

ERGONOMİK KARMA MODELLİ U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELMESİ

Mahammadalı NAHMATLI

Yüksek Lisans Tezi

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Öğr. Gör. Dr Banu GÜNER

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2021

ÖZET

ERGONOMİK KARMA MODELLİ U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ

Mahammadalı NAHMATLI

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2021

Danışman: Öğr. Gör. Dr Banu GÜNER

Bu çalışmada, Ergonomik Karma Modelli U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme (Ergo-KUMHD) Problemi ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, hem operatörlere ergonomik açıdan iş yükünü daha dengeli atamak hem de açılan iş istasyonu sayısını enküçükmektir. Böylece daha sürdürülebilir bir üretim akışı elde edilebilecektir. Çalışmada problemin çözümüne yönelik Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli geliştirilmiş ve makul sürede çözüm elde edilemeyen problemler için Genetik Algoritma (GA) yaklaşımıyla çözüm aranmıştır. Modelde ergonomik risk kapsamında, Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) yöntemi kullanılmış, uygulamada bir amortisör fabrikasından yapılan gözlemler sonucunda HMD skorları hesaplanmıştır. Matematiksel model çok amaçlı bir yapıda ele alınmış, hem HMD skoru enbüyük istasyonun HMD skor değeri hem de açılan iş istasyonu sayısı enküçüklenmeye çalışılmıştır. Modelde uygulama verilerinde karşılaşıldığı için, aynı iş istasyonuna atanmaması gereken iş elemanlarına yönelik ek kısıt yapısı da kullanılmıştır. Geliştirilen model için çözüm GUROBI kullanılarak elde edilmiştir. Ağırlıklı amaç fonksiyonu yapısı kullanıldığından, farklı ağırlık değerleri için çözümler analiz edilmiştir. Uygulama verileri için ergonomik riske yönelik amaç fonksiyonu ağırlığı daha küçük değerde kullanılsa bile, model çözümünde istasyonlara ergonomik açıdan daha dengeli atamalar elde edilmiştir. Makul sürede çözüm bulunamayan büyüklükte problem verileri için GA modeli geliştirilmiş, Python Programlama Dilinde kodlanmış, sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Karma Modelli U-tipi Montaj Hattı, Montaj Hattı Dengeleme, Ergonomik faktörler, Genetik Algoritma

ABSTRACT

ERGONOMIC MIXED MODEL U-TYPE ASSEMBLY LINE BALANCING

Mahammadalı NAHMATLI

Department of Industrial Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2021

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Banu GÜNER

In this study, the Ergonomic Mixed Model U-Type Assembly Line Balancing (Ergo-KUMHD) Problem is discussed. The aim of the study is to both assign the workload to the operators more balanced in terms of ergonomics and to minimize the number of workstations opened. Thus, a more sustainable production flow will be achieved. In the study, a mixed integer linear programming model was developed for the solution of the problem and a solution was sought with the Genetic Algorithm (GA) approach for the problems that could not be solved in a reasonable time. Within the scope of ergonomic risk, the Quick Exposure Check (QEC) method was used in the model, and QEC scores were calculated as a result of observations made in a shock absorber factory in practice. The mathematical model was handled in a multi-purpose structure, and both the QEC score value of the station with the largest QEC score and the number of opened workstations were tried to be minimized. Since it is encountered in the application data in the model, an additional constraint structure for the work elements that should not be assigned to the same workstation is also used. The solution for the developed model was obtained using GUROBI. Since the weighted objective function structure is used, solutions for different weight values are analyzed. Even if the objective function weight for ergonomic risk is used at a smaller value, it has been observed that the model makes a balanced assignment to the stations. Even though the weight is chosen for this purpose, it is an important contribution of the study to obtain more ergonomically balanced workstations. GA model was developed for large problem data that could not be solved in a reasonable time, coded in Python Programming Language, and results were presented comparatively.

Keywords: Mixed Model U-shaped Assembly Line, Assembly Line Balancing, Ergonomic factors, Genetic Algorithm.

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum tez çalışmamda, öncelikle beni yönlendiren, fikirleriyle bana yol gösteren, tezime yoğunlaşabilmem için bana çalışma ortamı sunan ve çalışmamın daha anlaşılır hale gelmesini sağlayan değerli danışman hocam Banu GÜNER'e ve bugünlere gelmemi sağlayan, beni her konuda destekleyen, bana güvenen, bana inanan ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mahammadalı NAHMATLI



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mahammadalı NAHMATLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. MONTAJ HATTI Dengeleme	12
3.1. Montaj Hattı Dengelemede Genel Kavramlar	12
3.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması.....	15
3.2.1. Dengeleme amacına göre sınıflandırma	15
3.2.2. Ürün çeşidine göre sınıflandırma.....	16
3.2.3. Hat(yerleşim) şekline göre sınıflandırma	17
3.2.4. Görev süreleri nin durumuna göre sınıflandırma	19
3.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları	20
4. ERGONOMİK YAKLAŞIM	22
4.1. Ergonomi ve Tanımı	22
4.2. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri.....	23
4.2.1. Çalışanlar tarafından yapılan öznel değerlendirme yöntemleri	23
4.2.2. Doğrudan ölçüm değerlendirme yöntemleri	24
4.2.3. Gözleme dayalı değerlendirme yöntemleri	25

4.3. Hızlı Maruziyet Değerlendirme (Quick Exposure Check -QEC)	26
5. ERGONOMİK KARMA MODELLİ U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELMESİ İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI.....	29
5.1. Ergo-KUMHD için Karma Tamsayı Programlama Yaklaşımı	29
5.1.1. Ergo-KUMHD için karma tamsayı programlama modeli	30
5.1.2. Karma Tamsayı Programlama Modeli için uygulama çalışması.....	33
5.2. Ergo-KUMHD için Genetik Algoritma Yaklaşımı.....	36
5.2.1. Genetik Algoritma	37
5.2.1.1 Kodlamaların sınıflandırılması	40
5.2.1.2 Seçim Mekanizmaları	41
5.2.1.3 Genetik Algoritma Operatörleri	43
5.2.1.4 Sonlandırma koşulları	45
5.2.2. Ergo-KUMHD için genetik algoritma modeli.....	46
5.2.3. Ergo-KUMHD genetik algoritma model uygulaması	50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKÇA.....	59
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Literatür araştırmasında erişilen, ergonomiyi dikkate alan çalışmaların özet bilgileri	11
Tablo 4.1. HMD için Ön Eylem Düzeyleri (McAtamney & Corlett, 1993).	27
Tablo 5.1. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=10$, $w_2=1$ değerleri için elde edilen çözüm.....	34
Tablo 5.2. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=100$, $w_2=1$ değerleri için elde edilen çözüm.....	34
Tablo 5.3. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=1$, $w_2=0$ değerleri için elde edilen çözüm.....	35
Tablo 5.4. Uygulama çalışması için GA'dan elde edilmiş istasyon HMD değerleri karşılaştırması	50
Tablo 5.5. GA modelinin uygulandığı test problemleri	52
Tablo 5.6. GA'nın parametreleri ve miktarları	52
Tablo 5.7. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinden elde edilen sonuçlar	53
Tablo 5.8. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinden elde edilen HMD skorlarının standart sapması.....	54
Tablo 5.9. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinin test problemlerinde gerçekleşen çözüm süreleri	55
Tablo 5.10. Örnek problemlerin çözümlerinin karşılaştırılması	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Geleneksel montaj hattı	12
Şekil 3.2. Öncelik diyagramı	13
Şekil 3.3. Tek model, çok modelli, karma modelli montaj hatları	16
Şekil 3.4. U – tipi montaj hattı.....	18
Şekil 3.5. Çözüm yaklaşımlarının ortak aşamaları	20
Şekil 3.6. Montaj hattı dengelemede kullanılan bazı çözüm yaklaşımlarının sınıflandırılması (Grzechca, 2011).....	21
Şekil 5.1. İstasyonların HMD skorlarının çözümlere göre dağılımı.....	36
Şekil 5.2. Ağırlık değerlerinin istasyon sayısı ve HMD skorlarına etkisi.....	36
Şekil 5.3 Geleneksel (a) ve genetik (b) yaklaşımların karşılaştırılması (Gen, Cheng, & Lin, 2008)	38
Şekil 5.4. Çözüm uzayı ve arama uzayı arasındaki geçiş (Rekiek & Delchambre, 2005)	39
Şekil 5.5. GA’da kullanılan farklı kodlama biçimleri	41
Şekil 5.6. Rulet Çarkı	42
Şekil 5.7. Genel çaprazlama örneği	43
Şekil 5.8. Sıralı çaprazlama (Davis` Order Crossover-OX1) örneği	44
Şekil 5.9. Komşu iki genin değiştirilmesi.....	45
Şekil 5.10. İkili yer değiştirme operatörü	45
Şekil 5.11. Ergo-KUMHD için GA’nın sözde kodu(pseudocode)	47
Şekil 5.12. Örnek problem için kodlama örneği.....	47
Şekil 5.13. Rulet çarkı yöntemiyle örnek problem için seçilmiş iki ebeveyn	48
Şekil 5.14. Örnek problem için OX1 Çaprazlama örneği.....	49
Şekil 5.15. Örnek problem için Swap (takas) örneği.....	49
Şekil 5.16. Uygunluk değeri en iyi olan kromozom	49
Şekil 5.17. Yakınsama grafiği	50
Şekil 5.18. İstasyonların HMD skorlarının çözümlere göre dağılımı.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MHD	: Montaj Hattı Dengeleme
GA	: Genetik Algoritma
COMSOAL	: Computer Method For Sequencing Operations For Assembly Lines
KMHDP	: Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi
ÇMHDP	: Çok Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi
OCRA	: The Occupational Repetitive Actions
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
KMHD	: Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme
MHDP	: Montaj Hattı Dengeleme Problemi
REBA	: Rapid entire body assessment
RULA	: Rapid Upper Limb Assessment
OWAS	: Ovako Working Posture Analysis System
HMD (QEC)	: Hızlı Maruziyet Değerlendirme
Ergo-KUMHD	: Ergonomik Kısıtlı Karma Modelli U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme
KİSH	: Kas-İskelet Hastalıkları

1. GİRİŞ

Montaj hattı ilk olarak Henry Ford tarafından, 19. yüzyılın başlarında ürün üretmenin en verimli yolu olarak tasarlanmıştır. İlk montaj hattı, her iş istasyonunun bir malzeme taşıma ekipmanı ile bağlanmasıyla, düz bir şekilde tasarlanmış bir sıra iş istasyonundan oluşturulmuştur. Ürünün montaj hattı üzerindeki yolculuğu, hammadde ya da yarı mamulün ilk istasyona önceden belirlenmiş bir besleme hızında girmesi ile başlar. Montaj hattında ürün üzerinde, atanan görevlerin gerçekleştirildiği herhangi bir nokta, iş istasyonu olarak kabul edilir. Bu görevler makine, robot ve operatörler tarafından gerçekleştirilebilir. Ürün bir iş istasyonuna geldiğinde istasyona atanan görev gerçekleştirilir ve ürün bir sonraki istasyona doğru hareket eder. Ürünün son haline gelmesi için gereken tüm görevler tamamlanana kadar, yani montaj hattının sonuna ulaşıp paketlenmesine kadar süreç devam eder. Genellikle üretim süreçlerinin son aşamalarını oluşturan montaj hatlarının performansı, genel performans üzerinde önemli etkiye sahiptir. Birçok sayıda işletme, üretim süreçlerinin performansını arttırmak için, montaj hatlarını kullanmakta ve diğer üretim aşamaları ile dışarıdan tedarik edilecek mamullerin akış hızlarını montaj hatlarının ihtiyacına göre ayarlamaktadır. Montaj hatlarında dengeleme sonrası dengenin sürdürülebilirliği önemlidir. Sürdürülebilirliği sağlamak adına son yıllarda, montaj hattı dengeleme sırasında ergonomik faktörleri dikkate alan çalışmalarda artış görülmektedir. Bu çalışmada, ergonomik faktörleri dikkate alarak çözüm aranan montaj hattı dengeleme literatüründe göz önünde bulundurulmamış karma modelli U-tipi montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Çalışmada, Ergonomik Karma Modelli U-tipi Montaj Hattı Dengeleme (Ergo-KUMHD) problemi için bir KTDP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelle, istasyonlara atanan işlerin ergonomik risk değerlendirme yöntemi olan Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) skorlarının ve iş istasyonu sayısının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Önerilen modelin uygulanması için, otomotiv alanında faaliyet gösteren bir fabrikada vaka çalışması yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Geliştirilen model küçük büyüklükte problem türlerinde kabul edilebilecek sürede çözüm sunabilmiştir. Ancak büyük ve orta boyutlu problemlerde hem ergonomik amacın hem de problemin boyutunun büyümesinin etkisiyle modelin çözüm süresi uzadığı için ve iş ortamında hızlı karar alma gerekliliği göz önünde bulundurulduğundan, problemi daha hızlı çözebilmek için meta-sezgisel yöntemlerden genetik algoritma yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu tez, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde, montaj hattı dengeleme problemine, karma montaj hatları, U-tipi montaj hatları ve montaj hatlarına ergonomik açıdan yaklaşımla ilgili literatür incelemesi sunulmuştur. Üçüncü bölümde, montaj hattı hakkında genel kavramlar, montaj hattı problemleri ve çözüm yaklaşımları tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, Ergonomi ve tanımı, ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ve çalışmada ergonomik risk değerlendirme yöntemi olarak kullanılan Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) yöntemi ele alınmıştır. Beşinci bölümde, Ergonomik Karma Modelli U-tipi Montaj Hattı Dengeleme (Ergo-KUMHD) problemi için geliştirilen çözüm yaklaşımları sunulmuştur. Çözüm kapsamında birinci yaklaşım olarak, geliştirilen KTDP tanıtılmış ve bir amortisör fabrikasında gerçekleştirilen uygulama çalışması sonuçları değerlendirilmiştir. Beşinci bölümün devamında, ikinci yaklaşım olarak daha büyük boyutlu problemlerde daha kısa sürede uygun çözüme ulaşabilmek için kullanılan genetik algoritma yaklaşımı tanıtılmış, Ergo-KUMHD için geliştirilen model açıklanmış, uygulama verileri ve test problemleri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde ise, çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Miltenburg ve Wijngaard'ın çalışması (1994), U-tipi montaj hattına yönelik yapılan ilk çalışmadır. Bu çalışmada ilk defa U-tipi montaj hattının dengeleme problemi tanıtılmış, modellenmiş ve çözüm prosedürleri gösterilmiştir. Ek olarak, geleneksel montaj hattı dengeleme problemi için geliştirilmiş çözüm tekniklerinin yeni probleme de uyarlanabileceği gösterilmiştir.

Fokkert ve Kok (1997), Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemini(KMHDP) iki farklı yaklaşımla ele almışlardır. Bu yaklaşımlar; birleştirilmiş öncelik diyagramları ve belirlenmiş işlem süresi yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımların her ikisinde KMHDP'ini tek modelli MHDP'ye dönüştürerek çözüm aramışlardır.

Urban (1998), U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için en basit ve anlaşılabilir model sunar. Bu modelin, Miltenburg ve Wijngaard'ın önerdiği modelin çözebildiği problemlerden daha büyük problemleri en iyi şekilde çözebileceği gösterilmiştir. Urban'ın çalışması U-tipi montaj hattı dengeleme problemi çözümünün temelini oluşturmaktadır.

Miltenburg J. (2002), çalışmada U-tipi karma asenkron montaj hattını ele almıştır. Çalışmada iki önemli problemi çözmeye çalışmıştır. Birincisi, montaj hattındaki istasyonlara görevlerin atanması yani hat dengelemesi, ikincisi ise modellerin üretileceği sıranın seçilmesidir.

Gökçen vd. (2004), U-tipi montaj hattı dengeleme probleminde en kısa hat uzunluğu elde etmek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır.

Gökçen ve Ağpak (2004), U-tipi montaj hattı dengeleme problemine yönelik çok kriterli karar verme yaklaşımı uygulanan ilk çalışmadır. Önerilen model, farklı alternatiflerin değerlendirilmesinde karar vericiye daha fazla esneklik sağlamaktadır.

Aase vd. çalışmalarında (2004), neden düz montaj hattı yerine U-tipi montaj hattının kullanılmasının verimliliği artıracığını açıklamışlardır.

