9. Parça adet düzeylerinin çözüm süresi ve GAP% etkisi 32

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Asymp. Sig.	Asymptotic Significance
GAMS	The General Algebraic Modeling System
HDF	Hız Değiştirme Faaliyeti
MIP	Mixed Integer Programing
NP	Non-deterministic

1. GİRİŞ

Çağımız Endüstri 5.0 dönemine hazırlanırken verilerin önemi, dijitalleşme, izlenebilirlik, karbon ayak izi azaltma, Avrupa Birliği Yeşil Mutabakat hedefleri giderek önemini artırmaktadır. Firmalar kendi Dijital Dönüşüm ve İzlenebilirlik yol haritalarını oluşturmakta, karbon emisyon oranlarını azaltmak üzere hedefler koymakta ve bu hedeflere yönelik planlar yapmaktadır. Bahsedilen bu hedefler ise otonom sistemlerden geçmekte ve fabrikalarda akıllı otomasyon sistemleri çağın gerisinde kalmamak için mecburiyet haline gelmiştir. Tüm dünyada otonom sistemler ve robotik yapılar konusunda çok hızlı yol katedilmektedir. Yoğun iş gücü gerektiren rutin işler artık insanların ilgi alanından çıkmış ve robotlara devredilmektedir. Zamanla tüm fiziksel güç gerektiren, rutin işler robotlara devredilecektir. Taşıma işlemleri ise emek yoğun işlemler olup robotlara devredilmesi hem üretimde verimlilik açısından katma değeri yüksek olmakta hem de çalışanların rutin işler değil yorumlayıcı işlere odaklanmalarını sağlamaktadır. Böylece fabrika işgücü verimliliği sağlanırken aynı zamanda katma değeri yüksek hedefler konusunda düşünmek ve yorumlamaya da fırsat sunulmaktadır.

Esnek Robotik hücreler otonom fabrika sistemlerinin en temel parçaları konumundadır. Robotik hücreler imalat sistemlerinde anlık veri toplayabilmekte ve izlenebilirlik konusunda yüksek avantajlar sağlamaktadır. Toplanan veriler, büyük veri analitiği ve yapay zeka ile analiz edilerek, gelecekteki süreç optimizasyonları ve karar destek sistemleri için kullanılabilir. Bu durum üretim süreçlerinde verimlilik artırma konusunda olanaklar sağlamaktadır. Robotik hücreler, üretim hatlarında görevleri otomatikleştirerek daha hızlı ve sürekli çalışma sağlamaktadır. Robotlar, insan sağlığına zararlı olabilecek tehlikeli ortamlarda (örneğin, yüksek sıcaklık, toksik kimyasallar) çalışabilir. Bu, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını azaltır. Ağır malzemeleri taşıma, tekrarlayan rutin hareketler ve ergonomik olmayan pozisyonlar gibi ergonomik riskler robotlar tarafından üstlenilir; böylece çalışanların fiziksel sağlığı korunur. Uzun vadede, robotik hücreler insan işçiliğine kıyasla daha düşük maliyetli olabilir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olsa bile yıllar içinde amorti edebilmektedir. Ayrıca, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sayesinde, malzeme israfı ve hata oranları azalır; bu durum da genel üretim maliyetlerini düşürmektedir. Bu nedenlerle, robotik hücreler modern üretim ve endüstriyel süreçlerde vazgeçilmez bir hale gelmiştir ve gelecekteki teknolojik gelişmelerle birlikte önemleri daha da artacaktır.

Robotlar ile beslenen paralel makine sistemleri üzerinde çizelgeleme optimizasyonunu içeren algoritmalara modern fabrikalarda ülkemizde ve dünyada gün geçtikçe ihtiyaç artmaktadır. İnsanların yerini alacak robotlar ile beslenen üretim hatlarında robot-makine senkronizasyonunu sağlayan, robotların bekleme sürelerini ve makinelerde oluşan blok zamanlarını dikkate alan, aynı zamanda makine hız performansını gözeterek optimum verimliliği elde etmek üzere geliştirilen sezgisel modeller gün geçtikçe önem arz kazanmaktadır.

Günümüzde fabrikalar rutin işleri robotlara devrederken aynı zamanda artan ürün çeşitliliği ve değişen müşteri taleplerine de en kısa sürede cevap verebilmek için yeni stratejiler geliştirmektedir. Bir firmanın uzun vadede ayakta kalabilmesi değişen talepleri karşılayabilecek esneklikte olmasına bağlıdır. Değişen müşteri talepleri özellikle kişiye özel tasarlanmış, kısa yaşam döngülerine sahip ve sık sık yeni modelleri piyasaya sürülen ürünler; örneğin, akıllı telefonlar ve moda ürünleri, satış trendleri dalgalı ürünlerden oluşmaktadır. Fabrikalar bu değişime uyum sağlamak için modüler üretim sistemleri ve esnek üretim hatları kurmaya, otomasyon ve çizelgeleme yöntemleri ile esneklik yeteneklerini geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır.

Paralel makine kullanımı; üretim ve hizmet sektöründe kaynakların verimli kullanılmasını sağlayan, süreçleri optimize eden etkili bir araçtır. İşgücü ve ekipmandan maksimum yararlanmayı sağlarken makinelerde meydana gelen beklemeleri azaltır ve kapasiteyi artırır. Parçaların dengeli şekilde makinelere atanması ile işlerin maksimum veya toplam tamamlanma zamanı minimize edilir. Doğru çizelgeleme sayesinde müşteri talepleri değiştiğinde hızlı şekilde uyum sağlanır, üretimde esneklik kazanılır. Fabrikada farklı tip ürünlerin aynı anda üretilebilme yeteneğini artırır. Günümüzde sipariş odaklı üretim modelleri geliştikçe değişime hızlı adaptasyon sağlama önemini artırmaktadır. Çizelgeleme işlemleri; makinelere dengeli iş yüklemesi yapar ve makinelerde aşırı kullanımdan kaynaklanan arızaların oluşmasını önler. Bakım maliyetini düşürür. Dengeli iş yükü fabrikalarda enerji tüketimini azaltır, maliyet avantajı sağlar. Makine çizelgeleme üretim süreç optimizasyonu ile daha kısa sürede daha kaliteli ürün üretmeyi sağladığı için müşteri memnuniyeti ve firmalara rekabet avantajı kazandırır. Uygun çizelgeleme sayesinde standartlaştırılan üretim fabrikalara kalite ve tutarlılık sağlar, üretimden kaliteli ve detaylı veri toplanmasına olanak sağlar, bu veriler firma kapasitesi ve stratejik planları için temel oluşturur.

Kaynakların optimal kullanımı sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlarken, atıklar konusunda da verimlilik sağlar. Paralel makine çizelgeleme, işletmelerin kaynaklarını en verimli şekilde kullanmalarına, üretim süreçlerini optimize etmelerine ve rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olmaktadır.

Makinelerde bakım faaliyetleri, endüstriyel süreçlerin ve üretim hatlarının etkin ve verimli bir şekilde işlemesi için kritik öneme sahiptir. Operasyon sürekliliği ve makinelerde performans kaybı yaşamamak için, ve makinelerde arızaların meydana gelmeden önce tespit edilmesi, önlenmesi noktasında ani duruş ve verim kaybını önlemek amacıyla planlı bakım faaliyetleri önem arz etmektedir. Aynı zamanda bakım ile makinelerin yenilenme ihtiyacı ertelenebilir, böylece fabrika yatırım maliyetleri de düşer. Düzenli bakım faaliyetleri makinelerin optimal senkronizasyonda çalışmasını sağlar, bu durum ise kalite problemlerinin minimize edilmesini ve ürün kalitesinin artırılmasını sağlar. Düzenli bakıma alınmamış makinelerde iş güvenliği riski daha fazladır. Dolayısıyla bakımı yapılmış makinelerin çalıştığı fabrika ortamları çalışanlar için daha güvenli ortamlardır. Planlı bakım makinelerde enerji verimliliğini artırmaktadır, bakımlı makineler çalışırken daha az enerji tüketirler. Bakım faaliyetleri fabrika enerji maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlar. Bakım ile atık miktarı ve çevresel emisyonlar azalmaktadır, israf önlenmekte ve sürdürülebilir üretime katkı sağlanmaktadır. Bakım faaliyetleri uluslararası kalite standartlarına uyum sağlanmasını destekler nitelikte olup firmaların itibarını artırır, rekabet avantajı sağlar. Fabrikalardaki bakım faaliyetleri hem ekipman, makine ömrünü uzatırken hem de makinelerde hız performansını artırıcı etki göstermektedir. Bakımlı makineler, daha hızlı ve etkin çalışarak üretim hızını artırır ve teslimat sürelerini kısaltır, üretim kapasitesini artırırken işletme verimliliğine de pozitif katkı sağlamaktadır.

Hız Değiştirme Faaliyetleri (HDF), makinelerin yıllar içinde arızalanması, duruşa geçmesi sonucunda veya her yıl periyodik olarak yapılan makinede işlem hızını artırıcı etkisi olan bakım kapsamındaki işlerdir. Makine, bakım faaliyeti için belli bir süre durdurulur; bakım işleri bittikten sonra parçalar işlem süreleri belli oranda kısaltılmış şekilde makineye tekrar atanır. Bu problem kapsamında, HDF pozisyonu bir başka deyişle makinenin durdurulacağı periyot belirlenir ve HDF oranı ile de yeni işlem süreleri hesaplanarak parçaların ataması yapılır. Sonuçta duruş süresi karşılığında kısaltılan işlem süreleri ile daha verimli çizelgeleme sonuçları elde edilmesi amaçlanır. HDF sonrası işlem süreleri "parçanın işlem süresi*HDF oranı" formülü ile hesaplanır. Çizelgeleme problemleri NP-Hard tipi

problemlerdir Liu and Sanlaville (1995). Bu bağlamda, robotik hücrelerde HDF pozisyonu tespiti ile çizelgeleme problemi de NP-hard tipi problem sınıfındadır.

Paralel özdeş makineli esnek robotik hücrelerde HDF uygulamanın önemi ve avantajları doğrultusunda, literatürde daha önce ele alınmamış bu probleme yönelik olarak bir matematiksel model ve büyük boyutlu problemlerde kullanılmak üzere bir sezgisel algoritma geliştirilerek robotik hücrelerde çevrim süresinin düşürülmesi ve verimliliğin arttırılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Paralel makine çizelgeleme, robotik hücreler ve hız değiştirici faaliyetler kapsamında literatür tarandığında aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

İlk olarak, paralel makine çizelgeleme ile ilgili çalışmalara bakıldığında; problemin bir dizi iş parçasının bir dizi makineye atama sırasını belirleyen ve atanmasını sağlayan bir optimizasyon problemi olarak ele alındığı görülmektedir. Paralel makine çizelgelemede iş sayısı, makine sayısı, parça süresi, parça işlemi başlama zamanı, bitme zamanı, parça sürelerinin belirtilen zamandan erken veya geç bitmesi problemin parametreleri arasındadır. Problemin amaç fonksiyonu ise tüm işlerin tamamlanma süresinin en kısa olması, tüm işlerin tamamlanma sürelerinin toplamının minimize edilmesi, işlerin teslim tarihine göre gecikmelerinin toplamının minimize edilmesi veya işlerin erken veya geç tamamlanması durumunda uygulanan cezaların toplamının minimize edilmesidir. Lu ve Gwo-Ji (2008), n adet bağımsız işin, m adet özdeş paralel makine üzerinde çizelgelenmesi problemine özgü ikili arama algoritması geliştirmişlerdir. Tatiana, Yuriy ve diğerleri (2017), örnek bir uygulama üzerinde bağımsız paralel makine çizelgeleme problemi için sezgisel model geliştirmişler ve çözüm performansını raporlamışlardır. Paralel makine çizelgeleme çözüm yaklaşımlarında Tavlama Benzetimi, Genetik Algoritma, Tabu Arama Algoritması ve benzeri metasezgisel yöntemler büyük ölçekli problemler için uygulanır, her zaman optimum sonucu vermez. Küçük ölçekli problemler için kesin çözümler sunan tam sayılı programlama modelleri kullanılmaktadır. Hızlı ve kabul edilebilir çözümler elde etmek için sezgisel yöntemler kullanılırken özellikle belirli koşullar altında optimizasyon yapılması gerekiyorsa Dinamik Programlama ve Dal- Sınır Algoritmaları daha uygun çözümler sunar. Rooyani ve Fantahun, (2019), Esnek atölye tipi üretim sisteminde önce iş sıralaması elde eden sonrasında makine doluluk ve işlerin tamamlanma zamanlarını dikkate alan Genetik Algoritma tabanlı iki aşamalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Maecker, Shen ve Mönch (2023), işlemlerin belli makinelerde işlenme kısıtını içeren paralel makine çizelgeleme problemine Genetik Algoritma tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirmişler ve diğer meta sezgisel yöntemler ile karşılaştırmalı deney tasarımı yapmışlardır.