Boysen vd. (2007), gerçek hayattaki dengeleme problemlerinin gereklilikleri ile araştırmalar arasında önemli bir boşluk olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bunun çalışmalarına olan etkisini ortadan kaldırmak, araştırmacılar ve uygulayıcılar arasındaki

iletişimi kolaylaştırmak için montaj hattı dengeleme probleminin bir sınıflandırma şemasını sunmuşlardır.

Baykasoğlu ve Özbakır (2007), U-tipi montaj hatlarını stokastik görev süreleri ile dengelemek için yeni çoklu kural tabanlı genetik algoritma (GA) önermişlerdir. Önerilen algoritma COMSOAL yöntemini, görev atama sezgisel yöntemlerini ve GA'yı sorunsuz bir şekilde bütünleştirmektedir. Önerilmiş algoritmada on farklı görev atama sezgisel yöntemi kullanılmıştır. Görev sürelerinin normal dağıldığı varsayılmıştır. Önerilen algoritma, mevcut literatürden farklı çevrim sürelerine sahip yedi test problemi üzerinde test edilmiştir. Algoritma, bir test problemi hariç, mevcut sonuçlardan çok daha kısa çözüm sürelerinde uygun çözümleri bulmuştur. Önerilen GA'nın küçük boyutlu problemleri makul sürelerde çözebileceği sonucuna varılmıştır.

Eryuruk vd. (2008), iki farklı sezgisel yöntem kullanarak çözüm bulmuşlardır. Bunlardan biri Helgeson ve Birnie tarafından geliştirilen “Pozisyon Ağırlığı Yöntemi”, diğeryse El-Sayed ve Boucher tarafından geliştirilmiş olan “Olasılıklı Hat Dengeleme Yöntemi” dir. Bu yöntemler iki model için bir giyim firmasında çok modelli montaj hattı dengelemesinde kullanılmıştır. İki farklı yöntemi de uygulayarak, elde edilen dengeleme sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Bagher vd. (2011), iş istasyonlarının sayısını, her bir istasyondaki boş kalma süresini enküçükmek amacıyla stokastik U-tipi montaj hattı problemini çözmek için yeni evrimsel emperyalist rekabetçi algoritmayı (ERA) incelemişlerdir. Önerilen yöntem üç test problemi kategorisinde (küçük, orta ve büyük) test edilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre, önerilen algoritmanın GA'dan daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. ERA, GA'dan daha yüksek bir yakınsama hızına sahiptir ve daha kısa hesaplama süresi içinde daha iyi bir çözüme ulaşılmıştır.

Otto ve Scholl (2011), montaj hatlarının ergonomik faktörler dikkate alınarak yeniden dengelenmesi üzerine çalışmışlardır. Aynı zamanda, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin çoğu doğrusal olmayan fonksiyonlar içermesine rağmen, düşük ek hesaplama maliyetiyle montaj hattı dengeleme tekniklerine entegre edilebileceği gösterilmiştir.

Battini vd. (2011), Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde ergonomik risk kavramının dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Ergonomik risk kavramı,

görevlerin türüne ve işlem süresine göre ergonomik risk kategorisine bağlı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, postüral yükler, tekrarlayan hareketler ve manuel kullanım gibi risk faktörlerinin çeşitli değerlendirme yöntemlerini birleştiren bir risk kategorisi sınıflandırması önerilmiştir.

Mutlu ve Özgörmüş (2012), işe bağlı kazaları azaltmak için fiziksel iş yüklerini hesaba katan yeni bir montaj hattı dengeleme çözümü sunmuşlardır. Önerdikleri modeli vaka çalışması olarak, bir tekstil fabrikasının montaj hattında uygulamışlardır.

Güner ve Hasgöl (2012), operatörlerin performans faktörlerine, kullanılan enerji miktarına ve görevler arasındaki uyumsuzluğa dayalı U-tipi montaj hattı dengeleme problemine yeni bir matematiksel model sunmuşlardır. Söz konusu problemlerle başa çıkmak için ergonomik faktörleri de içeren bir tamsayılı programlama modeli önerilmektedir.

Valhondo vd. (2013), Zaman ve Yer kısıtlamalı Montaj Hattı Dengeleme Problemine yönelik, ergonomik risk kısıtlarını içeren bir model sunmaktadır. Bu modelde ergonomik risk ile görev süreleri dikkate alınmaktadır. Değişken talep dikkate alınarak otomobil endüstrisindeki motor montaj hattına bağlı bir vaka ile model test edilmiştir.

Sawsan ve Fatih (2013), Çok Modelli Montaj Hattı Dengelemesi Problemini (ÇMHDP) çözmek için Pozisyon Ağırlığı Yöntemini kullanmışlardır. Araştırma, vaka çalışması olarak Irak Sanayi ve Mineraller Bakanlığı'nın bağlı şirketlerinden biri olan Al-Fida'a Company'de gerçek üretim ortamında uygulanmıştır.

Liao (2014), Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemini (KMHDHP) ve ÇMHDP'yi iki açıdan ele almıştır. İlk olarak KMHDHP ve ÇMHDP için iki amaçlı bir matematiksel model oluşturulmuştur. Modeldeki ilk amaç, belirli sayıda iş istasyonu için çevrim süresini enküçükmek, ikinci amaç yatay dengeleme yani iş gören sayısını en küçükmektir. Yatay dengeleme derecesini temsil etmek için üç tür amaç fonksiyon kullanılmıştır.

Baykasoğlu ve Akyol (2014), montaj hatları ergonomik açıdan iyi tasarlanmadığında, verimlilik kayıplarına sebep olacağını, işçilerde meslek hastalıklarına ve hatta kalıcı hasarlara yol açabileceğini anlatmış, montaj hatlarının ergonomik açıdan tasarlanmasına dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada, ergonomik risk seviyesi belirlemede

son derece etkin bir yöntem olan The Occupational Repetitive Actions (OCRA) indeksi kullanılmıştır.

Battini vd. (2015), ergonomik etkenler ekleyerek montaj hattı dengeleme problemini çözmeye çalışmışlardır. Yeni anlayışlar sağlamak ve didaktik örnek üzerinde kullanımlarını göstermek için iki farklı yaklaşım sayısal örneklerle sunulmaktadır. Birincisi, ergonomik risk seviyesini değerlendirmek için enerji harcamasına dayanan çok amaçlı bir model uygulamasıdır. İkincisi, çok amaçlı problemi tek amaca indirmek için görevlerdeki enerji harcama miktarını dinlenme süresiyle azaltmaya çalışmışlardır.

Battini vd. (2016), ergonomik etkenleri de dikkate alacak şekilde montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için yeni çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, iş istasyonlarının temel özelliklerine dayanarak, gereken enerji düzeylerini hızlı bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olan “Önceden Tanımlanmış Hareket Enerji Sistemi” adı verilen yeni bir teknik kullanılmıştır. Sonraki aşamada, eniyi çözümlerin etkin sınırlarını tanımlamak için dört farklı amaçtan oluşan amaç fonksiyonu sunulmuştur.

Battini vd. (2016), Entegre Montaj Hattı Dengeleme ve Parça Besleme Problem'ini ele almış ve iki alternatif parça besleme yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Ayrıca, yorulma ve enerji kayıplarından kurtulmak için manuel görevlerin işlem sürelerini zaman artışıyla artırarak ergonomik riskler de çalışmaya dahil edilmiştir.

Bautista vd. (2016), ergonomik özellikleri dikkate alarak montaj hattı dengeleme problemini çözmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Birkaç matematiksel model oluşturulmuştur. Bu modellerden biri, Nissan fabrikalarında vaka çalışması yapılarak incelenmiştir. Ayrıca talep planı varyasyonlarının ve ergonomik riskin hat dengeleme sonucu üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Bautista, vd. (2016), KMHD`de operatör konforunu en üst düzeye çıkarmayı hedeflemişlerdir. Bu amaca ulaşmak için iki MHD modelini değerlendirmişlerdir. Birincisinde maksimum ergonomik riski en küçükleme ve ikincisinde ergonomik riskin ortalama mutlak sapmalarını enküçükleme amaçlanmıştır. Vaka çalışmaları yaparak, iki modelin sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Akyol ve Baykasoğlu (2016), ergonomik riskleri dikkate alan Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemi hakkında çalışma yapmışlardır. Ergonomik risk

değerlendirmesi yapmak için OCRA yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen çözüm yaklaşımının performansını değerlendirmek amacıyla literatürde olan karşılaştırma verileri kullanılmıştır.

Baykasoglu vd. (2017), ergonomik risk faktörlerini göz önünde bulundurarak üç alt problemten oluşan sistematik bir yaklaşım önermişlerdir. İlk iki alt problemde, ergonomik risklerin OCRA yöntemi ile değerlendirilmesi sonrasında, kural tabanlı yapıcı arama algoritması kullanılarak çözüm aranmaktadır. Daha sonra yerleşim sorunu, çeşitli komşuluk ilişkisine sahip yerel arama yöntemleri kullanılarak, ulaşım kısıtlamaları altında çözülmektedir. Önerilen sistematik yaklaşımın uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek için, araçlar için kablo ağı üreten bir firmada uygulama yapılmıştır.

Bortolini vd. (2017), MHDP için geliştirdikleri modelde, görev atama, parça temini sırasında ortaya çıkan süreler ve ergonomik riskin azaltılmasını hedeflemişlerdir. Çok amaçlı optimizasyon modeli, mutfak cihazları üreten fabrikanın montaj hattında test edilmiştir.

Botti vd. (2017), hibrit montaj hatlarını dengelemek için yeni bir matematiksel model sunmuşlardır. Montaj hattı dengelemeye ergonomik gereksinimleri dahil ederek etkili ve verimli bir montaj hattı dengelemesi sağlanmaktadır. Üretim gereksinimleri, ürün özellikleri ve görevleri göz önüne alındığında, model manuel, otomatik montaj makineleri ve hibrit montaj hatları için dengelemeyi sağlamıştır. Model, alet takımları üretimi yapan montaj hattında test edilmiştir.

Pearce vd. (2018), gerçek üretim ortamına dayanan görevler arası ilişkiler, istasyon özellikleri sınırlama ataması ve paralel işçi etkileşimleri için çeşitli uzantılar içeren karma hat dengeleme modeli sunmuşlardır. Uygulanan yeni çözüm yöntemi test edilerek, çözüm kalitesini ve çalışma süresini ölçen deneyler yapılmıştır. Bununla da geliştirilmiş modelin gerçek problemler için uygun bir çözüm yöntemi olduğu gösterilmiştir.

Tiacci ve Mimmi (2018), OCRA endeksini, ergonomik risk değerlendirmesi için bir yöntem olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve dengelenmesini entegre edebilen genetik bir algoritma yaklaşımı önerilmektedir. Yaklaşım, gerçek endüstriyel vakaların karmaşık senaryosunun birçok özelliğini dikkate alarak montaj hattı dengelemesine olanak sağlamaktadır. Önerilen

yaklaşımı kullanarak ergonomik etkenleri dikkate alan modelin ek maliyetlerinin fazla olmayacağı ileri sürülmektedir.

Arkhipov vd. (2018), montaj hatlarındaki uzun süreli döngüsel ergonomik riskleri dikkate alan bir model geliştirmişlerdir. Mevcut ergonomik riskleri göz önünde bulundurarak görevleri planlamak ve gerekli görevleri insan operatörlere atamak için yeni bir optimizasyon yöntemi de sunmaktadırlar.

Tiacci (2018), montaj hatlarındaki işçilerin dinlenme süreleri yani Dinlenme Süresi Atama Problemini dikkate almıştır. Çalışmada, dinlenme süreleri atamalarının Karma Model Montaj Hatlarında (KMHD) çalışan işçileri ergonomik açıdan nasıl etkilediği gösterilmiştir.

Kenger, vd. (2018), İnşaat ve tarım araçlarının üretimini yapan bir fabrikada, REFA (Reichsausschuss Für Arbeitszeitermittlung) standartlarında iş örnekleme uygulaması. Örnekler istatistiksel yöntemlerle belirlenmiş ve verimli olmayan süreleri ortadan kaldırmak için bazı öneriler sunulmuştur.

Şahin ve Kahya (2018), beyaz eşya üreten işletmede Tek Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemini ergonomik risk faktörlerini dikkate alarak çözmüşlerdir. Görevlerin risk puanları Rapid Entire Body Assessment (REBA) yöntemi ile hesaplanmıştır. İş yükü ve iş istasyonu sayısını belirlemek için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Her iş istasyonu için maksimum REBA puanı 10 olarak belirlenmiş ve modelin kısıtlarına eklenmiştir. Model General Algebraic Modeling System (GAMS) paket programı ile çözülmüştür.

Kahya vd. (2018), montaj hattı dengeleme problemi için ergonomik riskleri dikkate alan yeni bir model yaklaşımı ele almışlardır. Önerilen modelin çözülmesi için COMSOAL algoritması kullanılmıştır. Ergonomik riski değerlendirme kapsamında REBA yöntemi kullanılmıştır. Modeli klasik montaj hattı dengeleme teknikleriyle karşılaştırmak için çevrim süresi ve ergonomik risk seviyesinin birleşimi olan bir performans kriteri tanımlanmıştır. Geliştirilen model fırın üreten bir fabrikanın montaj hattında uygulanmıştır.

Alkan ve Ilgin (2018), bir elektronik şirketinin ana montaj hatlarının ergonomik değerlendirmesi için üç kademeli yaklaşım önermişlerdir. İlk kademede ana montaj hatları üç farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

İkinci kademede, en kötü ergonomik risk değerlerine sahip montaj hattını belirlemek için çok kriterli karar verme teknikleri kullanılmıştır. Üçüncü kademede, hatların katma değersiz süreleri zaman etüdü ile hesaplanmıştır. Ergonomik koşullar ile katma değeri olmayan süreler arasındaki ilişki bir korelasyon analizi yapılarak belirlenmiştir. Kötü ergonomik koşulların katma değeri olmayan süreleri artırdığı sonucuna varılmıştır.

Gürleyen ve Kahya (2018), kombi üreten fabrikanın montaj hattındaki 62 operasyonun ergonomik risk seviyelerini REBA yöntemi ile analiz etmiş ve 15 istasyonun ortalama risk skorlarını hesaplamışlardır. Değerlendirme sonucunda, ağır yüklerin bükülmesi ve kaldırılması nedeniyle iş kaza riskini azaltmak için bazı değişiklikler yapılması önerilmektedir. Önerilen yöntemler uygulandıktan sonra, montaj hattındaki tüm istasyonların ergonomik risk seviyelerinin önemli ölçüde azaldığını ve kas-iskelet sisteminde meydana gelen rahatsızlıkların amaçlandığı gibi iyileştiğini göstermektedirler.

Özkaya vd. çalışmalarında (2018), Denizli'de bulunan mobilya fabrikasında montaj hattını incelemişlerdir. Fabrikanın çalışma koşulları ergonomik bakış açısıyla incelenmiştir. Montaj hatlarındaki işçilerin iş duruşlarındaki yük ve gerilmeleri belirlemek için video kayıt yöntemi ile veriler toplanmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde Ovako Working Posture Analysis System (OWAS) yöntemi kullanılmaktadır. Değerlendirmeler sonucunda, bazı iş istasyonlarında çalışma ortamı ve çalışan ile uyumsuzluğun çok yüksek olduğu ve çalışanların yüksek riskli operasyonlar yaptıkları tespit edilmiştir.

Mura ve Dini (2019), enerji harcamasına dayalı ergonomik faktörleri dikkate alan montaj hattı dengeleme problemini çözmek için çok amaçlı genetik algoritma önermektedirler. Çalışmanın amaçları, iş istasyonu sayısını enküçükmek ve ergonomik iyileştirme sağlamaktır. Kurulan model bir vaka çalışmasında test edilmiştir.

Mattos vd. (2019), üretim hattında yer alan faktörler için Sistem Dinamiği uygulamışlardır. Çalışmada, çevrim süresini TAKT süresine yakın ayarlamının, her döngünün sonunda daha kısa mola süreleri nedeniyle aşırı yüklenmeye yol açtığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, mola süresinin azaltılması ve işçilerin fizyolojik olarak toparlanması yoluyla verimlilik kazanımları arasında bir denge aramak gerektiği kanısına varılmıştır.