Literatürdeki makine bakımı üzerine yapılan çalışmalar, makinelerin periyodik bakımı ve arızalar sonucunda yapılan iyileştirici faaliyetleri içermektedir. Bakım faaliyetlerini

uygulayabilmek için makineyi belirli bir süre durdurmak gerekir, makine performansından elde edilen kazanç, HDF duruş süresince gerçekleşen üretim kaybından daha yüksektir. Chou-Jung, T.C.E. ve Dar-Li (2011), bağımsız paralel makinelerde hız değiştirici faaliyet uygulamışlar, hız değiştirme oranlarını 0-1 arasında olacak şekilde deney tasarımı yapmışlardır. HDF oranlarının çözüm süresine etkilerini raporlamışlardır. Li, Bin ve Lei (2021), paralel makine çizelgeleme problemi üzerinde HDF uygulamışlar, toplam tamamlanma zamanı, geciken işlerde ortalama gecikme miktarlarını, sapmalarını ve makine kullanım verimlilik değerlerini incelemişlerdir.

Mosheiv ve Oron (2021), tek makine üzerinde HDF uygulama problemini incelemişler ve probleme özgü dinamik programlama yapısı içeren bir algoritma geliştirerek büyük problemler üzerinde deney tasarımı yapmışlardır. Makalede iyileşme oranını 0,3 olarak belirlemişlerdir. HDF süresini ise en uzun işlem süresine eşit ve 2 katı olacak şekilde denemeler yapmışlardır. Hyunjoon ve Byung-In (2022), tek makineli sistemde işlem öncelikleri sağlanırken HDF pozisyonunu belirleme optimizasyonu yapan bir model geliştirdiler. Phosavanh, Oron (2024), tek makine üzerinde çizelgeleme yaparken HDF pozisyonuna karar veren algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmada toplam tamamlanma zamanı, geciken işlerin sayısı ve toplam geciken işlem sürelerini dikkate almışlardır. Deney tasarımı ile elde ettikleri sonuçları raporlamışlardır. Urbani, Brunelli ve Punkka (2023), makinelere bakım planlama geliştirirken düğüm yapısını kullanmışlar, işlerin gecikmesi ve makine duruşlarını dikkate alan optimizasyon modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada ilgili probleme yönelik matematiksel model geliştirilirken, literatürde bulunan Gezgin Satıcı Problemi (GSP) yapısından yararlanılmıştır. GSP probleminde bir satıcının belirli bir başlangıç noktasından başlayarak tüm şehirleri (veya düğümleri) tam olarak bir kez ziyaret edip tekrar başlangıç noktasına döndüğü en kısa yolu bulma problemidir. GSP, kombinatoryal optimizasyon problemlerinin klasik ve önemli bir örneğidir. Kısıtları ise her şehir bir kez ziyaret edilir, tüm şehirlerin ziyaret edilmesi gerekir. Tur başlangıç noktasına gelindiğinde aynı noktada son bulur. Amaç fonksiyonu, satıcının tüm şehirleri ziyaret edip başlangıç noktasına dönmesi için kat etmesi gereken toplam mesafeyi veya maliyeti minimize etmektir. NP-hard problemler sınıfına aittir. Batur, Karasan ve Aktürk (2012), robotik hücrelerde robot gecikmelerini minimize eden paralel makineli çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Robot hareketlerini gezgin satıcı problemi tabanında inceleyerek robot rotasını optimize eden ve makine blok zamanlarını minimize eden bir

matematiksel model ve sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Atabak ve Topaloğlu (2017), robotik hücre çizelgeleme problemini incelemişler, robotlar ile beslenen makinelerde işlem atamalarını optimize etmişlerdir. Karınca Kolonisi algoritması tabanlı yeni bir model önermişlerdir. Modelde, robot hareketleri ve işlem atamalarını optimize ederek robotik hücrelerde verimlilik artışı sağlamışlardır. Soroush Fatemi ve diğerleri (2023), U şeklinde robotik bir hücrede birden fazla robotik kollar yardımı ile makinelerin beslendiği ve robotların erişebildiği makinelerin dinamik şekilde çizelgelenmesini içeren bir karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli geliştirmişlerdir.

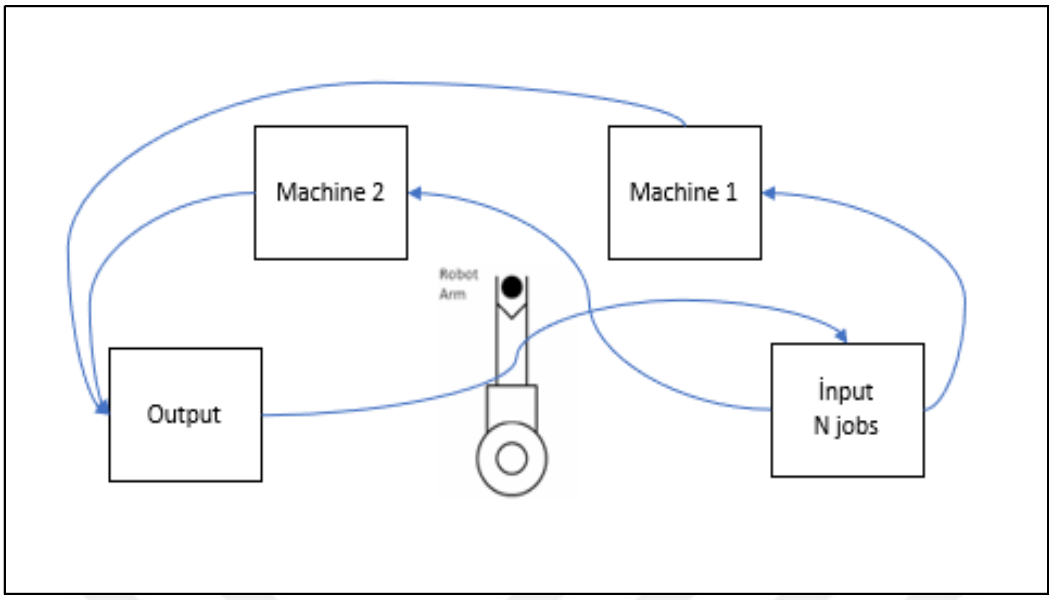
3. PROBLEMİN TANIMI, ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde esnek robotik hücrelerde çalışan paralel özdeş makineler üzerinde HDF pozisyonu belirleyen çizelgeleme problemine yönelik geliştirilmiş matematiksel model tanımlanacaktır. Önerilen matematiksel modelin veri setleri, parametreleri, değişkenleri ve amaç fonksiyonu hakkında detaylı bilgi verilecektir.

3.1. Problemin Tanımı

Paralel makine çizelgeleme problemi m adet makine ve n adet parçanın olduğu ve parçaların atama sıralamasını, atanacağı makineyi seçen bir optimizasyon problemidir. Makine bekleme süresi, parça teslim süresi, gecikme zamanları ve parçaların maksimum tamamlanma zamanları çizelgeleme problemlerinde dikkate alınır. Robotik hücreler, içerisinde m adet makine, n adet parçanın bulunduğu ve makinelerin bir robot tarafından beslendiği çalışma sistemleridir. Robotik hücrelerde makine bekleme süresi, robot bekleme süresi, robot rotası ve parçaların teslim süresi, hazırlık süresi ve parça işlem süreleri temel değişkenler ve parametrelerdir.

Paralel makineli esnek robotik hücrelerde, robot özdeş makineleri beslemektedir. Robot bir makineyi besledikten sonra diğer makine dolu ise işlenmiş parçayı almak ve çıkış istasyonuna bırakmak üzere diğer makineye gitmektedir. Parça süresi henüz bitmemiş ise robot, ilgili parçanın işlem süresinin bitmesini beklemektedir. Ürünü alıp çıkış istasyonuna bıraktığında giriş istasyonuna giderek yeni bir parça alır ve boş makineye yükleme işlemini yapar. Robotun parçayı makineye yüklemek üzere aldığı anda makinelerin dolu olup olmadığı kontrol edilir, tüm makineler dolu ise hangi makinedeki parçanın süresinin daha erken biteceği kontrol edilir. Alınan veriye göre robotun rotası belirlenir.



Şekil 3.1. HDF uygulanacak robotik hücre yapısı

Bu çalışmada Şekil 3.1'de iki makineli bir örneği gösterilen paralel özdeş makineli ve HDF içeren robotik hücrelerdeki çizelgeleme probleminin çözümü amaçlanmıştır. Makinelere atanacak parça sıraları belirlenirken, robot için optimum rota belirlenecek aynı zamanda HDF için uygun pozisyon tespit edilecektir. HDF sonrası atanacak parçaların işlem süreleri, belirlenen hız değiştirme oranı ile çarpılarak hesaplanmaktır.

3.2. Önerilen Matematiksel Model

Probleme özgü matematiksel model geliştirilirken Aktürk, Batur Sir ve Karasan (2012) tarafından geliştirilen matematiksel model incelenmiş ve önerilen matematiksel modele yeni kısıtlar eklenerek literatüre yeni bir HDF uygulama yaklaşımı kazandırılmıştır.

Varsayımlar

- Tüm parçalar planlama dönemi başında (t=0) hazırdır,
- Bir makine aynı anda tek parça işleyebilir,
- Makineler her zaman hazırdır,
- Parçalar bölünemez,
- Hazırlık zamanları işlem süresinin içine dâhil edilmiştir ve parçalar sırasından bağımsızdır,
-HDF süresi, hız değiştirme oranı ve işlem süreleri deterministiktir ve kesin olarak bilinmektedir.

Açıklamalar

N düğümler kümesi,
N= { i_k : i=1,..,n, k = 1,…,m+2 }

A ark kümesi,

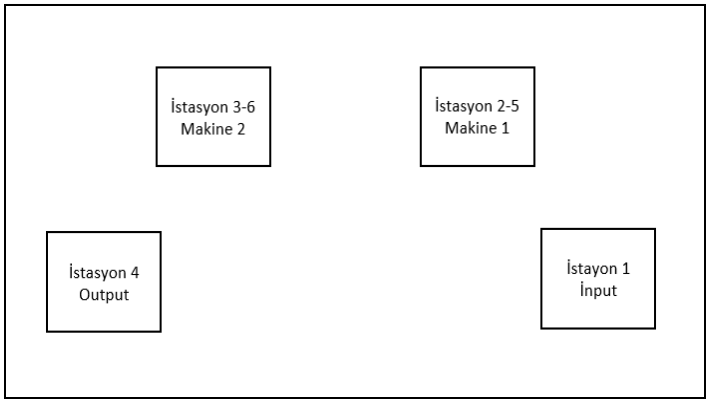
A= {($i_{k,}$ j_l): ϵ N i. parça k. istasyonda iken ve j. parça l. istasyonda iken i_k düğümünden j_l düğümüne gitmek mümkündür.}

Bu çalışmada *k'* notasyonu k istasyonunun kopyası olarak kullanılacaktır.

k	k'
2	5
3	6
5	2
6	3

Şekil 3.2. k ve k' notasyonları ilişkisi

İstasyon makine ilişkisi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İstasyon makine ilişkisi

Veri setleri

i,j: İşlemler (1,..,n)

k,l: İstasyonlar (1,..,m+2)

Parametreler

n: Atanacak parça sayısı

h: Robot taşıma süresi

a: Robot alma-bırakma süresi

p_i: i. parçanın süresi

co_{i_k,j_l}: Robotun k. İstasyona i parçasını yükledikten sonra j parçasını almak üzere l. istasyona gitmesi için gereken süre