Asl vd.(2019), KMHDP için çok amaçlı bir karma doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Önerilen modelde aynı anda üç amaç dikkate alınmıştır. Her model için çevrim süresini enküçükmek, aynı iş istasyonlarına atanan ortak görev sayısını ve iş istasyonları arasındaki iş yükü dağılım düzgünlüğünü en üst düzeye çıkarmak. Tüm ortak görevler aynı iş istasyonlarına atanmış ve eniyi düzeyde iş yükü dağılımı çözümü elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, literatür araştırması kapsamında 41 çalışma ele alınmıştır. Bu çalışmaların tamamını kapsayan özet bilgiler EK-1`de tablo olarak sunulmuştur. İncelenmiş çalışmaların %65`inde ergonomik etkenlerin dikkate alındığı görülmüştür. Bu çalışmaların özet bilgileri Tablo 2.1`de görülmektedir. Yapılan araştırmalar literatürde montaj hattı dengeleme problemlerinde ergonomiyi dikkate alan çalışmalar bulunduğunu göstermektedir. Ancak montaj hattı yerleşimi U-tipi ve karma modellenli üretim söz konusu olduğunda iş yükü artmasına rağmen ergonomiyi dikkate alan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmada, montaj yerleşimi U-tipi olduğunda ve karma modellenli üretim söz konusu olduğunda operatörlerin iş yükünü ergonomik açıdan dengelerken, iş istasyonu sayısını da göz ardı etmeyen bir çözüm önerisi sunmak amaçlanmıştır. Kısaca Ergo-KUMHD olarak adlandırılan Ergonomik Karma Modelli U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi için bir KTDP modeli ve genetik algoritma yaklaşımı geliştirilmeye çalışılmıştır.

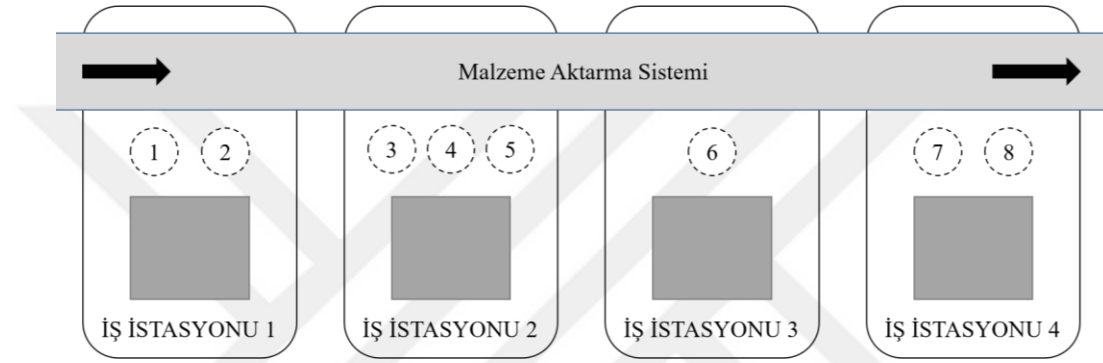
Tablo 2.1. *Literatür araştırmasında erişilen, ergonomiyi dikkate alan çalışmaların özet bilgileri*

Yazar(lar)	Problem özelliği	Çözüm yöntemi	Ergonomik
Otto ve Scholl (2011)	Ergo-MHD	Tavlama Benzetimi	OCRA
Battini vd. (2011)	MHD	Simülasyon	OWAS
Mutlu ve Özgörmüş (2012)	MHD	Bulanık doğrusal programlama	Fiziksel iş yükü
Güner ve Hasgöl (2012)	UMHD	Tamsayılı Programlama Modeli	Enerji düzeyi
Valhondo vd. (2013)	Zaman ve Yer kısıtlamalı Montaj Hattı Dengeleme	Matematiksel Model	OCRA, NIOSH, RULA
Battini vd. (2015)	MHD	Çok Amaçlı Matematiksel Model	Enerji düzeyi
Battini vd. (2016)	MHD	Çok Amaçlı Matematiksel Model	Önceden Tanımlanmış Hareket Enerji Sistemi
Battini vd. (2016)	Montaj Hattı Dengeleme ve Parça Besleme	Matematiksel Model	Enerji düzeyi
Bautista vd. (2016)	KMHD	Matematiksel Model	OCRA, NIOSH, EAWS
Bautista, vd. (2016)	MHD	KTDP ve Açgözlü Arama prosedürü	OCRA, NIOSH, RULA
Akyol ve Baykasoğlu (2016)	Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme	Kural Tabanlı Arama algoritma	OCRA
Baykasoglu vd. (2017)	MHD	Kural Tabanlı Arama algoritma	OCRA
Bortolini vd. (2017)	Montaj Hattı Dengeleme ve Parça Besleme	Çok amaçlı Matematiksel Model	REBA
Botti vd. (2017)	Hibrit MHD	Tamsayılı Programlama Modeli	OCRA
Tiacci ve Mimmi (2018)	MHD	Genetik algoritma	OCRA
Arkipov vd. (2018)	MHD	TDP ve Kısıt programlama	OCRA
Tiacci (2018)	KMH için Dinlenme Süresi Atama	Matematiksel Model	OCRA
Kenger vd. (2018)	MH için İş örnekleme	-	REFA
Şahin ve Kahya (2018)	MHD	Matematiksel Model	REBA
Kahya vd. (2018)	MHD	COMSOAL	REBA
Alkan ve Ilgin (2018)	MHD	Çok kriterli karar verme	NIOSH
Gürleyen ve Kahya (2018)	MH için İş örnekleme	-	REBA
Özkaya vd. (2018)	MH için İş örnekleme	-	OWAS
Mura ve Dini (2019)	MHD	Çok Amaçlı Genetik algoritma	Enerji düzeyi
Mattos vd. (2019)	MHD	-	EWA
Asl vd. (2019)	MHD	Çok Amaçlı KTDP	İş yükü

3. MONTAJ HATTI DENGELEME

Bu bölümde, Montaj hattı dengeleme hakkında bilgilere yer verilmiştir. Montaj hattı dengeleme genel kavramlar, MHDP'nin sınıflandırılması, çözüm yaklaşımları gibi başlıklar ele alınmıştır.

Montaj hatları, bir ürünü seri üretmek için özel bir şekilde tasarlanmış bir plandır. Ana hatlarıyla ele alırsak montaj hattı, sadece temel parça olarak girip özel olarak tasarlanmış malzeme taşıma sistemlerinin yardımıyla, iş istasyonlarında aşamalı olarak işlem görüp montaj hattının sonundan nihai ürün olarak çıkmasını ifade etmektedir.



Şekil 3.1. Geleneksel montaj hattı

Montaj hatlarının temel özelliklerinden birisi de üretilen ürünün parçalarının farklı zaman birimlerinde, farklı tesisler de üretilen birden fazla parçadan oluşmasıdır. Bu geniş tanımlama farklı montaj hattı sınıflandırmasını da ortaya çıkarmıştır. Montaj hatları malzeme taşıma şekline (bant veya makaralı konveyör, gezer vinç), hat yerleşim konfigürasyonuna (düz, U-tipi, çift taraflı, paralel vb.), görev sürelerine (deterministik, stokastik), hattın ilerleme kontrolüne (mekanik, işçi), ürün sınıflandırmasına (tek modelli, çok modelli, karma modelli) göre farklı tipte problem yapıları olarak karşımıza çıkabilmektedir. Kurulan bu hatlarda oyuncaklar, aletler, otomobiller, kıyafetler ve çok çeşitli elektronik bileşenler üretilmektedir. Montaj hatlarında üretim akışı sürecinde operatörlerin ve tamponların dengelenmesi önemli bir problemdir. Montaj hatlarındaki en önemli kriter, tüm istasyonlara dengeli iş yükü atmasıdır (Suresh & S.Anil, 2008).

3.1. Montaj Hattı Dengelemede Genel Kavramlar

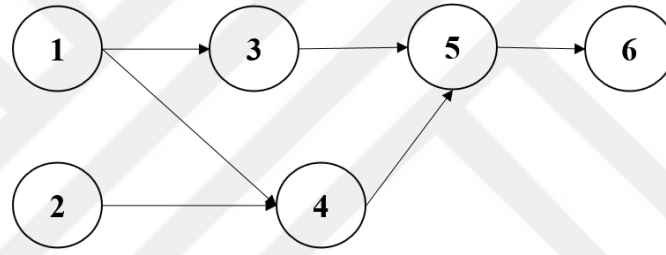
Bu bölümde, MHD problemini daha iyi anlamak için bazı terimler ve notasyonlar tanıtılmaktadır.

Görev

Montaj hattındaki toplam işin küçük parçasıdır. Görevi gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan süreye görev süresi denir. Görevler, montaj hattının en küçük iş ögesi kabul edilmektedir ve ihtiyaç duyulmayan ek işler olmadan daha küçük iş ögelerine bölünemezler (Rekiek & Delchambre, 2005).

Öncelik kısıtları ve diyagramı

MHD probleminde bir iş istasyonuna, bir görevi atarken, öncelik ilişkilerine dikkat edilerek atama yapılması gereklidir. Öncelik diyagramı bu ilişkileri açık şekilde gösteren bir tür grafiktir. Şekil 3.2’de örnek bir öncelik diyagramı verilmektedir. Burada düğümler görevleri ve yönlendirilmiş oklar (i, j) öncelik ilişkilerini temsil etmektedirler. Şekilden de anlaşılacağı üzere görev 4’ten önce görev 1 ve 2, görev 5’den önce de görev 3 ve 4 tamamlanmış olmalıdır (Suresh & S.Anil, 2008).



Şekil 3.2. Öncelik diyagramı

Çevrim süresi (C)

Çevrim süresi, başarılı iki ardıl ürünün montaj hattı sonundan tamamlanmış halde çıkışları arasındaki zaman farkıdır. Başka bir ifadeyle montaj hattında olan iş istasyonlarına atanmış görevlerin tamamlanması için ayrılan süredir. Bu süre tüm istasyonlar için eşittir. Aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Suresh & S.Anil, 2008).

$$C = T/D \quad (3.1)$$

Burada T-Toplam kullanabilir süre, D- talep/üretim miktarıdır.

Toplam iş süresi (T)

Montaj hattında ürünün tamamlanması için ihtiyaç duyulan sürelerin toplamıdır, yani tüm görevlerin süre toplamıdır (Grzechca, 2011).

$$T = \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.2)$$

Burada, N: görev sayısı, t_i : i'inci görevin işlem süresidir.

İstasyon süresi (ST)

İstasyona atanan görevlerin süre toplamı İstasyon Süresi olarak ifade edilmektedir. Montaj hattındaki tüm istasyonların süre toplamı, toplam iş süresine eşittir. (Grzechca, 2011).

İstasyon boş kalma süresi

İstasyon boş kalma süresi, çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki pozitif farktır. (Rekiek & Delchambre, 2005);

$$I = C - ST \quad (3.3)$$

Tüm istasyonların boş kalma süre toplamı Denge Gecikmesi olarak tanımlanmaktadır.

Denge Gecikmesi

Montaj hattındaki iş istasyonları arasında görevlerin dengesiz atanmasından kaynaklı oluşmuş boş süre oranıdır. Tek bir istasyon için o istasyonun boş kalma süresinin çevrim süresine oranıyla hesaplanmaktadır. Bulunan sonuç o istasyonun verimsizliğini ölçmekte kullanılmaktadır (Suresh & S.Anıl, 2008).

$$d_j = \frac{C - T_j}{C} \quad (3.4)$$

Burada, C : çevrim süresini T_j : j. istasyonun süresini göstermektedir.

Tüm hat için hesaplanması gerektiğinde izleyen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada N : görev sayısı, t_i : i. görev süresini, m ise istasyon sayısını göstermektedir

$$d = \frac{m * C - \sum_i^N t_i}{m * C} \times 100 \quad (3.5)$$

Hat Etkinliği

Hat Etkinliği toplam iş süresinin, çevrim süresi ile istasyon sayısının çarpımına oranıyla hesaplanmaktadır. Bu veri, montaj hatlarını dengelemede büyük önem taşımaktadır. Çünkü montaj hattında olan toplam işgücünün ne kadar kullanıldığını yüzdeyle göstermektedir. Bu da montaj hattının ne kadar etkin dengelendiğini göstermektedir (Grzechca, 2011)

$$\varepsilon = \frac{\sum_i^n T_j}{m * C} = \frac{\sum_i^n t_i}{m * C} \quad (3.6)$$

Etkin dengelenmiş hatlarda, tüm istasyonlar tam dolu ve toplam boş süre sıfır olacağı için, hat etkinliği %100, denge gecikmesi 0 olacaktır.

Düzensünlük İndeksi

Düzensünlük İndeksi, dengelenmiş montaj hattının performansını ölçmek için kullanılan bir ölçüttür. Montaj hattındaki istasyonların boş sürelerini kullanarak hattın düzensünlüğünün hesaplandığı bir indekstir. Sıfıra yakın değer alıyorsa, montaj hattı dengelemesinin başarılı olduğunu göstermektedir. İyi bir şekilde dengelenmiş hatlarda düzensünlük indeksi değeri sıfırdır (Rekiek & Delchambre, 2005).

$$S.I = \sqrt{\sum_{j=1}^m (T_{jmax} - T_j)^2} \quad (3.7)$$

Burada, T_{jmax} : İş istasyonu sürelerinin en büyüğü T_j : j. istasyonun süresini göstermektedir m ise istasyon sayısını.

3.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Montaj hattı üretim sistemleri, farklı endüstriyel ortamlarda mevcuttur ve çok çeşitli ürünler üretmek için kullanılır. Özellikle motor, otomobil, bilgisayarlar, televizyonlar ve ev aletleri gibi elektrikli ve elektriksiz binlerce çeşitte tüketim malları üretmek için kurulur ve kullanılırlar. Bu ürünler farklı oldukları için farklı üretim sistemlerinin uygulanmasını gerektirir. Bu çeşitlilik, yanında farklı montaj hattı dengeleme problemlerini de getirmektedir (Scholl, 1995). Bu farklara yönelik yapılan sınıflandırmalar izleyen başlıklarda tanıtılmaktadır.

3.2.1. Dengeleme amacına göre sınıflandırma

Dengeleme amacına göre problem dört grupta tanımlanabilir:

- Tip-1: Bu tip problemlerde, çevrim süresi bilinmekte, istasyon sayısı enküçüklenmeye çalışılmaktadır.
- Tip-2: İstasyon sayısının bilinip çevrim süresinin enküçüklenmeye çalışıldığı problem türüdür.
- Tip-E: Bu tür bir problem MHDP'nin en genel versiyonu olarak kabul edilir. Hem çevrim süresini hem de istasyon sayısını enküçükleyerek, hat verimliliğinin en üst düzeye çıkarılmaya çalışıldığı problemlerdir.

- Tip-F: Amaç, verilen çevrim süresi ve istasyon sayısına göre uygun bir hat dengesi sağlamaktır (Grzechca, 2011).

3.2.2. Ürün çeşidine göre sınıflandırma

Tek modelli montaj hatları

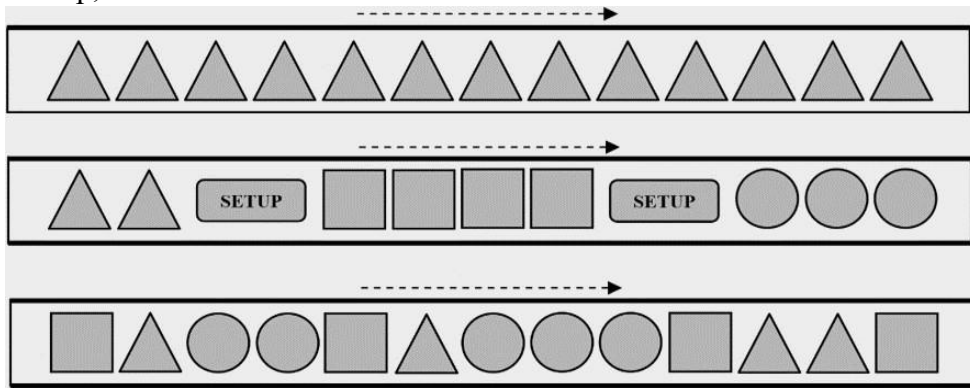
Tek çeşit ürün sürekli olarak çok miktarda üretilir (seri üretim), Tüm istasyonlar aynı iş parçaları üzerinde aynı görevleri tekrar tekrar yapmakla mükelleftirler. (Rekiek & Delchambre, 2005).