M: Büyük bir sayı

R: HDF süresi

δ: Hız değiştirme oranı

Karar Değişkenleri

x_{i_k,j_l}: $\begin{cases} 1, i_k \text{ düğümünden } j_l \text{ düğümüne gidilirse}, \ i = 1,..,n; \ j = 1,..n,; \\ k = 2,5,3,6; l = 2,5,3,6 \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

d_{i_k}: $\begin{cases} 1, i. \text{parçanın bulunğu } k. \text{istasyon meşgul ise}, \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

r_{i_k}: $\begin{cases} 1, \text{HDF posiyonu } i_k \text{ ise } i = 1,..,\text{n}, k = 2,5,3,6; \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

z_k: $\begin{cases} 1, \text{k. istasyona HDF uygulandı ise}, k = 2,5,3,6; \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

a_{j_l}: $\begin{cases} 1, \text{j. Parça l. istasyona atandı ise}, j = 1,..,\text{n } l = 2,5,3,6; \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

w_{i_k,j_l}: $\begin{cases} 1, \ i_k \text{ düğümünden } j_l \text{ düğümüne geçme hareketi için bekleme var ise}, \\ 0, \text{diğer durum} \end{cases}$

co_{i_k,j_l}: i_k düğümünden j_l düğümüne gitme maliyeti

p_{i_k}: i. parçanın k. istasyondaki işlem süresi

s_{i_k}: i. parçanın k. istasyona yüklendiği zaman

c_{i_k}: i_k düğümünde robotun aktivitesini tamamlandığı zaman

md_{i_k}: i_k düğümünde HDF tamamlanma zamanı

b_{i_k}: Robotun i_k düğümünde bekleme süresi

C : tamamlanma zamanı

Kısıtlar

$$\sum_{j_l:(i_k,j_l)\epsilon\, A}^{n} x_{i_k,j_l} = \sum_{j_l:(j_l,i_k)\epsilon\, A}^{n} x_{j_l,i_k}\,, \quad \forall\, i_k \epsilon\ N. \tag{3.1}$$

$$\sum_{j_l:(j_l,i_k)\epsilon\, A}^{n} x_{j_l,i_k} \leq 1, \qquad \forall\, i_k \epsilon\ N. \tag{3.2}$$

$$\sum_{i_k:(j_l,i_k)\epsilon\, A}^{n} x_{j_l,i_k} \leq 1, \qquad \forall\, j_l \epsilon\ N. \tag{3.3}$$

$$\sum_{j_l:(i_1,j_l)\epsilon\, A}^{n} x_{i_1,j_l} = 1, \qquad \forall\, i \epsilon\ N. \tag{3.4}$$

$$\sum_{j_l:(j_l,i_4)\epsilon\, A}^{n} x_{j_l,i_4} = 1, \qquad \forall\, i \epsilon\ N. \tag{3.5}$$

$$c_{j_l} \geq c_{i_k} + \ co_{i_k,j_l} * x_{i_k,j_l} - M\left(1 - x_{i_k,j_l}\right) + \tag{3.6}$$
$$w_{i_k,j_l} * b_{i_k}, \qquad \forall\, i_k, j_l.$$

$$p_{i_2} = \ p_{i_5} \quad ve \quad p_{i_3} = \ p_{i_6}, \qquad \forall\, i\ \epsilon N. \tag{3.7}$$

$$s_{i_k} = \ s_{i_{k'}}, \qquad k\,\epsilon\{2,3\}\ ve\ k'\epsilon\{2,3\}\ \ \forall\ i\ \epsilon\ N. \tag{3.8}$$

$$s_{i_k} \geq \ c_{i_k} - M\left(1 - x_{i_l,i_k}\right) \tag{3.9}$$
$$k\,\epsilon\,\{2,3\}, l \neq 4, \ \ l \neq k, \ \ l \neq k', \ \ \forall\, i\ \epsilon N.$$

$$s_{i_k} \geq \ c_{i_{k'}} - M\left(1 - x_{i_l,i_{k'}}\right) \tag{3.10}$$
$$k\,\epsilon\,\{2,3\}, l \neq 4, \ \ l \neq k, \ \ l \neq k', \ \ \forall\, i\ \epsilon N.$$

$$\sum_{i=1}^{n} r_{i_k} = 1, \qquad \forall\, i_k\, \epsilon N. \tag{3.11}$$

$$\sum_{i=1}^{n} r_{i_1} + \sum_{i=1}^{n} r_{i_4} = 0\,, \qquad \forall\, i \in N. \tag{3.12}$$

$$r_{i_k} < x_{i_k,j_l}, \qquad \forall\, i_k, j_l \in N. \tag{3.13}$$

$$r_{i_k} \leq z_k \qquad \forall\, i_k, \in N. \tag{3.14}$$

$$x_{i_k,j_l} - M * (1 - z_l) \leq a_{j_l} \quad k = 1 \;\; ve \tag{3.15}$$

$l = 2\; veya\; 5\; ve\; l = 3$ veya 6 $\forall\, i,j \in N.$

$$md_{j_l} \geq c_{l_1} + \left(p_j * x_{j_1,j_l} - \left(a_{j_l} * p_j * \delta\right)\right) + \tag{3.16}$$

$$\mathrm{a} * r_{ik} + r_{ik} * \mathrm{R} \qquad l = 2\; veya\; 5\; ve\; l = 3\; veya\; 6, \qquad \forall\, j \in N.$$

$$x_{j_1,j_l} \leq \left(1 - d_{j_k}\right); \qquad k = 2,5,3,6, \qquad \forall\, j \in N. \tag{3.17}$$

$$b_{i_k} \geq \left(p_i - \left(p_i * z_k * \delta\right) + \left(p_i * r_{i_k} * \delta\right) + \left(p_i * a_{i_k} * \delta\right)\right) - \left(c_{i_k} - s_{i_k}\right) \tag{3.18}$$

$k = 2veya5\; ve\; k = 3\; veya\; 6, \forall\, i \in N.$

$$b_{i_k} \geq \left(p_i - \left(p_i * z_k * \delta\right) + \left(p_i * r_{i_k} * \delta\right) + \left(p_i * a_{i_k} * \delta\right)\right) - \left(\mathrm{C} - s_{i_k} + \right. \tag{3.19}$$

$\left. c_{i_k}\right)\; k = 2veya5\; ve\; k = 3\; veya\; 6, \forall\, i \in N.$

$$d_{i_k} \geq c_{i_k} - \mathrm{M} * \left(1 - d_{i_k}\right) \;\; k = 2veya5\; ve\; k = 3\; veya\; 6, \forall\, i \in N. \tag{3.20}$$

Amaç fonksiyonu

$$\mathrm{Cmax} \geq c_{i_k} \qquad \forall\, i_k \in N \tag{3.21}$$

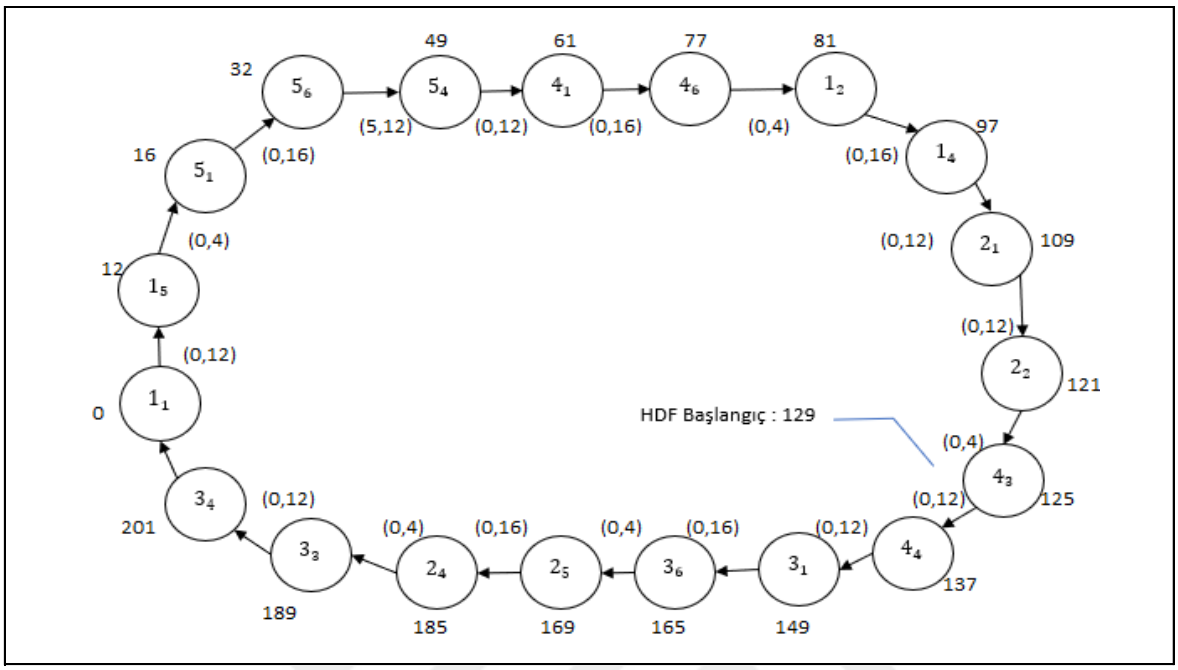
Eş. (1.1), tüm düğümlerde gelen ark sayısının giden ark sayısına eşit olması sağlanmaktadır. Eş. (1.2-1,3), bazı düğümlere gidişler engellenmektedir. Eş. (1.4) ve Eş. (1.5), atanacak tüm parçaların 1 numaralı istasyonundan alınmasını ve 4 numaralı istasyona bırakılmasını garanti etmektedir. Eş. (1.6), her bir düğümün tamamlanma zamanlarını hesaplar. Eş. (1.7), aynı istasyonun robot tarafından tekrarlı olarak ziyaret edildiği durumlar için oluşturulmuştur. Eş. (1.8-1.9-1.10), parçaların makinelere atanma zamanlarından itibaren tamamlanma zamanlarını hesaplamaktadır. Eş. (1.11), tüm parçalar atanıncaya kadar HDF'nin sadece 1 kez uygulanmasını sağlamaktadır. Eş. (1.12), Sadece ilgili makinelere HDF uygulanmasını sağlamaktadır. Eş. (1.13), HDF uygulanacak makineden parçanın alındığı, makinenin boş

bırakıldığı anda HDF uygulanmasını sağlamaktadır. Eş. (3.14), makineye HDF uygulandığında z_k değişkeni de 1 değerini almaktadır. Eş. (3.15), makineye HDF uygulanmış olduğunda, a_{j_l} değişkeni ile t işinin aynı makineye daha önceki bir pozisyonda atanmış olup olmadığının kontrolü sağlanır. Eş. (3.16) makineye HDF uygulandığında yeni parça atanmaması için makineyi dolu gösteren kısıttır. Eş. (3.17), makine dolu (HDF aktif) olduğunda makineye yükleme hareketlerini engellemektedir. Eş. (3.18-3.19) robot bekleme zamanlarını hesaplama formülleridir, HDF uygulanmış olduğunda bulunduğu pozisyona göre robot, HDF'yi beklemektedir. Eş. (3.20) bir makinenin herhangi bir andaki mevcut işleminin tamamlanma zamanına bağlı olarak 0-1 değişkeni belirlemekte, böylece ilgili makineyi meşgul statüsünde göstermek için kullanılmaktadır. Eş. (3.21), tamamlanma zamanı minimizasyonudur.

3.3. Örnek Problem Çözümü

Konunun daha anlaşılır olması için örnek problem çözümü detayları aşağıda anlatılmaktadır. İlgili problemde 2 adet özdeş makinede; P1=41, P2=45, P3=9, P4=14ve P5=5 işlem zamanlı 5 adet parça hücrede üretilecektir. Robot taşıma süresi = 4, robot yükleme süresi = 4 birim zamandır. HDF oranı = 30% iken HDF süresi = 22 birim zaman olduğu durumda matematiksel model çıktısı incelenmiştir.