Çok modelli montaj hatları

Bir montaj hattında birkaç ürün modeli üretilmektedir. Üretim prosesindeki bu önemli farklılıklar nedeniyle model değişikliklerinde hat donanımının tekrar düzenlenmesi gerekir. Ürün modelleri, kurulum verimsizliklerini enküçüklemek için ayrı gruplanır, stok maliyetleri de artar. Bu değiş tokuş, tüm ürün modellerinin ekonomik pay büyüklüklerini ve üretim döngülerini belirleme sorununa yol açar (Rekiek & Delchambre, 2005)

Karma modelli montaj hatları

Bir ana ürünün farklı çeşitte modelleri aynı montaj hattında üretilir. Örneğin bilgisayarların farklı modellerinde üretim süreçleri oldukça benzerdir, çünkü modeller sadece bazı niteliklere (işlemci tipi, sabit disk tipi ve kapasitesi gibi) ve isteğe bağlı özelliklere (DVD-ROM sürücüsü evet / hayır) göre temel üründen farklıdır. Sonuç olarak, modellerin her birini üretmek için aynı temel işlemler grubu gereklidir. Sadece bazı görevler farklı sürelerle sahipken, bazıları isteğe bağlı bir parçanın takılı olup olmamasına göre bulunup, bulunmamaktadır.



Şekil 3.3. Tek model, çok modelli, karma modelli montaj hatları

Üretim süreçlerinin benzerliğinden dolayı, bir modelden diğerine geçerken hiçbir küçük kurulum faaliyeti ve maliyeti meydana gelmez. Karma modelli montaj hatlarının Çok

modelli montaj hatlarından temel farkı da budur. Güncel talepleri karşılamak için, modeller aynı anda montaj hattında karma bir sırada üretilir (Rekiek & Delchambre, 2005).

3.2.3. Hat(yerleşim) şekline göre sınıflandırma

Düz (I) montaj hatları

Bu, montaj hatlarının temel ve ilk şeklidir. İstasyonlar, bir taşıma bandı boyunca düz bir çizgi halinde sıralanmıştır. Düz montaj hatlarının bazı avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. İş akışının daha hızlı olması, montajının ve dengelenmesinin şekline bağlı olarak daha kolay ve basit olması, yapılan işlerin fazla deneyim gerektirmeyecek düzeyde basit olması düz montaj hatlarının avantajlarından sayılmaktadır. Bu tip montaj hatlarının diğer montaj hatlarına nazaran daha fazla yer kaplaması ve işçilerin birbirinden gerektiğinde yardım alamaması dezavantajlarındadır (Scholl, 1995).

Paralel montaj hatları

Esnekliği artırmak, sistemin arıza hassasiyetini azaltmak ve birden fazla ürün üretmek için paralel hat kurmak bazı avantajlar sağlamaktadır. Paralel montaj hatları, talep değişikliklerine daha hızlı ve etkili reaksiyon alınmasını sağlamaktadır, çünkü çalışan montaj hattı sayısı değiştirilebilir. Böylece, makinelerin üretimi durdurma riski azaltılmaktadır. Paralel hatların kurulmasının çeşitli avantajları vardır. Bunlardan biri çevrim sürelerinin genişlemesine imkân tanınmasıdır. Böylece, daha iyi montaj hattı dengelemeleri elde edilebilmektedir, çünkü daha fazla görev kombinasyonu oluşmaktadır. Bir diğeri paralel hatlarda yatay iş genişlemesi mümkündür, yani operatörler daha farklı görevlere atanabilmektedirler. Artan çevrim süreleriyle ilerleme hızı yönleri daha az alakalı hale gelir ve operatörler bireysel çalışma hızlarını değiştirebilirler. Ayrıca, iş bölümü kapsamı nispeten küçüktür, böylece her paralel üniteye az sayıda operatör çalışmaktadır. Paralel montaj hatlarıyla üretim, sayılan avantajlarının yanı sıra bu hatları cazip kılan ekonomik ve sosyal avantajlar da sağlamaktadırlar. (Scholl, 1995).

Çift taraflı montaj hatları

Hareket ettirilmesi zor olan ürünlerin (traktör, otobüs, araba vb.de) montajı için iki taraflı hattın tek bir hat gibi çalıştırılması gerekebilir. İstasyonlar hattın tek tarafında konumlandırılmak yerine, hattın her iki tarafında (sol taraf ve sağ taraf istasyonlar) zıt

U-tipi montaj hatlari

18

Operatörler, üretim sürecinde kendi ufuklarını ve becerilerini genişleten farklı üretim görevlerinde yer almaktadırlar. İstasyonlar, tüm üretim süreci gözlemlenebilecek ve operatörler arasında bilgi akışını enbüyük seviyeye çıkaracak şekilde birbirine yakınlardır. Yerleşim operatörlerin, istasyonlardaki makine, araç-gereçleri birbirleriyle paylaşmalarına olanak sağlamaktadır. Bu hat yerleşiminin bir sonucu olarak, çalışanlar daha yüksek motivasyon ve yüksek ürün kalitesi elde edebilmektedirler. Operatörler, esneklikte artan birçok becerileri kazanmaktadırlar. Tam zamanında üretim felsefesinde bu esneklik gereklidir, çünkü üretilen parçaların talep oranları zaman zaman dinamik olarak değişmektedir (Scholl, 1995).

3.2.4. Görev sürelerinin durumuna göre sınıflandırma

Görev süresi MHD'de en önemli parametrelerden birisidir. Basit görevler küçük işlem süresi varyantına sahip olabilirken, karmaşık ve güvenilir olmayan görevler oldukça değişken işlem sürelerine sahip olabilmektedir. Söz konusu robotik olmayan operatörler olduğunda, bazı etkenlerin (beceri, motivasyon, tecrübe, operatörler arasında iletişim vb.) tüm montaj hattı üzerinde büyük iş aksaklıklarına neden olabilecek etkileri vardır.

Deterministik görev süreli montaj hatları

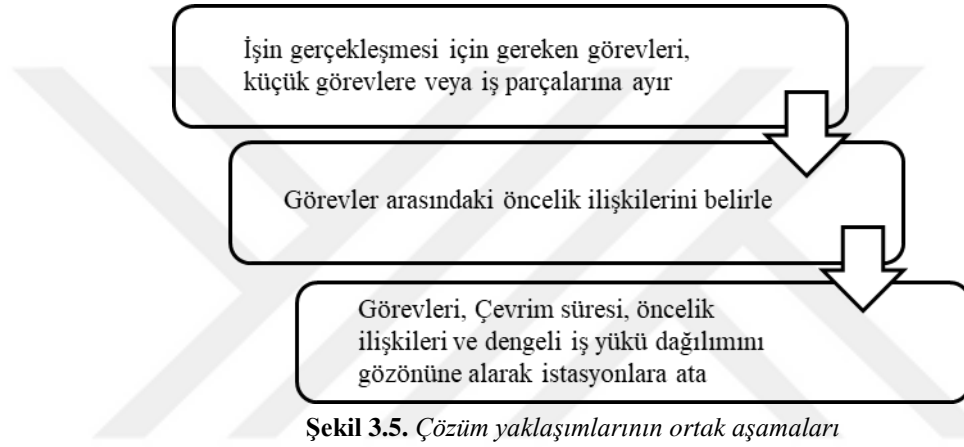
Bu tip görev süreleri belirli ve deterministiktir. Bu süreler sabit kabul edilmektedir. Manuel montaj hatları söz konusu olduğunda, bu sürede yüksek becerikli ve tecrübeli operatörler görevi bitirme kabiliyetine sahip olabilmektedir. Bu süreyi aşmamak için daha gelişmiş makineler ve robotlar sabit bir hızda kalıcı olarak kullanılabilirler (Rekiek & Delchambre, 2005).

Stokastik görev süreli montaj hatları

Stokastik görev süreli montaj hatlarının en temel özelliği, sürelerin ortalaması ve standart sapması bilinen bir dağılıma (örnek: normal dağılım) uymasındır. Deterministik olmayan görev süreleri, tecrübeli ve nitelikli olmayan işçilerden, çalışanların motivasyonlarından, eğitim eksikliği gibi nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Bu tür durumlarda stokastik görev süreleriyle problem çözümü gerçekleştirilebilir (Rekiek & Delchambre, 2005).

3.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Çözüm Yaklaşımları

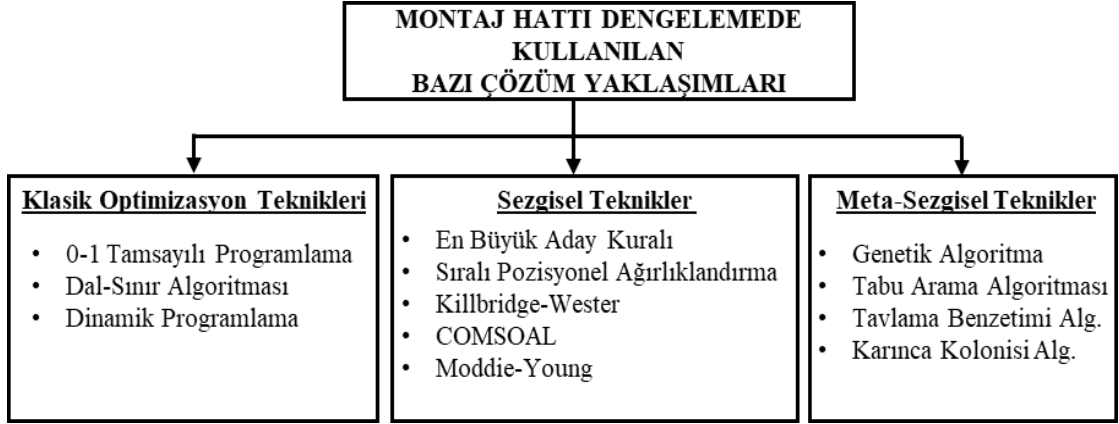
Montaj hattı dengeleme problemi, öncelik ilişkilerinin önemli rol oynadığı çizelgeleme problemlerinden biridir. Montaj hattıyla üretim, parçalar istasyondan istasyona ilerlerken parçaların birleştirilip hattan ürün halinde çıktığı endüstriyel üretim yöntemidir. Yüksek verimli montaj hattını dengelemek için, ürünün toplam iş içeriğinin tüm iş istasyonları arasında dengeli şekilde paylaşılması gerekmektedir. Dengeli paylaşılırsa, istasyonlara atanmış görevler neredeyse aynı zamanda tamamlanabilirler. Montaj hattı mükemmel bir dengeye sahipse, her istasyonun kendisine atanan tüm görevleri başarıyla tamamlamak için aynı süreye ihtiyacı olacaktır (Grzechca, 2011).



Şekil 3.5. Çözüm yaklaşımlarının ortak aşamaları

Teorik olarak mükemmel bir dengeye sahip montaj hattı dengesi elde etmek nadiren mümkündür. Montaj hattındaki en uzun istasyon süresi, montaj hattı için çevrim süresi haline gelmektedir. Montaj hattı dengelemenin ilk adımı, toplam iş içeriğini küçük görevlere bölmek ve görevler arasındaki öncelik ilişkilerini belirlemektir. Tüm bu verileri bir diyagramda toplamak gerekmektedir. Bu diyagram, öncelik diyagramı olarak adlandırılmaktadır. Bu diyagram hangi görevin hangi görevden sonra atanabileceğini göstermektedir. Öncelik ilişkileri diyagramı kurulduktan sonraki aşama, toplam iş içeriğinin istasyonlar arasında dengeli bir şekilde atanmasıdır (Grzechca, 2011).

Literatürde en çok kullanılmış montaj hattı dengeleme yöntemlerinin bazıları Şekil 3.6'daki gibi 3 grupta sınıflandırılabilir.



Şekil 3.6. Montaj hattı dengelemede kullanılan bazı çözüm yaklaşımlarının sınıflandırılması (Grzechca, 2011)

Geleneksel optimizasyon yöntemleri küçük boyutta problemler için eniyi sonucu bulabilmektedir, fakat büyük boyutlu problemlerde eniyi sonuca ulaşmakta zorluk çekebilmektedirler. Bunun nedeni, problemdeki görev sayısı, kısıtlar ve diğer etmenler arttıkça çözme süresi üstel orantılı bir şekilde artmaktadır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinin büyük problemlerde tercih edilmeme sebebi eniyi çözümü bulamaması değil, eniyi çözümü bulmasının uzun sürmesidir.

Sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, eniyi olmayan ancak sınırlı zamanda eniyiye yakın uygun çözümler bulmak için kullanılan pratik yaklaşımlardır. Bu yönüyle sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin büyük boyutlu problemlerde kullanılması yaygınlaşmıştır. Bu yöntemlerin temel tercih nedeni çözüme ulaşma hızıdır.

4. ERGONOMİK YAKLAŞIM

Bu bölümde, Ergonomi ve tanımı, ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ve çalışmada kullanılmış ergonomik risk değerlendirme yöntemi olan Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) hakkında çalışma kapsamınca bilgi verilmiştir.

4.1. Ergonomi ve Tanımı

Ergonomi kelimesi Yunanca ergo (iş) ve nomos (yasalar) sözcüklerinden türetilmiştir. İlk kez Wojciech Jastrzebowski tarafından 1857'de Polonya'da basılan makalede kullanılmıştır. Ergonominin kökleri çalışma fizyolojisi, biyomekanik ve iş istasyonu tasarımı dayananmaktadır. Ergonomi, odak noktasının insan performansı ve sistem tasarımı olduğu, deneysel ve psikolojik araştırmalardan oluşan bir bilim alanıdır (Helander, 2005).

Ergonomik kuralları uygulamak için literatür de bazı prensipler bulunmaktadır. Bunlar:

- Çevresel ve organizasyonel kısıtlar dikkate alınmalı,
- İnsan yetenekleri ve sınırlamalar hakkında bilgiler toplanmalı ve göz önünde bulundurulmalı,
- Sistemi, organizasyonu, işi, makineyi, aracı veya tüketici ürününü tasarlamak için göz önünde bulundurulması gerekenler güvenli, verimli ve kullanımı rahat olmalıdır.

Ergonomi antropoloji, psikoloji, sosyoloji ve tıp bilimlerinden farklıdır, çünkü birincil amaçları insan davranışını anlamak ve modellemektir. Ergonominin öncelikli amacı ise insan davranışını tasarlamaktır. Uluslararası Ergonomi Birliğine göre ergonominin tanımı aşağıdaki gibidir:

"Ergonomi insanların, sistemin diğer unsurları arasındaki etkileşimlerinin kurulmasıyla ilgili bilimsel disiplindir ve bunu sağlamak için gereken teori, ilke, veri ve yöntemleri uygulayan meslektir. Genel amacı insan sağlığını ve genel sistem performansını optimize etmek için iş çevresini tasarlamaktır. Diğer bir ifadeyle ergonomistler, insanların ihtiyaçları, yetenekleri ve sınırlarını iş çevresiyle uyumlu hale getirmek için görevlerin, işlerin, ürünlerin, ortamların ve sistemlerin tasarımına ve değerlendirilmesine katkıda bulunurlar." (Helander, 2005)

4.2. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri temel olarak üç grup altında toplanan birçok yöntemden oluşmaktadır. Bunlar, çalışanlardan toplanan verilere dayanarak yapılan işin güvenirliliğini ve işçilere yansıyan riski değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu üç grup şöyledir (Helander, 2005):

- Çalışanlar tarafından yapılan öznel değerlendirme yöntemleri
- Doğrudan ölçüm değerlendirme yöntemleri
- Gözleme dayalı değerlendirme yöntemleri

4.2.1. Çalışanlar tarafından yapılan öznel değerlendirme yöntemleri

Bu kategoriye dahil olan yöntemlerde genelde, işçilerin kişisel raporlarını, görüşlerini ve anketlerini içeren veriler kullanılarak iş yerinde hem fiziksel hem de psikososyal faktörlere maruz kalma hakkında değerlendirme yapılmaktadır. Başlarda, veri toplama işlemi yazılı kayıtlarla yapılırken, farklı veri toplama yöntemlerinin gelişmesiyle, kaydedilen video filmlerinin öz değerlendirmesi veya web tabanlı anketlerin kullanımı gibi yöntemler de veri toplama yöntemlerine eklenmiştir. Veri toplama yoluyla demografik değişkenler, ağrı ve duruşsal rahatsızlık dahil olmak üzere bildirilen semptomlar ve subjektif efor seviyeleri ile ilgili bilgiler toplanabilir. Bu yöntemler, kullanım kolaylığı, çeşitli çalışma koşullarına uygulanabilirlik ve çok sayıda konuyu nispeten düşük maliyetle inceleme gibi belirgin avantajlara sahiptir. Araştırılan meslek gruplarından toplanan verilerin gerçekçi ve güvenilir olması için büyük ölçekli çalışan gruplarında uygulama yapılması gereklidir. Bu yöntemlerle ilgili önemli bir sorun, çalışanların maruz kalma algılarının kesin ve güvenilir olmamasıdır. Örneğin, şiddetli bel veya boyun ağrısına sahip olan bir çalışanın, aynı meslek gruplarından ağrısız çalışanlara kıyasla daha yüksek fiziksel yük raporlaması yaptığı tespit edilmiştir. Çalışanların öz raporlarıyla ilgili farklılıklar, farklı düzey okuryazarlığın anlama veya soru yorumlamasına neden olmasından kaynaklanabilmektedir. Mutlak riskin ölçülmesinde bu yöntemleri kullanarak düşük riske sahip meslek gruplarında uygulama yapılması uygundur, ancak bu verilerin güvenirliliği kısmen şüphelidir. Nispeten daha yüksek riske sahip meslek gruplarında, diğer yöntemler kullanılarak ayrıntılı analiz yapılması daha uygundur. (Stanton, Hedge, Hendrick, Salas, & Brookhuis, 2009)

4.2.2. Doğrudan ölçüm değerlendirme yöntemleri

İş yerinde doğrudan çalışana bağlanan detektörlerin yardımıyla maruziyet derecelerinin ölçümü için çok çeşitli yöntemler ve cihazlar geliştirilmiştir. Bu yöntemler, eklem hareket aralığını ölçmek için basit, hafif ve giyilebilen cihazlardan, bir görevin gerçekleştirilmesi sırasında eklemler arasındaki hareketin sürekli kaydını sağlayan elektronik açıölçerlere kadar ürün çeşitliliği göstermektedir. Bilgisayarlı veri analizi için sistemlerle birlikte, parmak ve bilek açılarının ve önkol rotasyonunun ölçülmesini sağlayan, giyilince detektörleri eklemlere denk gelen hafif cihazlar geliştirilmiştir. Ek olarak, birden fazla bilek, el ve parmak hareketinin kavrama baskısı ile direkt ve çevrimiçi olarak bilgisayara kaydedilmesi için sistemler ve uygulamalar da geliştirilmiştir (David, 2005).

Lomber Hareket Monitörü, gövdeye uygulanan ve bilgisayar tarafından daha sonra analiz edilmek üzere gövde konumu, hız ve ivmenin üç boyutlu bileşenleri için sürekli verileri kaydeden elektronik dış iskelettir. Buna ek olarak, uygun yazılımla işle ilgili tüm gün veri aktarması için, çalışma sırasında ve iş yapmazken vücut duruşlarının ve hareketlerinin izlenip değerlendirilmesi için uygun olan üç eksenli ivmeölçerler de geliştirilmiştir. Bu tür cihazlar, bireylerin çalışma günleri boyunca farklı duruşlarda geçirdikleri süreyi belirlemek için kullanılmaktadır. İşçinin belirli anatomik noktalarından optik, sonik veya elektromanyetik detektörlerle vücut duruşunu kaydetmek için teknikler geliştirilmiştir. Farklı vücut bölümlerinin konumunu ve açısal hareketini izlemek için tarama birimleriyle birlikte kullanılmaktadır. Bu sistemler, endüstriyel yerlerdeki incelemelerin aksine, görev simülasyonlarının araştırılmasına daha uygun görülmektedir (David, 2005).

Başka bir doğrudan ölçüm yöntemi, myoelektrik aktivitenin (EMG) senkronize kaydı ve bilgisayarlı analizidir. Bu, kas gerginliğini tahmin etmek için kullanılabilir, ancak ilişki birçok durumda doğrusal olmayabilir, bu nedenle dikkatli bir yorum gereklidir. Lokal kasları değerlendirmek için de kullanılabilir (David, 2005).

Sonuç olarak, doğrudan ölçüm sistemleri, çeşitli maruziyet değişkenleri hakkında yüksek doğrulukta veri sağlayabilir. Detektörlerin doğrudan özneye bağlanması rahatsızlığa ve muhtemelen çalışma davranışında bazı değişikliklere neden olabilir. Bu sistemlerin çoğu, gelişmiş veri üretme kapasitesi, verilerin analizi ve yorumlanması için gereken süre nedeniyle pek çok uygulayıcı tarafından pratik olarak kabul edilemez.

Doğrudan ölçüm sistemleri, gereken ekipmanları satın almak için önemli miktarda yatırımın yanı sıra, bakım maliyetlerini karşılamak için gerekli kaynaklar ve bunların etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için yüksek eğitimli ve yetenekli teknik personelin istihdam edilmesini gerektirmektedir (David, 2005).

4.2.3. Gözleme dayalı değerlendirme yöntemleri

Geliştirilmiş risk değerlendirme yöntem algoritmalarının, gözlemciler tarafından uygulanarak risk seviyelerinin bulunmasını sağlayan yöntemlerdir. Bu yöntemleri kullanarak işi yaparken işçinin zorlanıp zorlanmadığını değerlendirmek çok önemlidir. Gözleme dayalı yöntemler, işgücündeki yaralanma risklerinin önüne geçmek için gerekli gözetim verilerini elde etmek için kullanılmaktadır. Çoğu kas-iskelet sistemi yaralanmasının, işçinin işi yaparken konforsuzluk yaşaması ile bağlı olduğu kabul edilmektedir. Bu göz ardı edilirse, konforsuzluktan meydana gelen küçük semptomlar, semptomların şiddetli artışına yol açacak ve hafif rahatsızlık olarak başlayan şey giderek daha yoğun hale gelecek, sonunda işçiye ağrı ve sızı olarak dönecektir. Kontrol altına alınmazsa, bazı kümülatif travmalara işaret eden ağrılar ve sonuç olarak tendinit, tenosinovit veya karpal tünel sendromu gibi ciddi sinir sıkışması hasarı içeren kas-iskelet sistemi hastalığıyla sonuçlanabilmektedir. İş yaparken rahatsızlık hissi, bedenin işçinin işinin bazı özelliklerinin değiştirilmesi gerektiğine dair erken uyarı sinyalleridir. Rahatsızlık, iş miktarını azaltarak, işteki hata oranlarını artırarak veya her ikisini birden yaparak işçi performansını ve iş kalitesini olumsuz etkilemektedir. Rahatsızlık seviyelerinin azaltılması, yaralanmanın meydana gelme riskini de azaltmaktadır. Sonuç olarak, rahatsızlık seviyelerindeki değişiklikler, ergonomik bir ürünün tasarımının başarısını göstermektedir (Helander, 2005).

Gözleme dayalı bazı değerlendirme yöntemleri şöyledir:

- Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Endeksi (Revised National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH) Lifting Equation)
- Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi (Rapid Upper Limb Assessment-RULA)
- Üst Vücut Yüklenmesi Analizi (Postural Loading on the Upper Body-LUBA)
- Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (Rapid Entire Body Assessment-REBA)
- Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi (Ovako Working Posture Analyzing System-OWAS)

- Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi (Quick Exposure Check-QEC)
- Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (The Occupational Repetitive Actions-OCRA)

Ergo-KUMHD kapsamında yapılan çalışmada, ergonomik risk değerlendirme yöntemi olarak Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi kullanıldığından izleyen başlıkta ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır.

4.3. Hızlı Maruziyet Değerlendirme (Quick Exposure Check -QEC)

Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD), işe bağlı Kas-İskelet Hastalıkları (KİSH) risklerine maruz kalmayı hızla değerlendirmektedir. HMD, uygulayıcıların ihtiyaçlarına ve başlıca KİSH risk faktörleri üzerine yapılan araştırmalara dayanmaktadır. Yaklaşık 150'den fazla denetleyici, HMD'yi hem yapay hem de gerçek görevlere uygulayarak geliştirmiş ve doğrulamıştır. HMD, yüksek düzeyde hassasiyetini, kolay kullanılabilirliğinin yanı sıra güvenilirliği büyük ölçüde bilim dünyasında kabul edilmiş gözlemciler tarafından uygulanarak sınanmasından almaktadır. Gerçek çalışmalarda uygulanması, HMD'nin çok çeşitli görevler için geçerli olduğunu göz önüne koymaktadır. HMD'yi uygulayıcılara öğretmek için kısa bir eğitim süresi ve biraz pratik yeterli olmaktadır. Alınan bu eğitimler sonrası, adından da anlaşılacağı üzere değerlendirme her görev için hızlı bir şekilde tamamlanabilmektedir. HMD, iş yeri ve ekipmanın ergonomik açıdan iyileştirilerek, yeniden tasarımı kolaylaştıran ve tasarımın hızlıca değerlendirilmesini sağlayabilen bir yöntemdir. HMD, birçok türden KİSH'in gelişmesini önlemeye yardımcı olmanın yanı sıra kullanıcıları iş yerlerindeki KİS riskleri hakkında eğitmekte yardımcı olmaktadır (Stanton, Hedge, Hendrick, Salas, & Brookhuis, 2009).

HMD uygulanması için gerekli olan adımlar

- **ADIM 1;** İlk olarak HMD uygulama kılavuzunun yardımıyla bu değerlendirme yöntemini anlamak, sonra HMD formunu (EK-2) gözden geçirmek
- **ADIM 2;** HMD gözlemcisi, belirli bir görev için risk değerlendirmesi yapmak üzere "Gözlemcinin Değerlendirmesi" formunu (EK-2) kullanır. Formda yer alan değerlendirme maddelerinin çoğu açıklamalı geliştirilmiştir. Değerlendirme başlamadan önce, yapılan operasyon en az bir kere tam bir iş döngüsü şeklinde gözlemlenmelidir. Bir iş çeşitli görevlerden oluşuyorsa, her görev ayrı ayrı değerlendirilebilir.
- **ADIM 3;** HMD formu yapılan gözlemlere dayalı olarak doldurulmalıdır.

- **ADIM 4;** Her görev için maruz kalma puanlarını hesaplamak gerekmektedir ki, bu da aşağıdaki adımlar izlenerek, HMD formu doldurularak yapılmaktadır;
 1. "Gözlemcinin Değerlendirmesi" ve "Çalışanın Değerlendirmesi" alanlarındaki yanıtlara karşılık gelen harfleri işaretleyin.
 2. Her daire içine alınmış harf çiftinin kesişme noktasındaki sayıları işaretleyin. Örneğin, sırt maruz kalma için, A2 ve H3 değerlendirme maddelerinin kesiştiği noktaya karşılık gelen 8 puanı seçilmelidir.
 3. Her vücut bölümü için toplam bir puan hesaplayın. Yazılım yardımı ile maruz kalma şekline göre puan hesaplaması yapılabilir.
- **ADIM 5;** Sırt, omuz / kol, bilek / el ve boyun için maruz kalma seviyeleri hızlı bir şekilde tanımlanmaktadır. Bu yöntem, ergonomik bir müdahalenin maruz kalma seviyelerini etkili bir şekilde azaltabilirliğini değerlendirmektedir. Çeşitli görevlerin HMD değerlendirmelerine dayanan ön eylem düzeyleri Tablo 4.1 'de görüldüğü gibi önerilmektedir (McAtamney & Corlett, 1993). Tablo 4.1 'deki E maruziyet düzeyi, gerçek toplam maruz kalma puanı X ile olası maksimum toplam X_{max} (elle yük taşınması durumunda bu sayı $X_{maxEY} = 176$ diğer durumlarda $X_{max} = 162$ 'dir) arasındaki yüzde oranı olarak hesaplanır.

$$E (\%) = \frac{X}{X_{max}} * 100\% \quad (4.1)$$

Tablo 4.1. HMD için Ön Eylem Düzeyleri (McAtamney & Corlett, 1993).

HMD PUANI(E) (Yüzdelikle)	Düzey
≤40%	Kabul edilebilir
41-50%	İyileştirme yapılması gerekebilir
51-70%	Araştırma yapılmalı ve uygun anda iyileştirilmeli
>70%	Derhal araştırma yapılmalı ve iyileştirilmeli

Avantajları

- KİSH'lar için bazı önemli fiziksel risk faktörlerini kapsar.
- Kullanıcı ihtiyaçlarını dikkate alır ve deneyimsiz kullanıcılar tarafından kullanılabilir.

- Birden çok sektörde kullanılabilir. Risk faktörlerinin kombinasyonunu ve etkileşimini dikkate alır.
- İleri düzeyde hassasiyet ve kullanılabilirlik sağlar.
- Gözlemciler arasında üst düzeyde güvenilirlik sağlar
- Öğrenmesi kolay ve kullanımı hızlıdır (Stanton, Hedge, Hendrick, Salas, & Brookhuis, 2009).

Dezavantajları

- Yöntem yalnızca fiziksel iş yeri faktörlerine odaklanır.
- Önerilen "eylem seviyeleri" ile maruz kalma puanlarının doğrulanması gerekir.
- Yeni başlayan uygulayıcıların değerlendirmelerini iyileştirmek ve güvenilirliği artırmak için ek eğitim ve pratik gerekebilir (Stanton, Hedge, Hendrick, Salas, & Brookhuis, 2009).

Gereken aletler

Kalem ve yöntemi uygulamak için özel hazırlanmış bir checklist kullanarak uygulanan risk değerlendirme yöntemidir. Maruz kalma puanlarının hesaplanması, uygun olan bilgisayar programı ile yapılabilmektedir. Hareketleri daha detaylı incelemek için kamera kullanılabilir (Stanton, Hedge, Hendrick, Salas, & Brookhuis, 2009).

5. ERGONOMİK KARMA MODELLİ U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELMESİ İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Bu bölümde, Ergo-KUMHD için geliştirilmiş KTDP modeli ve Genetik algoirtma meta-sezgisel çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Matematiksel modelde kullanılmış olan notasyon, kısıtlar ve amaç fonksiyonu açıklanmıştır. Yapılmış olan uygulama çalışmasının sonuçları tartışılmıştır. Genetik algoritmaların çalışma prensibini aktaran, genel tanımları da içeren bilgilere yer verilmiştir. Ergo-KUMHD için geliştirilmiş GA modelinin test problemlerinden elde edilen sonuçları da aktarılmıştır.

5.1. Ergo-KUMHD için Karma Tamsayılı Programlama Yaklaşımı

U-tipi montaj hatlarında operatörler hattın ortasında çalıştığı ve hattın iki bacağı arasında gidip gelebildiği için, ilk ve son görevin aynı istasyona atanması gibi görev gruplama avantajı bulunmaktadır. Bu durum, U-tipi montaj hatlarında daha az istasyon açma avantajı sağladığından, işletmelerin yaygın olarak U-tipi yerleşimi benimsemelerine yol açmaktadır. U-tipi montaj hatları düz hatlara göre çeşitli avantajlara sahiptir (Miltenburg & Wijngaard, 1994):

- Operatörlerin birbirine yakınlığı nedeniyle görünürlük ve iletişim güçlüdür. Kalite sorunları ortaya çıktığında, bunlar hızla tespit edilebilir ve çözülebilir. Sorun çıktığında operatörlerin birbirlerine yardım etmeleri de daha kolaydır.
- Operatörler, U-tipi montaj hattındaki işlemlerin çoğunu gerçekleştirmek için birden çok yetkinliğe sahiptir. Bu, operatörlere çevrim süresindeki veya çıktı oranındaki değişikliklere hızlı uyum sağlama ve problemlere hızlı çözüm üretme için ihtiyaç duydukları becerileri verir. Çoklu beceri kazandırma aynı zamanda organizasyona "know-how" ı dağıtır ve daha fazla operatörün süreci iyileştirme çalışmalarına katılmasını sağlar.
- Bir U-hattında gereken istasyon sayısı geleneksel bir hat için gereken istasyon sayısından daha fazla olmaz. Bunun nedeni, görevleri U-hattında gruplamak için daha fazla olanağın mevcut olmasıdır (Düz hatlarda yalnızca öncülü atanmış görevleri kümesinden bir istasyonda gruplama yapılabilirken, U-tipi montaj hatlarında öncülü atanmış görevler ile ardılı atanmış görevlerin oluşturduğu kümeden gruplama yapılabilir).