3.3.1. **Çözümün düğüm diyagramı**



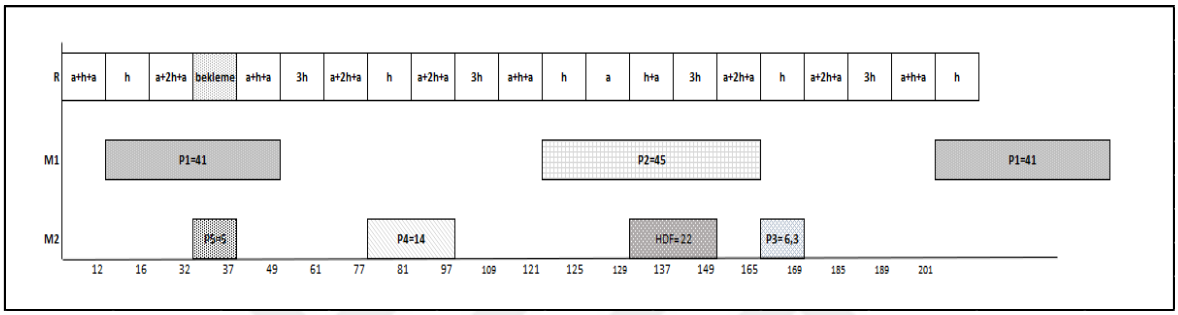
Şekil 3.4. Örnek problem çözümü düğüm diyagramı

Düğüm diyagramında parça kodu ve taşındığı istasyonlar daire içerisinde gösterilmiştir. Daire içerisinde ana kod parça kodunu, indis şeklinde gösterilen kod ise istasyon numarasını belirtir. Diyagramda parantez içerisinde yer alan virgülden önceki değer, robotun ilgili düğümdeki bekleme süresini, sonraki değer robotun taşıma süresini ifade etmektedir. Ayrıca, robotun her bir düğüme gitmesi ile hesaplanan düğüm tamamlanma zamanları daire yanlarında belirtilmiştir.

Geliştirilen matematiksel model ile örnek problem çözülmüş ve çıktıları ile elde edilen düğüm diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Çizelgeleme sonucunda 5 adet parça ataması gerçekleşmiştir. HDF 4_3 düğümden sonra 3-6 numaralı makineye uygulanmıştır. Robot 4_3 düğümünde parçayı 3 numaralı makineden alarak 4 numaralı çıkış istasyonuna taşımıştır. 4_3 düğüm tamamlanma zamanı 125 birim zamandır. Robot parça alma süresi ise 4 birim zamandır. HDF robotun ilgili düğümden parçayı alması ile başlamaktadır. Dolayısıyla, HDF başlama zamanı = 125+4 = 129. birim zaman olarak elde edilmiştir. HDF 22 birim zamanı boyunca devam etmiş bu sırada robot aldığı parçayı çıkış istasyonuna taşımıştır. Robot aynı makineye bir sonraki atamada 3 numaralı parça atamasını 165. birim zamanda yapmıştır. Bu parça ataması HDF sonrasında gerçekleştiği için 3 numaralı parçanın işlem süresi; HDF

sonrası parça işlem süreleri hesaplanmış ve makine üzerinde 3 numaralı parça işlemi 6,3 birim zaman sürmüştür.

Matematiksel modelde robotun 1_1 düğümüne her gelişinde HDF uygulayan ve işlem süreleri iyileştirilmesi için tanımlanmış tüm değişkenler sıfırlanarak başlangıç pozisyonuna geri dönülür. Böylece model sürekli olarak minimum tamamlanma zamanını elde edeceği HDF pozisyonunu belirlemek üzere aramaya devam etmektedir.



Şekil 3.5. Örnek problem çözümünün Gantt Şeması

Problem çözümünü Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Gantt şeması ile incelediğimizde 201. zamanda robot tüm parçaların atamasını bitirmiş yeni grubun parçalarını atamak üzere hazır durumda olduğu görülmektedir. Tamamlanma zamanı ilk parçanın atandığı an ile ikinci parça grubunun ilk parçasının atandığı an arasındaki zaman dilimi olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, Tamamlanma zamanı = 201-12= 189 birim zamandır. Düğüm diyagramında 3-6 numaralı olarak gösterilen M2 kodlu makinede P4 kodlu parça robot tarafından alındığı anda makine serbest kalmış ve HDF başlamıştır. HDF uygulandıktan sonra aynı makineye atanan parça süresi 30% iyileştirilmiş ve ilgili işlem süreleri ile parçalar çizelgelenmiştir. Şekil 3.5'te yer alan Gantt şemasına göre robotun toplam bekleme zamanı 5 birim zamandır. M1 makine bloke zamanı 120 birim ve M2 kodlu makine bloke zamanı ise 152 birim zaman olarak görülmektedir.

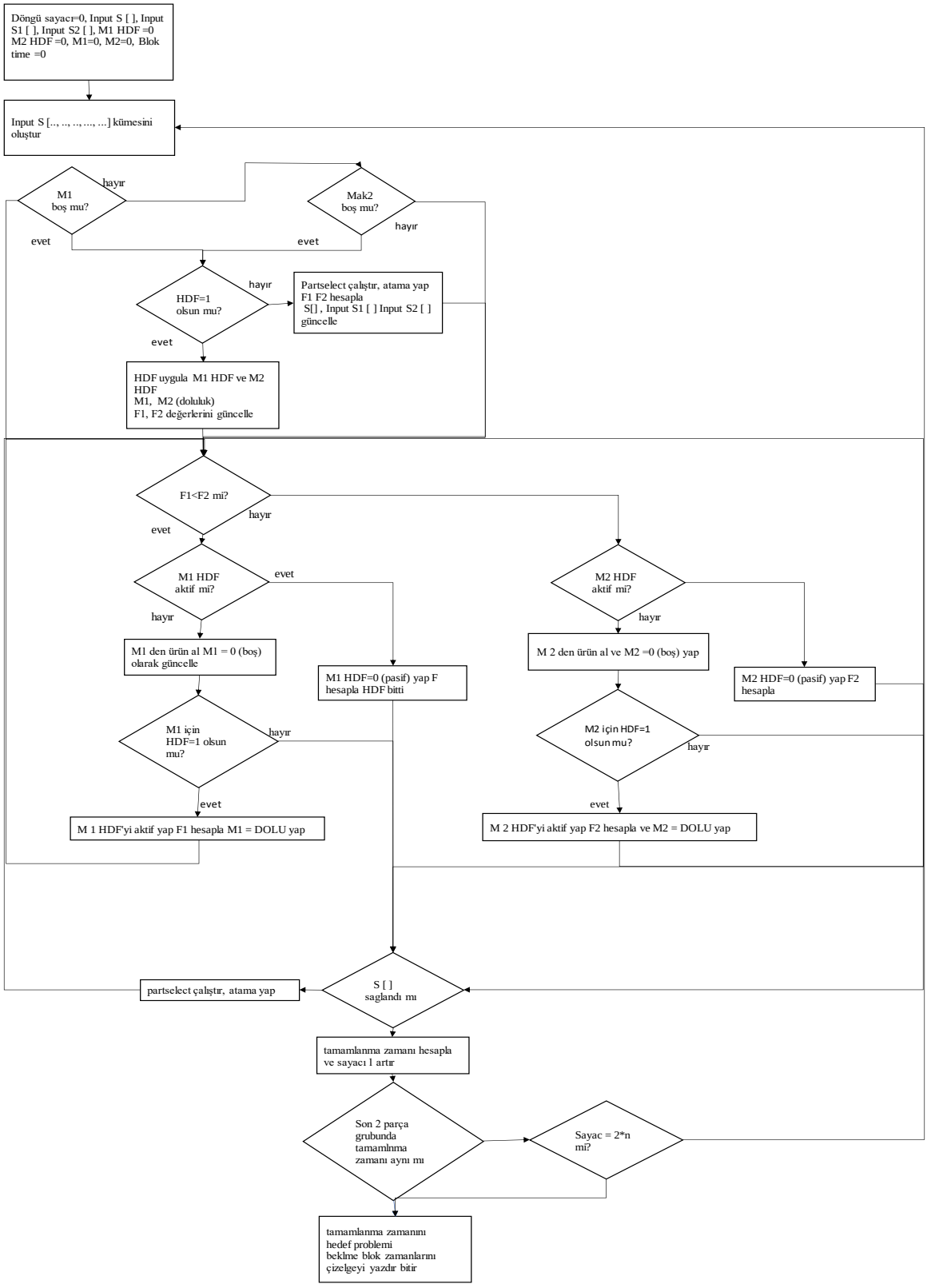
4. ÖNERİLEN SEZGİSEL MODEL

Problem için oluşturulan matematiksel model ile küçük boyutlu problemlerde çözümler elde edilmiş fakat işlem sayısı ve parametre değerleri arttıkça çözüm süreleri açısından model yetersiz kalmış ve sezgisel bir model geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Önerilen matematiksel model ile parça adeti 6 adet üzerine çıktığında çözüm süreleri 1 saatten daha uzun sürmektedir. Bu durum, çalışmamızı sezgisel model geliştirmeye yönlendirmiştir. Sezgisel ve meta sezgisel modeller büyük çaplı problemlerin çözümlerine ulaşmak için oldukça etkili araçlardır. Hem uygun çözümlere ulaşmak için hem de çözüm süresi açısından avantaj sağlamak için sezgisel yöntemlerden sıklıkla yararlanılır. Bu amaçla, Aktürk, Batur Sir ve Karasan (2012) tarafından geliştirilen "Partselect Algoritması" ile birlikte çalışarak HDF uygulayan yeni bir sezgisel model elde edilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntemde hangi işlemin atanacağı bilgisi anlık olarak Partselect Algoritması'ndan alınmaktadır. Bu bölümde önerilen sezgisel modelin detayları anlatılacaktır.

Başlangıçta tüm makineler boş ve belirli sayıda parça makinelere atanmak üzere giriş istasyonunda beklemektedir. HDF pozisyonu için ilk olarak hiçbir atama gerçekleşmeden önce sıfır pozisyonu seçilmekte ve uygulanmaktadır, sonrasında parçalar atanmaya devam eder. HDF uygulanmış olan makineye atanan diğer parçaların süreleri hız değiştirme oranı ile çarpılarak hesaplanır. Tüm işlemler atandıktan sonra tamamlanma zamanı hesaplanır ve ikinci parça grubu modifiye edilmiş süreleri ile atanmaya başlar. Tüm parçalar ikinci defa atandıktan sonra ikinci tamamlanma zamanını hesaplanır ve geçilecekse üçüncü parça grubunun atanmasına geçilerek sürece devam edilir. HDF uygulandıktan sonra varsa kalan tüm parçalar atanacak ve tamamlanma zamanı = 2 parça setinin tamamlanma süresi/2 formülü ile hesaplanmaktadır. Bu şekilde bir ortalama değer belirlenmesinde amaç, robotun ilk turunda uygulanan HDF süresinin 2. seti de etkilemesidir. HDF pozisyonlarını doğru kıyaslayabilmek için 2 setin ortalama değeri dikkate alınmaktadır. Eşit tamamlanma zamanlarının elde edildiği noktada belirlenen son gruba ait tamamlanma zamanı, tamamlanma zamanı olarak kabul edilir. HDF için tüm pozisyon ihtimalleri denenerek minimum tamamlanma zamanı elde edildiğinde HDF'nin pozisyonu belirlenmiş olur.

Model geliştirilirken Python, Pycharm IDE – (Integrated Development Environment) programlama dilleri ve Numpy kütüphanesinden yararlanılmıştır.