Ele alınan avantajlar ve bu avantajlar gibi birçok üstünlük U-tipi montaj hatlarının düz hatlara tercih edilmesine yol açmaktadır. U-tipi yerleşimde montaj hattı

dengelenirken, belki daha az sayıda hizmet eden operatörlere atanan iş yükü yalnızca süre olarak kontrol edilmektedir. Bu da uzun vadede, işlerin operatörler üzerinde yarattığı zorlanmaları dikkate almadığından, elde edilen hat dengesinden sapmalara yol açmaktadır. Daha sürdürülebilir hat dengesi için son yıllarda montaj hattı dengeleme sürecinde ergonomik faktörlerin dikkate alındığı çalışmalar göze çarpmaktadır. (Güner & Servet, 2012) (Battini, Delorme, Dolgui, Persona, & Sgarbossa, 2016) (Tiacchi & Mimmi, 2018) (Arkhipov, Battaia, Cegarra, & Lazarev, 2018) (Şahin & Kahya, 2018). U-yerleşim ve karma modellenli üretim söz konusu olduğunda operatörlerin iş yükü daha da artmaktadır. Literatürde bu tür üretime yönelik ergonomik koşulları da dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Hem U-yerleşim ve karma modellenli üretimin getireceği yüklerin hem de işlerin sahip olduğu ergonomik yüklerin operatörler üzerindeki etkisi göz ardı edilemeyeceğinden, çalışmada probleme yönelik bir KTDP matematiksel modeli geliştirilmiştir.

5.1.1. Ergo-KUMHD için karma tamsayılı programlama modeli

Geliştirilen modelde, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, işe bağlı olarak oluşan Kas-İskelet Hastalıkları (KİSH) risklerine maruz kalmayı hızlı bir biçimde değerlendirmektedir. Uygulayıcıların ihtiyaçlarına ve başlıca KİSH risk faktörleri üzerinde yapılan araştırmalara dayanmaktadır. Yüksek düzeyde hassasiyete sahip olan HMD yönteminin, kolay kullanılabilirliği ve güvenilir olması en temel özelliklerindendir.

Her bir istasyona atanan işlerin HMD skorlarının ve hattın çevrim süresinin en küçüklenmesi amacıyla ele alınan Ergonomik Karma Modelli U-tipi Montaj Hattı Dengeleme (Ergo-KUMHD) Problemi için bir KTDP modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model Urban'ın (1998) modelini temel alarak geliştirilmiştir. Ergo-KUMHD için geliştirilen model, ürün modellerini dikkate alarak, istasyonlara görev bazında atama yapmaktadır. Oluşturulan model için kullanılan indisler, parametreler ve karar değişkenleri izleyen şekildedir:

İndisler ve Kümeler

$m, m_1, m_2 \in \{1, \dots, nM\}$ model indisleri ve kümesi

$i, i', r, s \in \{1, \dots, nI\}$ görev indisleri ve kümesi

$j \in \{1, \dots, nJ\}$	istasyon indisleri ve kümesi
$(r, s) \in P$	birleştirilmiş öncelik ilişkileri kümesi
$(i, i') \in NB$	aynı istasyona atanmaması gereken ikili görevler kümesi

Parametreler

nM	model sayısı
nI	görev sayısı
nJ	enbüyük istasyon sayısı
C	çevrim süresi
t_{im}	m modeline ait i görevinin işlem süresi
γ_{im}	m modeline ait i görevinin HMD Skoru

Karar Değişkenleri

$m\varphi$	en yüksek HMD skoruna sahip iş istasyonunun HMD skor değeri
φ_j	j istasyonun HMD skor değeri
z_j	eğer j istasyonu açıldıysa 1, diğer durumlarda 0.
x_{ij}	eğer i görevi j istasyonuna ileri doğrultuda atanırsa 1; diğer durumlarda, 0.
y_{ij}	eğer i görevi j istasyonuna geri doğrultuda atanırsa, 1; diğer durumlarda, 0.

Amaç Fonksiyonu

$$m\varphi \geq \varphi_j \quad \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (1)$$

$$Min = w_1 \times \sum_{j=1}^{nJ} z_j + w_2 \times m\varphi \quad (2)$$

Eşitlik (1), hat içerisinde HMD skoru en yüksek olan istasyonun HMD skorunun $m\varphi$ değişkenine atanmasını sağlar. Eşitlik (2), çalışmada ele alınan Ergo-KUMHD probleminin amaç fonksiyonudur.

Burada, verilen ağırlıklar ile:

1. Açılan istasyon sayısının en küçüklenmesi,
2. Hat içerisinde HMD skoru en yüksek olan istasyonun HMD skorunun en küçüklenmesi, dikkate alınır.

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^{nJ} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, nI\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{nI} ((x_{ij} \times t_{im_1}) + (y_{ij} \times t_{im_2})) \leq C \times z_j \quad \forall m_1, m_2 \in \{1, \dots, nM\}, \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{nJ} ((nJ - j + 1) \times (x_{rj} - x_{sj})) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{nJ} ((nJ - j + 1) \times (y_{sj} - y_{rj})) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{nI} ((x_{ij} \times \gamma_{im_1}) + (y_{ij} \times \gamma_{im_2})) \leq \varphi_j \quad \forall m_1, m_2 \in \{1, \dots, nM\}, \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (7)$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, nI\}, \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (8)$$

$$\varphi_j \geq 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (9)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (10)$$

Eşitlik (3) – (10) Ergo-KUMHD probleminin kısıtlarını oluşturmaktadır. Eşitlik (3), her bir görevin mutlaka bir istasyona ileri ya da geri pozisyonda atanmasını sağlar. Eşitlik (4), herhangi bir iş istasyonuna farklı modellerin görevleri atansa dahi, toplam istasyon süresinin çevrim süresini aşamayacağını gösterir. Eşitlik (5) ve (6) öncelik ilişkileri kısıtıdır. Eşitlik (5), ileri atamada öncelik ilişkilerinin ihlalini önler. Eşitlik (6), geri atamada öncelik ilişkileri ihlalini önler. Eşitlik (7), herhangi bir iş istasyonunda gruplanan işlerin HMD skor değerinin hesaplanmasını sağlar. Eşitlik (8) – (10) işaret kısıtlarıdır. Ana kısıtlara ek olarak, herhangi bir i işinin yapılabileceği iş istasyonu j -nin önceden bilinmesi durumunda, herhangi iki i ve i' işinin aynı j istasyonuna atanmaması gerektiği durumu göz önüne alınarak, Ergo-KUMHD problemi için oluşturulan KTDP matematiksel modeline (11) – (12) kısıtları da dahil edilmektedir.

$$x_{ij} + x_{i'j} \leq 1 \quad \forall (i, i') \in NB, \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (11)$$

$$y_{ij} + y_{i'j} \leq 1 \quad \forall (i, i') \in NB, \forall j \in \{1, \dots, nJ\} \quad (12)$$

Eşitlik (11) ve (12) ileriden ya da geriden, aynı istasyona atanmaması gereken görevlerin birlikte atanmasını önler.

5.1.2. Karma Tamsayılı Programlama Modeli için uygulama çalışması

Bu uygulama çalışmasında kullanılan veriler bir amortisör fabrikasındaki montaj hattından elde edilmiştir. Önce, montaj hattındaki görevler gözlenmiş, ardından HMD ergonomik risk yöntemi kullanılarak görevlerin HMD skorları belirlenmiştir. Montaj hattında ürünler beş farklı model şeklinde üretilmektedir. Toplam görev sayısı tüm modellerde yirmi sekizdir. Çevrim süresi seksen saniyedir. İş elemanlarının süreleri, hesaplanmış HMD skorları ve tüm modeller için geçerli birleştirilmiş öncelik diyagramı eklerde EK-3, EK-4 ve EK-5’de sunulmuştur. Modelin amaç fonksiyonundaki ağırlıklara yönelik analiz yapabilmek amacıyla, amaç fonksiyonlarının ağırlıkları ($w_1 = 10$, $w_2 = 1$) ; ($w_1 = 100$, $w_2 = 1$) ; ($w_1 = 1$, $w_2 = 0$) olacak şekilde 3 farklı durum için sınanmıştır. Birinci ve ikinci durum ağırlıklarında işletmelerin istasyon sayısı enküçükleme isteğini daha ön planda tutma eğilimleri göz önünde bulundurulmaktadır. Üçüncü durumun değerlendirilme nedeni ise ergonominin hiç göz önünde bulundurulmaması durumunda modelin çıktılarının ne olduğunu değerlendirmektedir. Geliştirilen modelde, karar vericiler problem özelinde ağırlıkları belirleyebilme serbestliğine sahiptirler. Model Intel(R) Celeron(R) CPU N2830 2.16 GHz işlemcili ve 8 GB RAM bulunan bir kişisel bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 10$, $w_2 = 1$ olan modelin Gurobi çözücüsü ile çözülmesi sonucunda elde edilen istasyon sayısı, istasyonlara atanan görevler ve istasyonlardaki toplam HMD skorları izleyen tabloda sunulmaktadır. Modelin bu amaç fonksiyonları ağırlıklarıyla çözüm süresi 357 saniyedir.

Tablo 5.1. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=10$, $w_2=1$ değerleri için elde edilen çözüm

	İleri Atama	Geri Atama	φ_j
İstasyon 1	1, 2, 3, 9, 12	28	56.4
İstasyon 2	4, 7, 13	25, 27	56.8
İstasyon 3	5, 6, 14, 15	-	56.5
İstasyon 4	10, 11	22, 26	56.8
İstasyon 5	8, 16, 17, 18, 19	-	54.8
İstasyon 6	20, 23, 24	21	56
Enbüyük Değer	-	-	56.8
Enküçük Değer	-	-	54.8
Ortalama Değer	-	-	55.21
Standart Sapma	-	-	0.69

Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 100$, $w_2 = 1$ olan modelin Gurobi çözücüsü ile çözülmesi sonucunda elde edilen istasyon sayısı, istasyonlara atanan görevler ve istasyonlardaki toplam HMD skorları izleyen tabloda sunulmaktadır. Modelin bu amaç fonksiyonları ağırlıklarıyla çözüm süresi 1028 saniyedir.

Tablo 5.2. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=100$, $w_2=1$ değerleri için elde edilen çözüm

	İleri Atama	Geri Atama	φ_j
İstasyon 1	1, 4, 7, 14	11, 28	69.8
İstasyon 2	2, 3, 12, 23, 24, 25	-	69.3
İstasyon 3	5, 6, 13, 15	27	65.6
İstasyon 4	9, 10, 16	22,26	68
İstasyon 5	8, 17, 18, 19	20, 21	69.7
Enbüyük Değer	-	-	69.7
Enküçük Değer	-	-	65.6
Ortalama Değer	-	-	68.48
Standart Sapma	-	-	1.57

Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 1$, $w_2 = 0$ olan modelin (yalnızca istasyon sayısının en küçüklenmesi dikkate alan, en büyük HMD skorunun en küçüklenmesini dikkate almayan modelin) Gurobi çözücüsü ile çözülmesi sonucunda elde edilen istasyon sayısı, istasyonlara atanan görevler ve istasyonlardaki toplam HMD skorları izleyen tabloda sunulmaktadır. Modelin bu amaç fonksiyonları ağırlıklarıyla çözüm süresi 3 saniyedir.

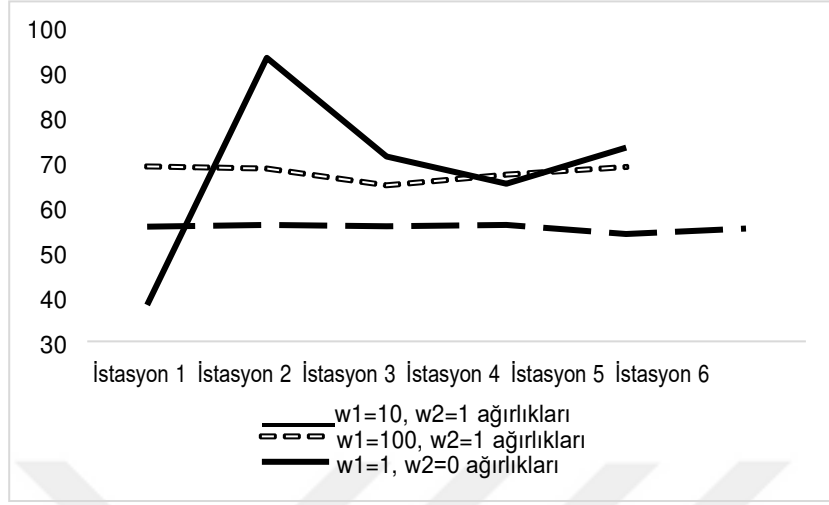
Tablo 5.3. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=1$, $w_2=0$ değerleri için elde edilen çözüm

	İleri atama	Geri Atama	φ_j
İstasyon 1	1,7	26,27, 28	39
İstasyon 2	9,10	11,20,21, 22,	94
İstasyon 3	2,23,24	18, 19, 25	72
İstasyon 4	3,4,12	6,8,17	66
İstasyon 5	14	5,13,15,16	74
Enbüyük Değer	-	-	94
Enküçük Değer	-	-	39
Ortalama Değer	-	-	69
Standart Sapma	-	-	17,71

Şekil 5.1’de görülen, istasyonların HMD skorlarının amaç fonksiyonu ağırlıklarına göre dağılımı grafiğini incelediğimizde, HMD puanına yönelik amaç ağırlığı sıfır olduğunda istasyonlar arasında risk puanlarının ne kadar dengesiz dağıldığı görülmektedir. Tablo 5.3’de ilgili çözüm sonuçlarında yer alan standart sapma değerine baktığımızda da 17,71 ortalama sapma değerine sahip atamanın, istasyonlar arasında yük anlamında ne kadar dengesizlik yaratacağı anlaşılmaktadır. Bu sınama, yani ergonomik risk değerlerini dengelemeyi amaçlamadan atama, bizlere yalnızca istasyon sayısını enküçükleyerek bir çözüm elde etmenin işçi yüklerini ergonomik açıdan dengelemeyeceğini göstermektedir. Dengesiz işçi yükleri yorgunluk, bıkkınlık, kalite sorunları gibi pek çok problemin kaynağı olabilmekte, hedeflenen başarılı üretim miktarlarına ulaşmayı engelleyebilmektedir. Geliştirilen modelde ergonomik açıdan ele alınan amaç ağırlığının 0’dan büyük bir değerde olması işçi yüklerini ele alınan ergonomik kriter açısından daha dengeli atamayı sağlamaktadır. HMD skoruna yönelik amaç ağırlığı $w_2 = 1$ olarak alınan denemelerde HMD skoru için istasyon bazında ortalama sapma değerleri 1,57 ve 0,69 olarak elde edilmiştir. İstasyon sayısının enküçüklendiği amaç ağırlığı değeri 100’den 10’a azalınca istasyonlar arası ortalama HMD değerinden sapmada azalmıştır. Farklı görev süreli test problemleri için, geliştirilen model çözümünden elde edilen sonuçlar EK-6’da paylaşılmıştır.