4.1. Sezgisel Algoritma Adımları



Şekil 4.1. Belirli bir pozisyona HDF uygulayan program

Adımlar

1- Makine 1 HDF=0 ve Makine 2 HDF=0 olduğunda makinelere henüz HDF uygulanmamıştır. S atanmamış parça kümesini, S1 Makine 1'e atanan parça kümesini ve S2 Makine 2'ye atanan parça kümesini ifade etmektedir. Başlangıç değerleri; HDF oranı, süresi, indisi ve S-S1-S2 dizileri, Makine 1, Makine 2 değerleri sıfırlanır. Adım 2'ye geçilir.
2- Makine 1'in müsaitlik kontrolü yapılır. Makine 1 boş ve HDF uygulanacak ise Adım 3'e, Makine 1 dolu ise Adım 4'e geçilir.
3- HDF uygulanır, HDF bitiş süresi hesaplanır. Adım 7'ye geçilir.
4- Makine 2 için müsaitlik kontrolü yapılır. Makine 2 boş ve HDF uygulanacak ise Adım 3'e, Makine 2 dolu ise Adım 7'ye geçilir.
5- Makine 1 boş fakat HDF uygulanmayacak ise Partselect Algoritması çalıştırılır ve Partselect Algoritması tarafından seçilen parça Makine 1'e atanır. Atanan işlem S=[] kümesinden alınarak S1=[] kümesine aktarılır. Adım 7'ya geçilir.
6- Makine 2 boş fakat HDF uygulanmayacak ise Partselect Algoritması çalıştırılır ve Partselect Algoritması tarafından seçilen parça Makine 2'ye atanır. Atanan işlem S=[] kümesinden alınarak S2=[] kümesine aktarılır. Adım 7'ya geçilir.
7- Makine 1 ve Makine 2 parça bitiş süreleri için küçük-büyük ilişkisi kıyaslanır. F1<F2 ise adım 8'e, değilse Adım 9'a geçilir.
8- Makine 1'de HDF aktif mi? Sorgusu yapılır. HDF aktif durumda ise Adım 10'a geçilir. HDF aktif değil fakat bu adımda HDF uygulanacak ise Adım 11'e geçilir. HDF aktif değilse robot parçayı almak üzere Makine 1'e gider, işlem bitmemişse işlenen parça süresinin bitmesini bekler. Daha sonra ürünü alarak output istasyonuna götürür ve tekrar Makine 1'e yeni ürün yüklemek için input istasyonuna gelir, ürünü alır ve tekrar Makine 1'e yükler. Atanan işlem S=[] kümesinden alınarak S1=[] kümesine aktarılır. S=[] şartının sağlanıp sağlanmadığı kontrolu yapılır, sağlandı ise Adım 12'ye sağlanmadı ise Adım 7'ye geçilir.
9- Makine 2'de HDF aktiflik kontrolü yapılır. HDF aktif durumda ise Adım 10'a geçilir. HDF aktif değil fakat bu adımda HDF uygulanacak ise Adım 11'e geçilir. HDF aktif değilse robot parçayı almak üzere Makine 1'e gider, işlem bitmemişse işlenen parça süresinin bitmesini bekler. Daha sonra ürünü alarak output istasyonuna götürür. Makine 1'e yeni ürün yüklemek için input istasyonuna gelir, ürünü alır ve tekrar Makine 1'e yükler. Atanan işlem S=[] kümesinden alınarak S1=[] kümesine aktarılır. S=[] şartının

sağlanıp sağlanmadığı kontrolu yapılır, sağlandı ise Adım 12'ye sağlanmadı ise Adım 7'ye geçilir.

10- Makinede HDF aktif durumda ise robot input istasyonuna gider, yeni ürün alarak Makine 1'e taşır ve HDF süresi bittiği anda ürünü yükler. S=[] şartının sağlanıp sağlanmadığı kontrolu yapılır, sağlandı ise Adım 12'ye sağlanmadı ise Adım Adım 7'ye geçilir.

11- Makinede HDF aktif durumda değil fakat makineden parça alındıktan sonra makineye HDF uygulanacaksa robot Makineye gider parçayı alır, aldığı anda Makine için HDF süresi başlar, HDF bitiş zamanı hesaplanır, Makine dolu statüsüne geçer. Robot ise bu sırada Makineden aldığı ürünü outputa götürür. S=[] şartının sağlanıp sağlanmadığı kontrolü yapılır, sağlandı ise Adım 12'ye sağlanmadı ise Adım Adım 7'ye geçilir.

12- HDF pozisyon bilgisi, Tamamlanma zamanı robot ve makine bekleme süreleri yazdırılır ve model 8 kez koşturulur. Elde edilen çözümlerden tamamlanma zamanları 2 kez tekrar ettiyse, elde edilen tamamlanma zamanı hedef problem olarak kaydedilir, yazdırılır ve bitirilir. Şart sağlanmadı ise Adım 7'ye geçilir.

HDF pozisyonu belirlenirken ilk olarak HDF için seçilen istasyona hiçbir parça ataması yapılmadan önce istasyon HDF süresi kadar meşgul gösterilerek diğer tüm işlemlerin ataması yapılır. Hesaplanan tamamlanma zamanı ve hedef problem değerleri yazdırılır. HDF pozisyonu 1 adım ileriye, istasyona atanan ilk parça robot tarafından alındıktan sonraki pozisyona taşınarak algoritma tekrar tetiklenir. Elde edilen parametre değerleri kaydedilir. Tüm HDF pozisyonları için algoritma tetiklenir ve elde edilen çözümlerden en iyi olanı seçilir.

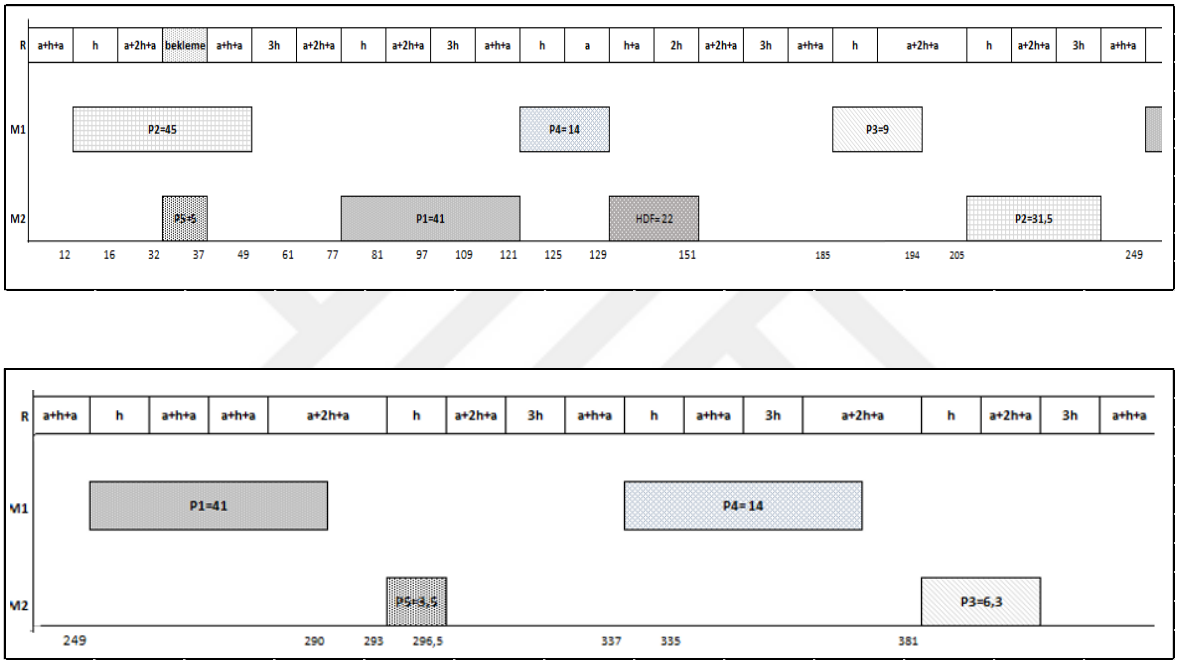
4.2 Sezgisel Model Örnek Çözümü

Parametrelerinin Çizelge 4.1.'de gösterildiği örnek bir problem için sezgisel modelin çıktısı aşağıda incelenmektedir. Parametre değerleri birim zamanı dilimi cinsindendir. Önceki örnek problem parametre değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Örnek problem parametreleri

Parametreler
İşlem sayısı = 5 adet
HDF Süresi = 22 br
Robot taşıma işlem süresi = 4 br
Robot alma-bırakma süresi = 4 br
HDF oranı = 30%

Çözüm:



Şekil 4.2. Sezgisel algoritma çözümü Gantt Şeması

Şekil 4.2.'de görülen Gantt şemasında Tamamlanma zamanı = (425-12) /2 = 206,5 birim zaman olarak hesaplanır. HDF için Makine 2'de 5 numaralı parça atadıktan sonraki pozisyon belirlenmiştir. HDF uygulandıktan sonra aynı makineye atanan parça süresi %30 iyileştirilmiş hali ile değiştirilerek çizelgelenmiştir.

Şekil 4.2.'de şemaya göre P2 HDF sonrası M2 makinesinde çizelgelenmiş ve Proses süresi 31,5 br zaman olarak hesaplanmıştır. Çizelgeleme sürecinin devamında P2 M1 makinesine atanmış ve P2 proses süresi 45 olarak orijinal süresinde devam etmiştir. Geliştirilen hem matematiksel model hem de sezgisel modelde makine seçimi yapılmamakta parçaların atama sırasına göre HDF pozisyonu belirlenmektedir.

5. DENEY TASARIMI

Geliştirilen sezgisel algoritmada çizelgelenen örneklem kümesi için ilk tur HDF uygulanmış ve tamamlanma zamanı hesaplanmıştır ancak HDF'nin etkisini görebilmek için HDF uygulanmış şekilde çizelgelemeye devam edilmiştir. Buradaki amaç ilk pozisyon dışındaki HDF pozisyonlarında HDF'nin sağladığı makine hızlanma avantajının devam eden turlarda tam olarak ortaya çıkmasıdır.

Tamamlanma zamanı daha önceki bölümlerde bahsedildiği şekilde HDF uygulanması ile başlayan ilk iki turda gerçekleşen tamamlanma zamanları ortalaması olarak hesaplanmıştır. Çizelgeleme diğer turlarda da devam ederek HDF bir kez uygulandıktan sonraki turlarda HDF süresinin dahil olmadığı ancak işlem süreleri HDF oranı ile çarpılarak iyileştirilmiş halde çizelgelenmeye devam etmektedir. Hedef çözümler belirlenirken 2. turdan sonra sezgisel modelin bitirme şartını n*2 kez daha koşturup üst üste 2 kez ortalama tamamlanma zamanları eşit olduğunda durması şeklinde yol izlenmiştir. Böylece hedef çözümler elde edilmiştir. Hedef çözümden sapmalar ise aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

G c_{ik}: gerçekleşen çözüm ve H c_{ik}: hedef çözümdür.

$$GAP\ \% = \frac{\mathrm{G}\ c_{ik} - \mathrm{H}\ c_{ik}}{\mathrm{H}\ c_{ik}} * 100$$

Çizelge 5.1. Belirlenen faktör düzeyleri

	DÜZEYLER		
FAKTÖRLER	1	2	3
	Düşük	Orta	Yüksek
*Robot Taşıma	1%	4%	9%
*Robot Yükleme	1%	4%	9%
*HDF Süre Çarpanı	110%	120%	130%
HDF Oranı	10%	20%	30%
Parça Adet Aralığı	3<<6	6<<50	50<<250
Parça İşlem Süresi Aralığı	4<<50	50<<100	100<<450
*Ortalama parça süresi üzerinden yüzde değer			

Modelde bağımsız değişkenler HDF oranı, HDF süresi, robot taşıma süresi, yükleme süresi, örneklemdeki parça sayısı ve parça işlem süresi aralığı olarak belirlenmiştir. Bağımlı değişkenler ise GAP% değeri ve çözüm süresidir. Sezgisel algoritmada karar verilen faktör

düzeyleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Model her bir farklı düzeyin kombinasyonları için 10'ar kez koşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ile yapılabilecek testlere karar vermek için bağımlı değişken değerlerinin normal dağılıma uyum kontrolü yapılmıştır.

Normal dağılıma uyum kontrolü 4 yöntem ile yapılır;

1. Bağımlı değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerlerinin normal dağılıma uyumlu olduğu sonucuna varabilmek için çarpıklık ve basıklık değerlerinin $\mp \mathbf{1}$ aralığında olması gereklidir.
2. Çarpıklık ve basıklık değerlerinin standart hataya bölünmesi ile elde edilen değerler $\mp \mathbf{1,96}$ aralığında olması gereklidir.
3. Bağımlı değişkenlerden elde edilen histogram grafiklerinde normal dağılım çan eğrisine uyumluluğu verilerim normal dağılıma uyumlu olup olmadığı konusunda bilgi vermektedir.
4. Q-Q grafikleri verilerin normal dağılıma uyumluluğun görsel olarak tespit edilmesini sağlar.

Çözüm süresi ve GAP%, bağımlı değişkenlerinin normal dağılıma uyumluluğunu kontrol etmek için yukarda bahsedilen 4 yöntemden yararlanılmıştır. Normal dağılım uyumuna ilişkin tablolar aşağıda gösterilmiştir.

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
% GAP	5529	100,0%	0	0,0%	5529	100,0%
COZUM SURESI	5529	100,0%	0	0,0%	5529	100,0%

Şekil 5.1. Normal dağılım kontrolü analiz özeti

Şekil 5.1.'den anlaşılacağı gibi 5529 adet veri ile analiz yapılmıştır. Yararlanılan tüm veride kayıp bilgi yoktur.

Descriptives

			Statistic	Std. Error
% GAP	Mean		,0301775	,00058102
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	,0290385	
		Upper Bound	,0313165	
	5% Trimmed Mean		,0243767	
	Median		,0098000	
	Variance		,002	
	Std. Deviation		,04320293	
	Minimum		,00000	
	Maximum		,40909	
	Range		,40909	
	Interquartile Range		,04280	
	Skewness		2,306	,033
	Kurtosis		7,201	,066
COZUM SURESI	Mean		8,2934493	,41726242
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	7,4754508	
		Upper Bound	9,1114477	
	5% Trimmed Mean		4,8273471	
	Median		,0777400	
	Variance		962,643	
	Std. Deviation		31,02648469	
	Minimum		,00000	
	Maximum		839,00000	
	Range		839,00000	
	Interquartile Range		5,57301	
	Skewness		18,917	,033
	Kurtosis		476,171	,066

Şekil 5.2. Değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerleri

Yöntem 1'e göre normal dağılım kontrolü

Tablo 5.2.'de bağımlı değişkenler olan çözüm süresinin ortalama değeri 8,29 sn iken standart sapması 31,02 olarak elde edilmiş, diğer bağımlı değişken olan GAP% ortalama değerini 0,03 % ve standart sapması 0,043 bilgilerine de ulaşılabilmektedir. Ayrıca Tablo 3'ten elde edilen çarpıklık ve basıklık değerleri de aşağıda yorumlanmıştır.

$\text{çözüm süresi } skewness = 18{,}9 > 1$

$GAP\%\ skewness = 2{,}3 > 1$

$\text{çözüm süresi } kurtosis = 476 > 1$

$GAP\%\ kurtosis = 7{,}2 > 1$

Çarpıklık ve basıklık değerleri ∓ 1 aralığında değildir. Bu veriden hareketle bağımlı değişkenlerimiz normal dağılım göstermemektedir.

Yöntem 2'ye göre normal dağılım kontrolü

Çözüm süresi skewness / std. error = 18,9/0,033 = 57,27

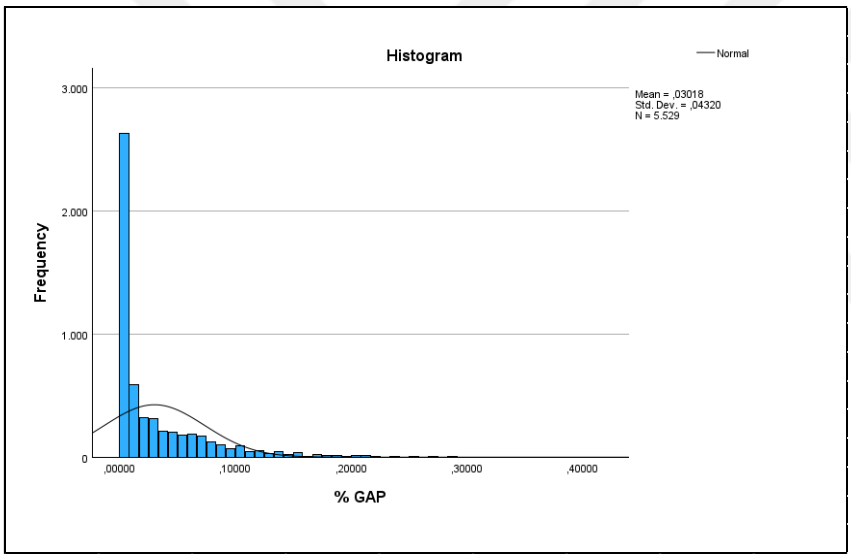
GAP% skewness / std. error = 2,3/0,33 = 6,96

Çözüm süresi kurtosis /std error = 476/0,66 = 721,21

GAP% kurtosis/std. error = 7,2 /0,66 = 10,91

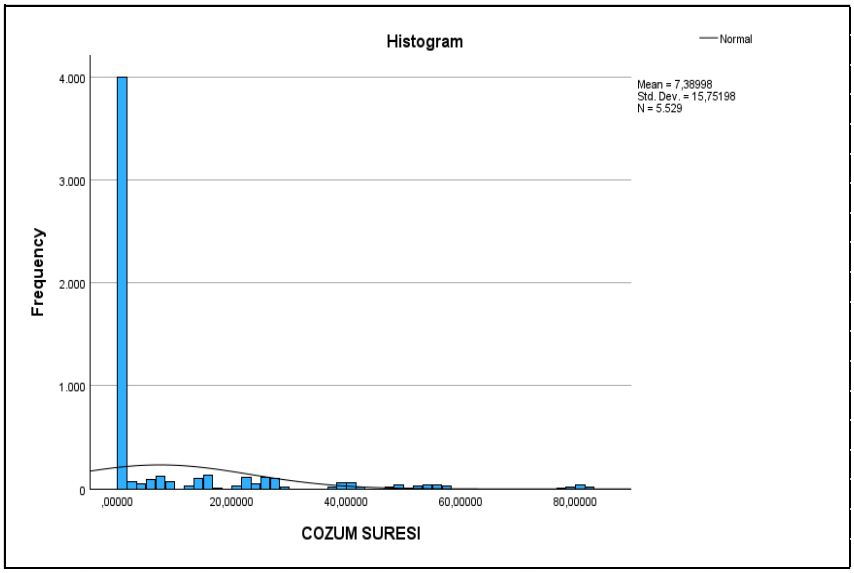
Yöntem 2'ye göre elde edilen değerler $\mp 1{,}96$ aralığında olmayıp veriler normal dağılıma uygun bulunmamıştır.

Yöntem 3'e göre normal dağılım kontrolü



Şekil 5.3. GAP% bağımlı değişkenine ait histogram grafiği

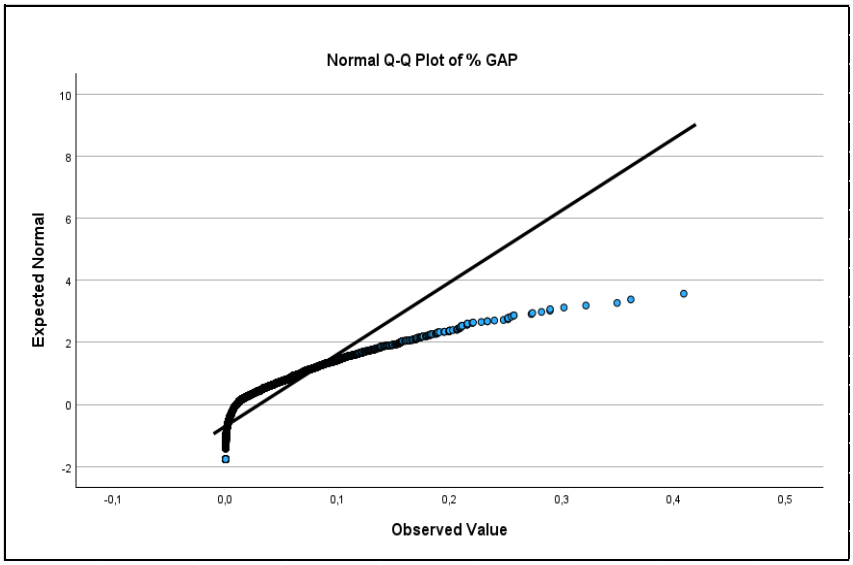
Şekil 5.3'te GAP% değerlerinin normal dağılım çan eğrisine uyumlu olmadığı görülmekte aynı zamanda grafikte dikeyde sıklık açısından uç değerlerin olduğu ve yatayda da sıklık azalırken GAP% değeri artan normal dağılım eğrisi dışına çıkan veriler gözlemlenmiştir. Bu yönteme göre GAP% verileri normal dağılıma uyumlu değildir.



Şekil 5.4. Çözüm süresi bağımlı değişkenine ait histogram grafiği

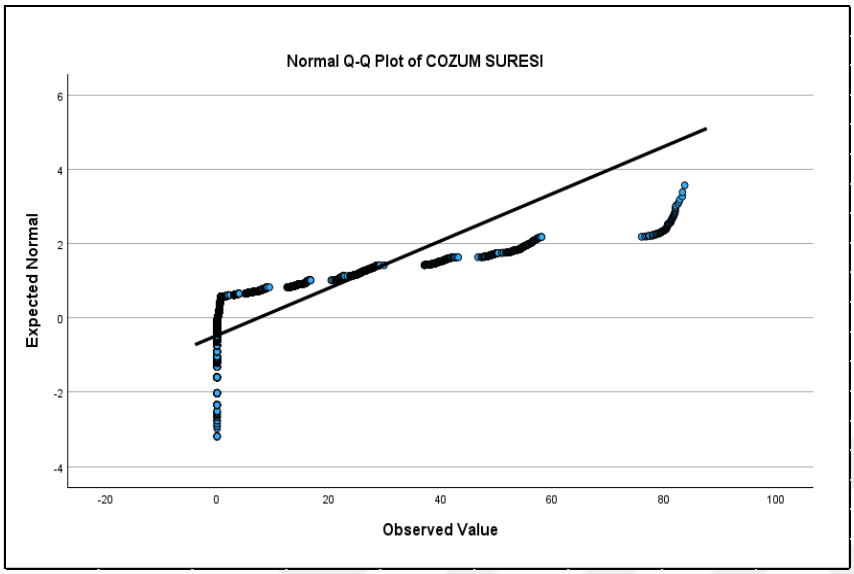
Şekil 5.4.'te çözüm süresi değerleri normal dağılıma uyumsuz olduğu görülmektedir. Grafikte dikeyde Gap % değerlerine paralel olarak sıklık açısından uç değerlerin olduğu ve yatayda da sıklık azalırken artan çözüm süreleri ile normal dağılım eğrisi dışına çıkan veriler gözlemlenmiştir. Çözüm süresi verileri normal dağılmamaktadır.

Yöntem 4'e göre normal dağılım kontrolü



Şekil 5.5. GAP% bağımlı değişkenine ait Q-Q Plot grafiği

Şekil 5.5.'te görülen Q-Q Plot grafiğinde görülen GAP% verileri normal dağılım doğrusu değerlerine yaklaşık olarak konumlanması gerekirken veriler doğrudan uzaklaşmaktadır. Bu durum verilerin normal dağılmadığını göstermektedir.



Şekil 5.6. Çözüm süresi bağımlı değişkenine ait Q-Q Plot grafiği

Şekil 5.6'da görülen Q-Q Plot grafiğinde çözüm süresi verileri normal dağılım doğrusundan anormal şekilde uzaklaşarak konumlanmıştır. Grafik diğer yöntemlere paralel olarak çözüm süresinin normal dağılıma uyumlu olmadığını göstermektedir.

Özetle, yukarda denenen tüm yöntemlere göre sezgisel modelin bağımsız değişkenleri GAP% ve çözüm süresinin normal dağılıma uyumlu olmadığı görülmektedir. Bağımlı değişkenler normal dağılıma uymadığında bağımsız değişken sınıf sayısına göre aşağıdaki testlerin yapılması uygundur.

1. Mann-Whitney U Testi; İki bağımsız grup arasındaki farkları karşılaştırmak için kullanılır.
2. Kruskal Wallis-H Testi; Üç veya daha fazla bağımsız grup arasındaki farkları karşılaştırmak için kullanılır.

Normal dağılıma uymayan veriler ile bağımsız değişkenlerin faktör düzeyleri birden fazla olduğu için Kruskal Wallis-H Testi yapılmasına karar verilmiştir. Kruskal Wallis-H test sonuçları tüm faktörlere göre aşağıda incelenmiştir.

Parça adetine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Descriptive Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles 25th	50th (Median)	75th
COZUM SURESI	5529	8,2934493	31,02648469	,00000	839,00000	,0019900	,0777400	5,5750000
% GAP	5529	,0301775	,04320293	,00000	,40909	,0016400	,0098000	,0444400
PARCA ADET SINIFI	5529	1,89	,814	1	3	1,00	2,00	3,00

Şekil 5.7. Parça adet sınıfına özgü genel istatistik bilgileri

Şekil 5.7.'de gösterildiği gibi 5529 adet gözlem yapılmıştır. Standart sapma, ortalama, uç değerler gibi genel bilgiler Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.

Ranks

	PARCA ADET SINIFI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	2171	1086,00
	ORTA	1796	3069,50
	YUKSEK	1562	4748,50
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	2171	4301,82
	ORTA	1796	2430,51
	YUKSEK	1562	1013,60
	Total	5529	

Şekil 5.8. Parça adet düzeylerinin örneklem sayıları ve ortalama sıra değerleri

Parça adet düzeylerinde düşük sınıf problem sayısı 2171 adet olup orta sınıf 1796 adet ve yüksek parça sınıfı örnekleminde 1562 adet koşturma sayısı bulunmaktadır. GAP% örneklem sayıları da parça adet sınıfları ile birebir aynıdır.