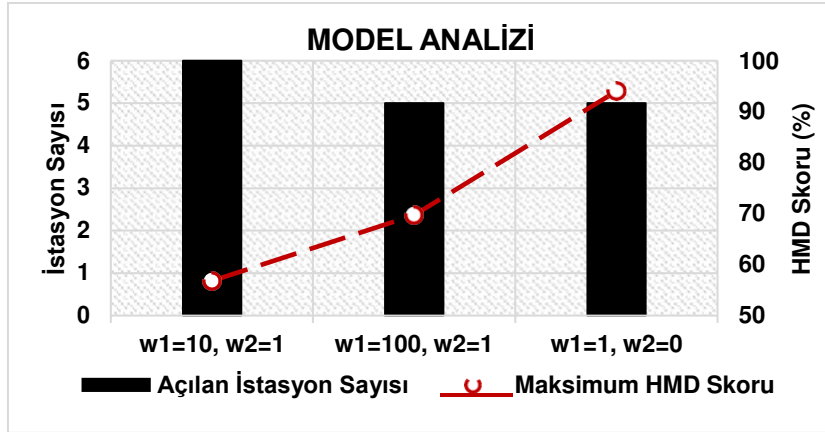
Amaç fonksiyon ağırlıkları $w_1 = 10$, $w_2 = 1$ olan modelin çözümünde birinci amaç, $w_1 = 100$ olan ağırlığa göre daha az önemsenirken istasyon sayısı artmakta ve ikinci amaç ağırlığı $w_2 = 1$ olmasına rağmen HMD skorlarının istasyonlar arasında daha

dengele dağıldığı görülmektedir. Böylece model karar vericiye farklı alternatif ağırlık yaklaşımları için sonuç alma imkanı sunmaktadır.



Şekil 5.1. İstasyonların HMD skorlarının çözümlere göre dağılımı

Ele alınan alternatif ağırlık değerlerinin istasyon sayısı ve enbüyük HMD skorlarına etkisi Şekil 5.2’de görülmektedir. $w_2 = 0$ alındığında, atama sonucu istasyonlar arası enbüyük HMD skoru %94 olarak yüksek bir değer elde edilmiştir. $w_2 = 1$ alınan diğer iki sınamada ise istasyon sayısını enküçükmek istediğimiz amaç ağırlığının etkisine göre gittikçe azalmıştır. Bu da çalışmanın amacına ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5.2. Ağırlık değerlerinin istasyon sayısı ve HMD skorlarına etkisi

5.2. Ergo-KUMHD için Genetik Algoritma Yaklaşımı

Bu başlıkta, Ergo-KUMHD için Genetik algoritma yaklaşımı başlığı altında Genetik algoritma yaklaşımı ve Ergo-KUMHD için geliştirilmiş olan genetik algoritma

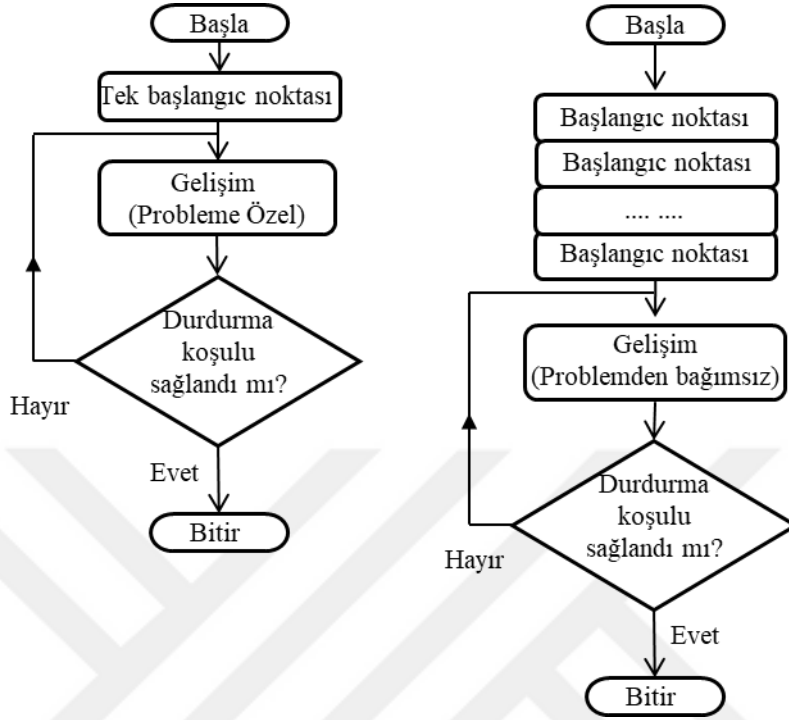
modeli hakkında bilgilere yer verilmiştir. Bu yaklaşımla çözülmüş problemler ve uygulama çalışmalarından çıkan sonuçlar sunulmuştur.

5.2.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritmaların (GA) yaygınlaşmış formu Goldberg (1989) , tarafından bilim dünyasına tanıtılmıştır. GA'lar, doğal seçim ve doğal genetiğin mekanizmasına dayanmakta olan stokastik arama algoritmalarıdır. Geleneksel arama tekniklerinden farklı olarak GA, problemin sınırlarını veya sistem kısıtlamalarını karşılayan başlangıç popülasyonu adı verilen ilk rastgele çözümlerle başlar. Popülasyondaki her bir birey, eldeki problemin çözümünü temsil etmektedir ve bunlara kromozomlar denir. Kromozomlar, genel olarak, ikili bit sistemi olan bir sembol dizisidir. Kromozomlar, nesiller adı verilen ardışık güncellemeler yoluyla gelişir yani evrimleşir. Her nesil sırasında, kromozomlar bazı uygunluk ölçümleri kullanılarak değerlendirilir. Yeni nesli oluşturmak için, çocuk adı verilen yeni kromozomlar, bir çaprazlama operatörü kullanılarak mevcut nesilden iki kromozomun birleştirilmesiyle veya bir mutasyon operatörü kullanılarak bir kromozomun değiştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Nüfus büyüklüğünü sabit tutmak için bazı ebeveynlerin ve çocukların uygunluk değerlerine göre seçilmesi, diğerlerinin reddedilmesi ile yeni bir nesil oluşturulur. Kromozomların elverişliliği arttıkça seçilme olasılığı yükselmektedir. Bu işlemler problemin en uygun çözümü bulunana kadar devam eder ve birkaç nesil sonra, algoritmalar en uygun çözüm olacak kromozoma ulaşabilmektedir (Rekiek & Delchambre, 2005).

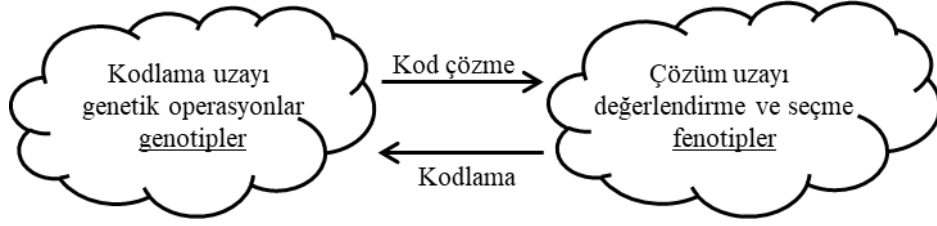
Özetle, GA optimizasyon problemlerini çözmek için algoritma, eniyi çözüme yakınsayan bir dizi hesaplama adımıdır. Çoğu klasik optimizasyon yöntemi, objektif fonksiyonun derecesine veya daha yüksek dereceli türevlerine dayanan deterministik bir hesaplama dizisi üretmektedirler. Yöntemler, arama alanında tek bir noktaya uygulanır. Nokta daha sonra Şekil 5.3'te gösterildiği gibi yinelemeler yoluyla en derin alçalan yönde kademeli olarak geliştirilir. Bu noktadan noktaya yaklaşımın, yerel en iyiyi bulma ihtimali vardır. GA, potansiyel çözümlerin bir popülasyonunu koruyarak çok yönlü bir arama gerçekleştirir. Nüfustan nüfusa yaklaşım, yerel eniyiden kaçış için umut vericidir. Nüfus simüle edilip gelişim geçirmektedir. Her evrim geçirmiş nesilde nispeten daha iyi çözümler yeniden üretilirken, nispeten kötü çözümler doğal seçimde olduğu gibi

elenmektedir. GA'da, yeniden türetilcek bireyi ve elenecek bireyi seçmek için olasılıklı geçiş kuralları uygulanır (Gen, Cheng, & Lin, 2008).



Şekil 5.3 Geleneksel (a) ve genetik (b) yaklaşımların karşılaştırılması (Gen, Cheng, & Lin, 2008)

Arama algoritmaları, problemin çözümünün çözüm kümelerinden oluşmakta olan uzayda aranıp bulunması olarak tanımlanmaktadır. Alandaki her nokta bir çözümü tanımlar. Problem, geçerli çözümlerden oluşmakta olan bu uzaydan, daha sonra, en iyi çözümleri arama ve bulma problemine dönüşmektedir. Tüm algoritma sırasıyla şu işlemleri uygulamaktadır; problemi tanımlamak, hedefi belirlemek ve son olarak bu hedefe ulaşmak için doğru yöntemi kullanmak. GA'ların kullanımını kolaylaştırmak için bazı terminolojilerin bilinmesi gerekmektedir. Arama uzayındaki noktalar fenotipler olarak bilinirken, çözüm uzayındaki temsilcileri genotipler olarak bilinmektedir. Genotipleri temsil etmek için kullanılan yapılar, çeşitli şekillerde genomlar veya kromozomlar olarak bilinmektedir. Genotip, özellikle bir bireyin genetik yapısını ifade etmektedir. Fenotip, bir bireyin gözlemlenebilir görünümünü ifade etmektedir (Yunanca'da feno, "göstermek" anlamına gelir). Bir genotipten bir fenotip üretme süreci morfogenez olarak bilinir (bkz. Şekil 5.4) (Sivanandam & Deepa, 2007).



Şekil 5.4. Çözüm uzayı ve arama uzayı arasındaki geçiş (Rekiek & Delchambre, 2005)

Genel olarak, bir çözümü temsil etmek için kullanılan standart kromozom, tipik olarak gen adı verilen basit değerler dizisi şeklinde gösterilir. Bir gen, arama alanı üzerindeki bir eşdeğerlik ilişkisi olarak tanımlanabilir (Rekiek & Delchambre, 2005).

Genetik Algoritmanın avantajları

GA, geniş potansiyelli bir optimizasyon tekniği olarak bilim dünyası tarafından büyük ilgi gördü. GA'yı optimizasyon problemlerinde uygulamak üç önemli avantaj sağlamaktadır:

1. Uyarlanabilirlik: GA'nın optimizasyon problemleriyle ilgili çok fazla matematiksel gereksinimi yoktur. Evrimsel doğası nedeniyle, GA, problemin belirli iç işleyişine bakmaksızın çözümler arayacaktır ve aradıkça daha da gelişecek ve geliştikçe daha iyi çözümler bulma konusunda hızlanacaktır. GA, kesikli, sürekli veya karışık arama uzaylarında üzerinde tanımlanan her türlü nesnel işlevi ve her türlü kısıtlamayı, yani doğrusal veya doğrusal olmayan her türlü problemi işleyebilmektedir.
2. Kuvvetlilik: Evrimsel operatörlerinin kullanımı, GA'yı global bir arama gerçekleştirmede çok etkili kılarken, çoğu geleneksel sezgisel yöntem genellikle lokal bir arama gerçekleştirmektedir. Birçok çalışma, GA'nın eniyi çözümü bulmada, diğer geleneksel sezgisel yöntemlere göre hesaplama süreleri ve maliyetleri azaltmada daha verimli ve daha sağlam olduğunu kanıtlamıştır.
3. Esneklik: GA, belirli problemlere verimli uygulama yapmak için, o alanda kullanılan sezgisel yöntemlerle hibritleşmede kullanıcılarına büyük esneklik sağlamaktadır (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Genetik algoritmanın çalışma prensibi

Michalewicz (1994), tarafından özetlendiği şekliyle GA beş temel bileşene sahiptir:

1. Probleme yönelik olası çözümlerin genetik algoritma temel alınarak yapılan bir sunumu.
2. Başlangıç popülasyonu yani birincil potansiyel çözümler kümesi.
3. Problem çözümlerini uygunluk koşulları açısından değerlendirme yani bir nevi derecelendirme.
4. Eldeki popülasyonun genetik yapısını değiştirip daha uygun popülasyonlar elde etmek için genetik operatörlerin seçimi (çapraz geçiş, mutasyon, seçilim vb.).
5. Genetik algoritmanın kullandığı parametre değerleri (popülasyon boyutu, olasılıklar, genetik operatörlerin uygulanması vb.).

5.2.1.1 Kodlamaların sınıflandırılması

GA'nın etkili bir şekilde uygulanabilmesi ve problemlerin eniyi çözümlerini bulmak için çeşitli kodlama yöntemleri geliştirilmiştir. Genin alelleri olarak hangi sembollerin kullanıldığına göre kodlama yöntemleri şu şekilde sınıflandırılmaktadır.

Kodlama

Problemin çözümünün bir kromozoma nasıl kodlanacağı, GA için en önemli konulardan biridir. Bu konu, bireyler çözümlere dönüştürüldüğünde genotip uzayından fenotip uzayına çözümün yansıtılmasında büyük rol oynamaktadır. Birçok kodlama yöntemi vardır ve tamamı kullanıcının probleminin biçimine ve onun hangi kodlama yöntemini seçeceğine bağlıdır.

Binary(ikili) kodlama

Holland'ın araştırmalarına göre, kodlama ikili dizeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Holland, 1975). Fonksiyon optimizasyonu için ikili kodlamanın, büyük bir Hamming uzaklığına sahip bir çift kodlamanın fenotip uzayındaki minimum mesafelere sahip noktalara ait olduğu olgusu tanımlandığında Hamming aşırımlarının varlığından dolayı ciddi dezavantajlara sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Örneğin, 0111111111 ve 1000000000 çifti, fenotip uzayındaki komşu noktalara aittir, ancak genotip uzayında maksimum Hamming uzaklığına sahiptirler. Hamming aşırımlarını geçmek için tüm bitlerin bir kerede değiştirilmesi gerekir. Çaprazlama ve mutasyonun onu geçmek için kullanılması ve bunun başarılması olasılığı çok düşüktür. Bu yüzden, ikili kod fenotip uzayındaki noktaların yerini korumaz. Birçok gerçek vakalarda uygulanması, yani

çözümlerin ikili kodlama ile temsil edilmesi neredeyse imkansızdır (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Gerçek sayılı kodlama

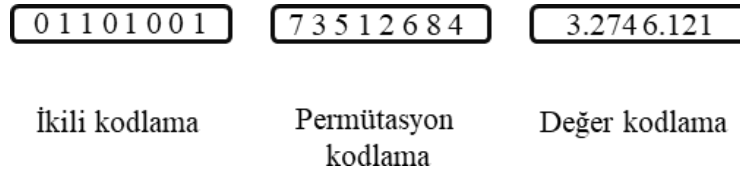
Gerçek sayılı kodlama, optimizasyon problemleri için en çok tercih edilenlerdendir. Fonksiyon optimizasyonları ve kısıtlı optimizasyonlar için gerçek sayı kodlamasının ikili kodlamadan daha yüksek performansa sahip olduğu kullanıcılar tarafından kanıtlanmıştır. Gerçek sayı kodlama yöntemi için genotip uzayının topolojik yapısı, fenotip uzayınıniki ile aynı olduğundan, geleneksel yöntemlerden bazı tekniklerin sentezlenip hibritleştirilmesiyle birçok etkili genetik operatörler yaratmayı kullanıcılar için kolaylaştırmıştır (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Değer kodlama

Daha karmaşık gerçek vakalarda ortaya çıkan problemlerin çözümü için, problemin doğasını yakalayan ve bir genin aleli olarak uygun bir veri yapısı önerilmektedir. Bu gibi durumlarda, bir gen n-ary veya daha karmaşık veri yapısı olarak ortaya çıkabilir (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Permütasyon kodlama

Permütasyon kodlaması, kombinatorial optimizasyon problemleri için uygun bir kodlama yöntemidir. Kombinasyonel optimizasyon problemlerinin özü, bazı kısıtlamalara tabi ve bazı öğelerin en iyi permütasyonunu veya kombinasyonunu aramak olduğundan, Permütasyon kodlaması, bu tür sorunların üstesinden gelmenin en makul yolu olarak kullanıcılar tarafından tercih edilmektedir (Gen, Cheng, & Lin, 2008).