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			4907,055	3973,558
df			2	2
Asymp. Sig.			<,001	<,001
Monte Carlo Sig.	Sig.		<,001[c]	<,001[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,000	,000
		Upper Bound	,000	,000

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: PARCA ADET SINIFI

c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 1335104164.

Şekil 5.9. Parça adet düzeylerinin çözüm süresi ve GAP% etkisi

Şekil 5.9.'da verilen Asymp. Sig. değerinden anlaşılacağı üzere; Kruskal-Wallis H deney sonucuna göre parça adet sınıfı bağımsız değişkeninin GAP% ve Çözüm süresi bağımlı değişkenleri üzerinde anlamlı derecede etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Parça işlem süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Çözüm süresi ve GAP% bağımlı değişkenlerin faktör sınıflarında elde edilen sayıların birbirine eşit olduğu görülmüştür. Düşük faktör sınıfında 1492 adet, orta faktör sınıfında 1978 adet ve yüksek faktör sınıfında 2059 adet veri bulunmaktadır. Asymp. Sig. değeri çözüm süresi için 0,05'ten küçük iken GAP% için 0,063'tür (Parça işlem süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları EK-1). Kruskal-Wallis H deney sonucuna göre parçanın işlem süresi anlamlı şekilde çözüm süresini etkilemektedir fakat GAP% değişkeni üzerinde anlamlı bir etki görülmemiştir.

HDF oranına göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Çözüm süresi ve GAP% bağımlı değişkenlerin faktör sınıflarında yer alan veri birbirine sayıları eşittir. HDF oranına göre yapılan deneyde düşük faktör sınıfında 1789 adet, orta faktör sınıfında 1876 adet ve yüksek faktör sınıfında 1864 adet sonuç elde edilmiştir. Asymp. Sig. değeri çözüm süresi için 0,387 iken GAP% için 0,01'den küçüktür (HDF oranına göre Kruskal Wallis-H test sonuçları EK-2). Kruskal-Wallis H deney sonucuna göre

parçanın işlem süresi çözüm süresini anlamlı şekilde etkilemezken GAP% değeri üzerinde anlamlı bir etki tespit edilmiştir.

HDF süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Çözüm süresi ve GAP% bağımlı değişkenlerin faktör düzeylerinde elde edilen veri sayıları önceki testler ile paralel olarak birbirine eşittir. HDF süresine göre yapılan deneyde düşük faktör sınıfında 1775 adet, orta faktör sınıfında 1853 adet ve yüksek faktör sınıfında 1901 adet sonuç elde edilmiştir. Asymp. Sig. değeri için HDF süresi değişkeni bağımlı değişkenlere etkisi bakımından HDF oranına benzerlik göstermektedir. Çözüm süresi için 0,9 iken GAP% için 0,01'den küçüktür. (HDF süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları EK-3). Kruskal-Wallis H deney sonucuna göre HDF süresi, HDF oranında olduğu gibi çözüm süresini anlamlı şekilde etkilemezken GAP% değeri üzerinde anlamlı şekilde etkilemektedir.

Robot taşıma süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Birbirine eşit olarak elde edilen Çözüm süresi ve GAP% bağımlı değişkenlerin faktör düzeylerinde yer alan verilere göre düşük ve orta sınıf veri sayıları birbirine yakın iken yüksek sınıf veri sayısı diğer iki düzeyden daha küçük olduğu görülmektedir. Asymp. Sig. değeri için HDF süresi, bağımlı değişkenlere etkisi bakımından HDF oranına ve süresine paralellik göstermekte olup Kruskal-Wallis H deney sonucuna göre çözüm süresini anlamlı şekilde etkilemezken GAP% değerini anlamlı şekilde etkilemektedir (Robot taşıma süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları EK-4).

Robot yükleme süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları

Robot yükleme süresine göre yapılan deneyde düşük faktör düzeyinde 1853 adet, orta faktör düzeyinde 1864 adet ve yüksek faktör sınıfında 1812 adet diğer deney sonuçlarına göre faktör düzeylerinin birbirine daha yakın olduğu veri sayıları elde edilmiştir. Asymp. Sig. değerleri dikkate alındığında Robot yükleme süresinin Çözüm süresi üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı ancak GAP% değerini anlamlı şekilde etkilediği sonucu elde edilmiştir (Robot alma-bırakma süresine göre Kruskal Wallis-H test sonuçları EK-5).

Mann-Whitney U deneyi ile anlamlı faktör düzeylerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada, bağımlı değişkenlere anlamlı etkisi olduğu anlaşılan bağımsız değişkenlerin faktör düzeylerinin kombinasyonları ile Mann-Whitney U deneyi yapılmakta ve anlamlı farkın hangi faktör düzeyinden kaynaklandığını tespit edilmek istenmektedir. Deney öncesinde düşük, orta ve yüksek ile nitelendirilen faktör düzeyleri düşük-orta, düşük-yüksek ve orta-yüksek olarak gruplandırılmakta ve her bir grubun anlamlılık derecesi tespit edilmek üzere çalışılmaktadır.

Parça adeti faktör düzeylerine göre yapılan Mann-Whitney U deneyi sonuçlarına göre her bir faktör düzeyi grubunun GAP% ve çözüm süresine etkisi anlamlı sonucu elde edilmiştir. Tüm faktör düzeyleri bağımsız değişkenleri anlamlı şekilde etkilemektedir (Parça adedine göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-6).

Parça işlem süresine göre Mann-Whitney U deneyi sonuçları

Düşük-orta ve düşük-yüksek faktör düzeylerinin Kruskal Wallis-H sonucunda elde edilen sonuca paralel olarak GAP% üzerinde anlamlı etkilerinin olmadığı ancak çözüm süresi üzerindeki etkilerinin anlamlı farka sahip olduğu görülmektedir. Orta-yüksek faktör düzeyinde her iki bağımlı değişkene anlamlı bir etki görülmemektedir. Dolayısıyla Mann-Whitney U deneyi sonucuna göre anlamlı farkın oluşmasında ana kaynak düşük faktör düzeyidir (Parça işlem süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-7).

HDF oranına göre Mann-Whitney U deneyi sonuçları

Tüm faktör düzeyleri kombinasyonları GAP% üzerinde anlamlı etki göstermekle birlikte düşük-orta faktör düzeyi etkisi için hesaplanan Asymp. Sig. değeri diğer gruplardan yüksek çıkmıştır. Başka bir deyişle, düşük-yüksek, orta-yüksek faktör düzeyi gruplarının sonuca anlamlı etkisi düşük-orta grubundan daha büyüktür (HDF oranına göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-8).

HDF süresine göre Mann-Whitney U deneyi sonuçları

HDF süresi faktör düzeylerinden düşük-orta grubu GAP% üzerinde anlamlı etki göstermemektedir.
Düşük-yüksek ve orta-yüksek faktör düzeyleri düşük düzeyden yüksek düzeye doğru artan şekilde anlamlı etkiye sahiptir (HDF süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-9)

Robot taşıma süresine göre Mann-Whitney U deneyi sonuçları

Robot taşıma süresi faktör düzeylerinden düşük-orta grubu GAP% üzerinde anlamlı etki göstermemektedir. Düşük-yüksek ve orta-yüksek faktör düzey grupları GAP% üzerinde aynı derecede anlamlı etkiye sahiptir (Robot taşıma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-10).

Robot alma-bırakma süresine göre Mann-Whitney U deneyi sonuçları

Robot alma-bırakma süresi faktör düzeylerinde sadece orta ve yüksek grubunun GAP% oranına etkisi anlamlıdır. Diğer faktör grupları etkileri anlamlı fark göstermemektedir (Robot alma-bırakma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları EK-11).

6. SONUÇLAR

Üretim sektöründe makinelere periyodik olarak bakımlar yapılmakta ve bakım faaliyetleri sonucunda makinelerin hız performanslarında artış sağlanmaktadır. Makinelerde sağlanan hız artışı ile fabrika verimliliği ve üretim kapasitesi açısından firmalar rekabet avantajı sağlamaktadır. Bakım faaliyetlerinin literatürdeki karşılığı HDF olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada esnek robotik hücrelerde hız değiştirme faaliyeti paralel makine çizelgeleme problemi üzerinde çalışılmıştır. Yapılan literatür taramasından sonra probleme özgü matematiksel model geliştirilmiş ve küçük boyuttaki problemler çözülebilmiştir. Problem boyutu büyüdükçe matematiksel model çözüm süresi üssel artmış ve kısa sürelerde çözüm elde edilememiştir. Probleme özgü sezgisel bir yaklaşım geliştirilerek problem çözüm zamanları iyileştirilmiştir. Her iki yaklaşım ile geliştirilen modellerde parçalar çizelgelenmiş, HDF pozisyonu belirlenmiş, parça grupları tamamlanma zamanları, robot bekleme ve makine blok zamanları hesaplanmıştır. Elde edilen sezgisel model içinde aynı zamanda hedef problemleri de oluşturulmuştur. Sezgisel model 5529 kez koşturulmuş ve elde edilen GAP% ve çözüm süresi sonuçları deney tasarımı kapsamında incelenmiştir. Deney tasarımında faktör düzeyleri belirlenmiş ve ilgili faktör düzeylerinde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyde bağımlı değişkenlerin normal dağılıma uyum sağlamadığı tespit edilmiştir. Veri setine uygun olan Kruskal Wallis-H deneyi ve sonrasında Mann-Whitney U deneyi yapılmıştır. Kruskal Wallis-H deneyi ile tüm bağımsız değişkenlerin GAP% ve çözüm süresine etkileri yorumlanmıştır. Kruskal Wallis-H deneyi sonuçlarına göre; parça adet ve parça işlem süreleri çözüm süresi üzerinde anlamlı etkiye sahipken GAP% üzerinde anlamlı etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun aksine diğer bağımsız değişkenlerin çözüm süresi üzerinde anlamlı etkilerinin olmadığı ancak GAP% değişkeni üzerinde anlamlı etkiye sahip oldukları gözlenmiştir. Anlamlı etkisi tespit edilen faktör düzeylerinin kombinasyonları ile gruplama yapılmış, sonuç üzerinde oluşan grup etkileri Mann-Whitney U deneyi ile incelenmiştir. Deneyin sonucuna göre parça adet faktör düzeylerinin tüm kombinasyonlarının çözüm süresi üzerinde anlamlı etki sağladığı gözlenmiştir. Parça işlem süresi faktör düzeylerinde çözüm süresini anlamlı şekilde etkileyen faktör düzeyinin düşük faktör düzeyi olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda yüksek faktör düzeyli HDF oranı ve HDF süresi çözüm süresi üzerinde anlamlı etkiye sahip değilken GAP% değişkeni üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma esnek robotik hücrelerde hız değiştirme faaliyetli paralel makine çizelgeleme problemleri için bir temel oluşturmaktadır. İleride yapılabilecek çalışmalarda geliştirilen matematiksel model üzerinde parçalara kısıtlar eklenerek farklı modeller üzerinde çalışılabilir. Ayrıca geliştirilen sezgisel model farklı meta sezgisel yöntemler ile karşılaştırmalı olarak da incelenebilir.

KAYNAKLAR

Liu, Z., Sanlaville, E. (1995). Profile scheduling of list algorithm. In: Chretienne, *Scheduling Theory and its Applications* Wiley: New York, 1–110.

Lu-Wen L., Gwo-Ji S. (2008). Parallel machine scheduling with machine availability and eligibility constraints. *European Journal of Operational Research*, 184, 458-467.

Tatiana V., Igor, Y. (2017). Heuristic Approach to Unrelated Parallel Machines Scheduling under Availability and Resource Constraints. *IFAC PapersOnline,* 50(1), 13096-13101.

Rooyani, D., Fantahun, M. D. (2019), An Efficient Two-Stage Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling. *IFAC PapersOnLine*, 52, 2519-2524.

Maecker S., Shen L. and Mönch L. (2023). Unrelated parallel machine scheduling with eligibility constraints and delivery times to minimize total weighted tardiness. *Computers & Operational Research,* 149, 105-999.

Chou-Jung, T. C. E. and Dar, L. (2011). Unrelated parallel-machine scheduling with rate-modifying activities to minimize the total completion time. *Information Sciences*, 181, 4799-4803.

Li S., Bin W., and Lei N. (2021). Parallel-Machine Scheduling with DeJong's Learning Effect, Delivery Times, Rate-Modifying Activity and Resource Allocation. *Hindawi*, 525, 10-20.

Mosheiv, G., Oron, D. (2021). A note on scheduling a rate modifying activity to minimize total late work. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107-138.

Hyunjoon, K., Byung-In, K. (2022). Optimal sequence for single server scheduling incorporating a rate-modifying activity under job-dependent linear deterioration. *European Journal of Operational Research,* 298, 439-450.

Phosavanh, J., Oron, D. (2024). Two-agent single-machine scheduling with a rate-modifying activity. *European Journal of Operational Research,* 312, 866-876.

Urbani, M., Brunelli, M. and Punkka, A. (2023). An approach for bi-objective maintenance scheduling on a networked system with limited resources. *European Journal of Operational Research,* 305, 101-113.

Batur, G. D., Karasan, O. and E., Aktürk, M. S. (2012). Multiple part-type scheduling in flexible robotic cells. *International Journal Production Economics*, 135, 726-740.

Atabak, E., Topaloglu S. (2017). Cyclic job shop robotic cell scheduling problem: Ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering,* 111, 417-432.

Fatemi, S., Tavakkoli, R. (2023). Scheduling of Multi-Robot Job Shop Systems in Dynamic Environments: Mixed-Integer Linear Programming and Constraint Programming Approaches. *Omega*, 115, 102-770.

EKLER

EK-1. Parça işlem süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları

Ranks

	PARCA SURE SINIFI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	1492	2345,65
	ORTA	1978	2853,73
	YUKSEK	2059	2983,63
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	1492	2780,11
	ORTA	1978	2818,70
	YUKSEK	2059	2702,46
	Total	5529	

Şekil 1.1. Parça işlem süresine göre bağımlı değişkenlerin faktörleri

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			148,557	5,536
df			2	2
Asymp. Sig.			<,001	,063
Monte Carlo Sig.	Sig.		<,001[c]	,060[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,000	,056
		Upper Bound	,000	,065

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: PARCA SURE SINIFI

c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 1535910591.

Şekil 1.2. Parça işlem süresine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-2. HDF oranına göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları

Ranks

	RMA ORANI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	1789	2799,11
	ORTA	1876	2770,17
	YUKSEK	1864	2727,05
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	1789	2596,41
	ORTA	1876	2751,23
	YUKSEK	1864	2940,67
	Total	5529	

Şekil 2.1. HDF oranına göre bağımlı değişkenlerin faktörleri

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			1,901	42,692
df			2	2
Asymp. Sig.			,387	<,001
Monte Carlo Sig.	Sig.		,401[c]	<,001[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,392	,000
		Upper Bound	,411	,000

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: RMA ORANI

c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 1241531719.

Şekil 2.2. HDF oranına göre Asymp. Sig. değerleri

EK-3. HDF süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları

Ranks

	RMA SURESI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	1775	2759,84
	ORTA	1853	2769,03
	YUKSEK	1901	2765,89
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	1775	2667,62
	ORTA	1853	2756,93
	YUKSEK	1901	2863,78
	Total	5529	

Şekil 3.1. HDF süresine göre bağımlı değişkenlerin faktörleri

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			,031	13,940
df			2	2
Asymp. Sig.			,985	<,001
Monte Carlo Sig.	Sig.		,985[c]	,001[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,982	,001
		Upper Bound	,987	,002

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: RMA SURESI

c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 1556559737.

Şekil 3.2. HDF süresine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-4. Robot taşıma süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları

Ranks

	ROBOT TASIMA SURESI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	1934	2776,47
	ORTA	1949	2773,70
	YUKSEK	1646	2741,21
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	1934	2960,07
	ORTA	1949	2889,83
	YUKSEK	1646	2387,99
	Total	5529	

Şekil 4.1. Robot taşıma süresine göre bağımlı değişkenlerin faktörleri

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			,526	132,686
df			2	2
Asymp. Sig.			,769	<,001
Monte Carlo Sig.	Sig.		,763[c]	<,001[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,755	,000
		Upper Bound	,772	,000

a. Kruskal Wallis Test
b. Grouping Variable: ROBOT TASIMA SURESI
c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 215962969.

Şekil 4.2. Robot taşıma süresine göre göre Asymp. Sig. değerleri

EK-5. Robot alma-bırakma süresine göre Kruskal Wallis-H deney sonuçları

Ranks

	ROBOT YUKLEME SURESI	N	Mean Rank
COZUM SURESI	DUSUK	1853	2765,82
	ORTA	1864	2763,29
	YUKSEK	1812	2765,92
	Total	5529	
% GAP	DUSUK	1853	2827,35
	ORTA	1864	2803,97
	YUKSEK	1812	2661,15
	Total	5529	

Şekil 5.1. Robot alma-bırakma süresine göre bağımlı değişkenlerin faktörleri

Test Statistics[a,b]

			COZUM SURESI	% GAP
Kruskal-Wallis H			,003	11,613
df			2	2
Asymp. Sig.			,998	,003
Monte Carlo Sig.	Sig.		,998[c]	,005[c]
	95% Confidence Interval	Lower Bound	,997	,003
		Upper Bound	,999	,006

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: ROBOT YUKLEME SURESI

c. Based on 10000 sampled tables with starting seed 484067124.

Şekil 5.2. Robot alma-bırakma süresine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-6. Parça adedine göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	260271,500	,000
Wilcoxon W	1873977,500	2357706,000
Z	-47,046	-54,717
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001	<,001

a. Grouping Variable: PARCA ADET SINIFI

Şekil 6.1. Parça adedi düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	48406,000	,000
Wilcoxon W	1269109,000	2357706,000
Z	-50,733	-52,684
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001	<,001

a. Grouping Variable: PARCA ADET SINIFI

Şekil 6.2. Parça adedi düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	314139,500	,000
Wilcoxon W	1534842,500	1613706,000
Z	-38,881	-50,056
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001	<,001

a. Grouping Variable: PARCA ADET SINIFI

Şekil 6.3. Parça adedi orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-7. Parça işlem süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	1456898,000	1239028,500
Wilcoxon W	2570676,000	2352806,500
Z	-,640	-8,126
Asymp. Sig. (2-tailed)	,522	<,001

a. Grouping Variable: PARCA SURE SINIFI

Şekil 7.1. Parça işlem süresi düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	1494781,000	1146902,500
Wilcoxon W	3615551,000	2260680,500
Z	-1,368	-12,942
Asymp. Sig. (2-tailed)	,171	<,001

a. Grouping Variable: PARCA SURE SINIFI

Şekil 7.2. Parça işlem süresi düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP	COZUM SURESI
Mann-Whitney U	1948817,000	1975304,000
Wilcoxon W	4069587,000	3932535,000
Z	-2,365	-1,653
Asymp. Sig. (2-tailed)	,018	,098

a. Grouping Variable: PARCA SURE SINIFI

Şekil 7.3. Parça işlem süresi orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-8. HDF oranına göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1582044,000
Wilcoxon W	3183199,000
Z	-3,000
Asymp. Sig. (2-tailed)	,003

a. Grouping Variable: RMA ORANI

Şekil 8.1. HDF oranı düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1461776,000
Wilcoxon W	3062931,000
Z	-6,453
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001

a. Grouping Variable: RMA ORANI

Şekil 8.2. HDF oranı düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1626560,000
Wilcoxon W	3387186,000
Z	-3,692
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001

a. Grouping Variable: RMA ORANI

Şekil 8.3. HDF oranı orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-9. HDF süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1590828,500
Wilcoxon W	3167028,500
Z	-1,703
Asymp. Sig. (2-tailed)	,088

a. Grouping Variable: RMA SURESI

Şekil 9.1. HDF süresi düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1568003,000
Wilcoxon W	3144203,000
Z	-3,706
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001

a. Grouping Variable: RMA SURESI

Şekil 9.2. HDF süresi düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1692623,000
Wilcoxon W	3410354,000
Z	-2,068
Asymp. Sig. (2-tailed)	,039

a. Grouping Variable: RMA SURESI

Şekil 9.3. HDF süresi orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-10. Robot taşıma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1831689,000
Wilcoxon W	3731964,000
Z	-1,517
Asymp. Sig. (2-tailed)	,129

a. Grouping Variable: ROBOT TASIMA SURESI

Şekil 10.1. Robot taşıma süresi düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1267417,000
Wilcoxon W	2622898,000
Z	-10,525
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001

a. Grouping Variable: ROBOT TASIMA SURESI

Şekil 10.2. Robot taşıma süresi düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1307734,000
Wilcoxon W	2663215,000
Z	-9,559
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001

a. Grouping Variable: ROBOT TASIMA SURESI

Şekil 10.3. Robot taşıma süresi orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-11. Robot alma-bırakma süresine göre Mann-Whitney U deney sonuçları

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1712751,500
Wilcoxon W	3450931,500
Z	-,436
Asymp. Sig. (2-tailed)	,663

a. Grouping Variable: ROBOT YUKLEME SURESI

Şekil 11.1. Robot alma-bırakma süresi düşük ve orta faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1577528,000
Wilcoxon W	3220106,000
Z	-3,163
Asymp. Sig. (2-tailed)	,002

a. Grouping Variable: ROBOT YUKLEME SURESI

Şekil 11.2. Robot alma-bırakma süresi düşük ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

Test Statistics[a]

	% GAP
Mann-Whitney U	1601899,000
Wilcoxon W	3244477,000
Z	-2,701
Asymp. Sig. (2-tailed)	,007

a. Grouping Variable: ROBOT YUKLEME SURESI

Şekil 11.3. Robot alma-bırakma süresi orta ve yüksek faktör düzeylerine göre Asymp. Sig. değerleri

EK-12. Literatür araştırması

Yazar	Yılı	Makine tipi	Çizelgeleme problemi	Robotik hücre	Düğüm yapısı	HDF
Lu ve Gwo-Ji	2008	Özdeş paralel	✓			
Maecker, Shen ve Mönch	2023	Paralel makine	✓			
Chou-Jung, T.C.E. ve Dar-Li	2011	Paralel makine	✓			
Li, Bin ve Lei	2021	Paralel makine	✓			
Urbani, Brunelli ve Punkka	2023	Paralel makine	✓		✓	
Batur, Karasan ve Aktürk	2012	Paralel makine	✓	✓	✓	
Atabak ve Topaloğlu	2017	Birden fazla makine	✓	✓		
Soroush Fatemi ve diğerleri	2023	Birden fazla makine	✓	✓		
Tatiana, Yuriy ve diğerleri	2017	Paralel makine	✓			✓
Mosheiv ve Oron	2021	Tek makine	✓			✓
Hyunjoon ve Byung-In	2022	Tek makine	✓			✓
Phosavanh, Oron	2024	Tek makine	✓			✓

Şekil 12.1. Literatür araştırması

EK-13. Deney tasarımı sonucu

Kriter	GAP % Asymp. Sig.	Çözüm Süresi Asymp. Sig.
Parça Sayısı	<0,05	<0,05
Parça Süresi	>0,05	<0,05
HDF Oranı	<0,05	>0,05
HDF Süresi	<0,05	>0,05
Robot Taşıma Süresi	<0,05	>0,05
Robot Alma-Bırakma Süresi	<0,05	>0,05

Şekil 13.1. Deney tasarımı sonucu

EK-14. Faktör düzeylerine göre deney tasarımı sonucu

Kriter	Faktör Sınıfı	GAP % Asymp. Sig.	Çözüm Süresi Asymp. Sig.
Parça Sayısı	Düşük-Orta	<0,05	<0,05
	Düşük-Yüksek	<0,05	<0,05
	Orta-Yüksek	<0,05	<0,05
Parça Süresi	Düşük-Orta		<0,05
	Düşük-Yüksek		<0,05
	Orta-Yüksek		
HDF Oranı	Düşük-Orta		
	Düşük-Yüksek	<0,05	
	Orta-Yüksek	<0,05	
HDF Süresi	Düşük-Orta		
	Düşük-Yüksek	<0,05	
	Orta-Yüksek		
Robot Taşıma Süresi	Düşük-Orta		
	Düşük-Yüksek	<0,05	
	Orta-Yüksek	<0,05	
Robot Alma-Bırakma Süresi	Düşük-Orta		
	Düşük-Yüksek	<0,05	
	Orta-Yüksek		

Şekil 14.1. Faktör düzeylerine göre deney tasarımı sonucu



Gazili olmak ayrıcalıktır