Şekil 5.5. GA'da kullanılan farklı kodlama biçimleri

5.2.1.2 Seçilim Mekanizmaları

Seçilim, GA'daki itici gücü sağlamaktadır. Çok fazla güçle, genetik araştırma gerekenden daha yavaş olacaktır. Seçilim daha az uygulandığında arama uzayı geniş olmaktadır, bu da araştırmanın verimini düşürmektedir. Eğer seçilimi gerektiği kadar

uygularsak, eniyi çözümlü bulma şansımız geniş arama uzayında bulma şansımıza nazaran artmaktadır. Seçilim, araştırmayı arama uzayında daha eniyi çözüm vaat eden bölgelere yönlendirmektedir. Yaygın seçilim yöntemleri aşağıdaki gibidir (Gen, Cheng, & Lin, 2008):

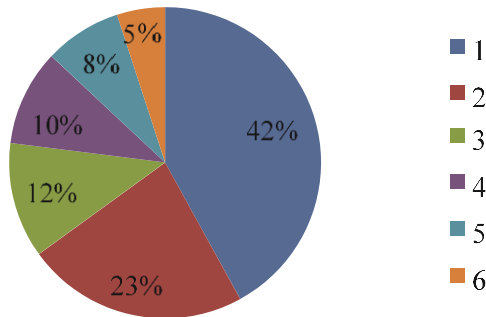
- $(\mu + \lambda)$ -seçilimi
- Turnuva seçilimi
- Kesme seçilimi
- Elitist seçim
- Sıralama ve ölçeklendirme
- Rulet çarkı seçilimi

Ergo-KUMHD problemi için geliştirilen GA modelinde Rulet çarkı seçilimi kullanıldığından izleyen başlıkta ayrıntılı tanıtılmıştır.

Rulet çarkı seçilimi

Rulet çarkı, en yaygın seçilim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin temel çalışma prensibi, Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, kromozomları uygunluk değeriyle orantılı olarak gösteren rulet çarkı modeli oluşturulur. Rulet çarkındaki alanlar her kromozomun seçilme olasılığını yani gelecek nesli hangi kromozomun devam ettireceği olasılığını temsil etmektedir. Bu yöntemde, bireylerin uygunluk değerleri yeniden ölçeklenen uygunluk değerlerinin toplamı 1'e eşit olacak şekilde popülasyon içinde ölçeklendirilir. Bir ebeveyn seçmek için, önce (0, 1) aralığında tek tip bir rasgele sayı üretilir yani tekerlek döndürülür.

Bireylerin Seçim Olasılıkları



Şekil 5.6. Rulet Çarkı

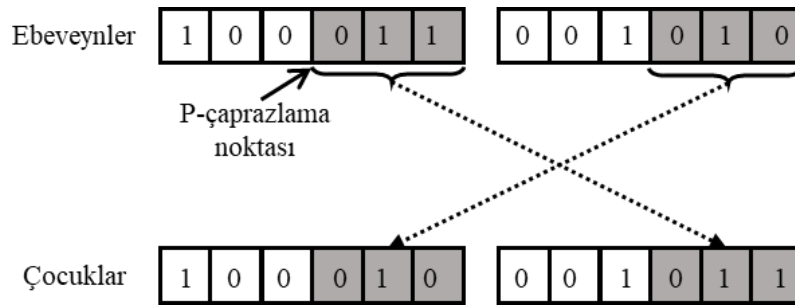
Bu üretilmiş rakama uygun değere sahip birey seçilir. Bireyler rulet çarkında uygunluk değerlerine göre yer kapladıkları için uygunluk değerine en çok uyan birey daha fazla yer kaplamaktadır (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

5.2.1.3 Genetik Algoritma Operatörleri

Seçilim mekanizması, arama uzayından değerlendirilecek yeni çözümler getirmez. Sadece geçiş popülasyonunu oluşturmak için bazı çözümleri kopyalar. Evrim döngüsünün ikinci adımı, yeni bireyleri popülasyona dahil etme sorumluluğunu üstlenen rekombinasyondur. Bu çaprazlama, mutasyon ve inversiyon genetik operatörleri tarafından yapılmaktadır. (Rekiek & Delchambre, 2005).

Çaprazlama

En yaygın GA operatörü çaprazlama operatörüdür. Çocuk üretmek için iki ebeveynin seçildiği ve çaprazlandığı operatördür. Çaprazlamanın amacı, başarılı olanların tespit edilen arama uzay bölgelerinden yeni çözümler türetmektir. Çaprazlama operatörünün birçok çeşidi bulunmaktadır ve en yaygın olanları "P noktası çaprazlama" ve "tek tip geçiş" dir (Goldberg, 1989). P noktası çaprazlamada, her bir ebeveyn P konumlarına 1'den P+1'e kadar numaralandırılmış P+1 bitişik bölümlere bölünür. İki ebeveyn arasında her rastgele bölümün değiş tokuşu ile iki çocuk yaratılır. Tek tip çaprazlama, P noktası çaprazlama olarak düşünülebilir, burada P+1, her ebeveyndeki gen sayısıdır.



Şekil 5.7. Genel çaprazlama örneği

Çaprazlama operatörleri genel olarak iki türe ayrılır:

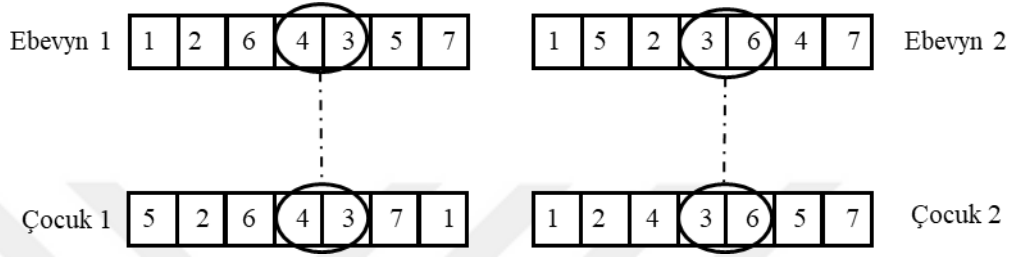
- Basit çaprazlama türleri: tek noktalı, iki noktalı, çoklu noktalı
- Rastgele çaprazlama türleri: düz çaprazlama, karışık çaprazlama

Bu nedenle, her gen bir bölümdür ve her bölüm rastgele iki ebeveyn arasında değiştirilir. Diğer rekombinasyon operatörleri de tek bir çocuk oluşturmak için ikiden fazla ebeveyn kullanan çaprazlama operatörleri gibi birçok şekil ve form alır.

Çaprazlama, GA'lara diğer meta sezgisellere göre daha başarı göstermede avantaj sağlamaktadırlar (Rekiek & Delchambre, 2005).

Sıralı çaprazlama

Davis (1985) tarafından geliştirilen Sıralı çaprazlama (Davis` Order Crossover-OX1) metodunda çaprazlama operatörünün temel özelliği, genlerin konumlarını değil, sırasını dikkate alarak uygulanmasıdır.



Şekil 5.8. Sıralı çaprazlama (Davis` Order Crossover-OX1) örneği

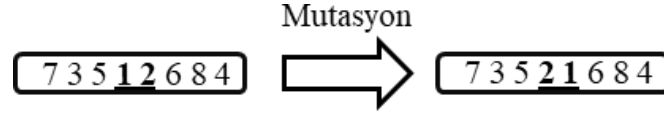
Çocuğu, bir ebeveynin kesim noktalarını seçerek ve diğer ebeveyninden de genlerin göreceli sırasını koruyarak elde eder. Şekil 5.8'de tasvir edilen ebeveynleri ve biri üçüncü ve dördüncü genler arasında, diğeri beşinci ve altıncı genler arasında olmak üzere iki kesme noktasıyla ayrılmıştır. İlk çocuk için, iki kesme noktası arasındaki genler, ilk ebeveyninden alınır. Diğer genler, ikinci kesme noktasından sonraki ilk konumdan başlayarak ikinci ebeveyninden alınır. İkinci çocuk, iki ebeveynin rollerini değiştirerek benzer şekilde elde edilmektedir (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Mutasyon

Mutasyon, çeşitli kromozomlarda kendiliğinden rastgele değişiklikler türeten arka plan operatörüdür. Mutasyona ulaşmanın basit bir yolu, bir veya daha fazla geni değiştirmektir. GA'da mutasyon, ya seçim sürecinde popülasyondan kaybedilen genlerin yeni bir bağlamda denenebilmeleri için değiştirilmeleri ya da ilk popülasyonda bulunmayan genlerin sağlanması gibi hayati role sahiplerdir (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Mutasyon olasılığı, popülasyondaki toplam gen sayısının yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Mutasyon olasılığı, yeni genlerin deneme için popülasyona dahil edilme olasılığını kontrol etmektedir. Çok düşükse, fayda sağlayabilecek pek çok gen asla denenmez, çok yüksekse, çok fazla rastgele karışıklık olur, çocuklar ebeveynlere benzerliğini kaybetmeye başlar ve algoritma arama geçmişinden öğrenme yeteneğini kaybeder (Rekiek & Delchambre, 2005).

Tek tip mutasyon, sınır mutasyonu ve düz mutasyon gibi rastgele mutasyon operatörleri, bir geni belirli bir aralıkta rastgele seçilen bir gerçek sayı ile değiştiren geleneksel mutasyon operatörlerine aittir.



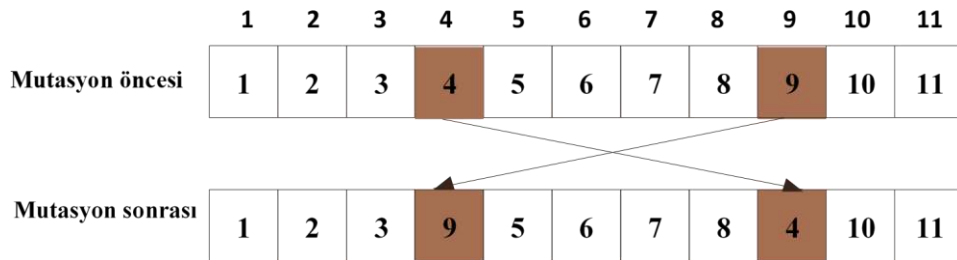
Şekil 5.9. Komşu iki genin değiştirilmesi

Dinamik mutasyon (tek tip olmayan mutasyon), aritmetik mutasyon operatörü olarak sınıflandırılan, yüksek hassasiyetle eniyi mutasyonlara ulaşmayı amaçlayarak tasarlanmıştır.

Yönlü mutasyon, amaç fonksiyonunun gradyan genişlemesini kullanan bir tür yön temelli mutasyondur. Kromozomların bir köşeye sıkışmasından kaçınmak için belirlenmiş yön serbest bir yön olarak rastgele verilebilmektedir. (Gen, Cheng, & Lin, 2008)

İkili yer değiştirme operatörü (swap)

İkili yer değiştirme operatörü, swap operatörü olarak da bilinmektedir. Bu, mutasyon operatörünün uygulanması için seçilmiş kromozomda belirlenen iki genin konumunun birbirleriyle değiş tokuş edilmesi yoluyla uygulanmaktadır. Permutasyon kodlama yapısıyla oluşturulmuş kromozomlardaki genlerin mutasyon operatörü olarak swap, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 5.10'da bu mutasyon uygulaması için bir örnek yer almaktadır. Uygulamadan da anlaşılacağı üzere dokuzuncu ve dördüncü genler birbirleriyle yerlerini değiştirmişlerdir (Rekiek & Delchambre, 2005).



Şekil 5.10. İkili yer değiştirme operatörü

5.2.1.4 Sonlandırma koşulları

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi genetik algoritmaları durdurmak için sonlandırma koşulunun belirlenmesi gerekmektedir. Sonlandırma koşulu olarak uygulanabilecek çeşitli durma koşulları izleyen şekilde sıralanabilir (Sivanandam & Deepa, 2007);

Maksimum nesil: Genetik algoritma, belirtilen nesil sayına eriştiğinde durur.

Belirlenmiş süre: Belirli bir süre geçtiğinde genetik süreç sona erer.

Uygunlukta bulunamadığında: Belirli sayıda nesil için popülasyonun eniyi uygunluk değerinde bir değişiklik olmazsa, genetik süreç sona erecektir.

Durak nesilleri: Ardışık uzunluktaki Durak nesillerinin bir dizisi için amaç fonksiyonunda herhangi bir gelişme olmazsa algoritma durur.

Değişmezlik zaman sınırı: Durma zaman sınırına eşit saniye cinsinden bir zaman aralığında amaç fonksiyonunda herhangi bir gelişme olmazsa algoritma durur.

İterasyon sayısı sınırı: İterasyon sayısı belirlenen bir değeri aştığında, genetik algoritma sonlandırılır.

5.2.2. Ergo-KUMHD için genetik algoritma modeli

Genetik algoritma, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilecek uyarlanabilir yöntemlerden birisidir. Canlı organizmaların evrimsel süreçlerine dayanmaktadırlar. Birey popülasyonları birçok nesil boyunca, doğal seçim ve en uygun olanın hayatta kalması ilkelerine göre gelişmektedirler. Yaşadıkları ortama en iyi uyum sağlayan bireylerin, hayatta kalma oranı da yüksek olmaktadır. Buna bağlı olarak bu bireylerden nispeten daha çok sayıda nesil türemektedir. Popülasyon, bireyin yeniden üretilme olasılığını belirleyen amaç fonksiyonu ile seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak gelişmektedir. Farklı atalardan gelen genlerin güçlü özellikleri, bazen her iki ebeveyninkinden daha iyi olan, süper uyumlu çocuklar üretebilirler. Bu şekilde bireyler, çevrelerine giderek daha uygun hale gelerek evrimleşirler.

Holland (1975), Genetik algoritma kullanılarak karmaşık optimizasyon problemlerinin çözülebileceğini ortaya koymuş, Goldberg (1989) ve Liepins ve Hilliard (1990), genetik algoritmaların farklı yönleri hakkında ayrıntılı çalışmalar yapmışlardır.

Araştırmacılara göre GA yaklaşımının iki avantajı daha ön plana çıkmaktadır

Bunlar:

- GA'lar tek bir nokta yerine tüm popülasyonda çözüm aramaktadır. Bu, birçok çözüm aynı anda düşünüldüğünden algoritmanın yerel bir eniyide takılıp kalmama olasılığını artırmaktadır

- GA uygunluk fonksiyonları herhangi bir şekilde olabilmekte ve birkaç uygunluk fonksiyonu aynı anda kullanılabilir.

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda Ergo-KUMHD problemi için GA yaklaşımının uygun olduğu görülmektedir. Şekil 5.11`de Ergo-KUMHD için GA`nın sözde kodu(pseudocode) sunulmuştur.

Uygulanan GA yaklaşımı, daha iyi anlaşılması için EK-7`de verilen 11 görevli Jackson test problemi ile örneklendirilmiştir.

```

Veri: Ergo-KUMHD girdileri, GA girdileri
Sonuç: Ergo-KUMHD çıktıları
başla
Başlangıç popülasyonunu (permütasyon kodlama) oluştur
Kromozomları uygunluk fonksiyonuna ( $w_1 \times z_j + w_2 \times m\phi$ ) göre değerlendir
  İterasyon başlangıcı
  SEÇİLİM:
  Her bir kromozomun uygunluk değerine göre Rulet tekerleği yöntemini uygula
  GENETİK OPERATÖRLER:
  Kromozomlara çaprazlama operatörünü (Davis` Order Crossover-OX1) uygula
  Kromozomlara değişim operatörünü (Swap (takas)) uygula
dur iterasyon  $\leq 100$  olduğunda
  Yeni Kromozomları uygunluk fonksiyonuna ( $w_1 \times z_j + w_2 \times m\phi$ ) göre değerlendir
  En iyi uygunluk değerine (yani en küçük uygunluk değerine) sahip kromozomu sonuç olarak al
dur

```

Şekil 5.11. Ergo-KUMHD için GA`nın sözde kodu(pseudocode)

Kromozom yapısı ve popülasyon başlangıcı

Permütasyon kodlama yöntemi bir görev sırasını ve optimizasyon probleminin bir çözümünü temsil etmenin en okunabilir yolu olduğundan çözümde tercih edilmiştir. Permütasyon kodlama hakkında 4. Bölümde bilgi verilmiştir. Şekil 5.12`de örnek çalışma için oluşturulmuş kromozom gösterilmektedir. Bu kromozom 11 genden oluşmaktadır ve her gen bir görevi temsil etmektedir.

8	4	9	11	7	5	3	1	10	2	6
---	---	---	----	---	---	---	---	----	---	---

Uygunluk fonksiyonu Şekil 5.12. Örnek problem için kodlama örneği

Genetik algoritmalarda ele alınan kromozomun aranan çözüm olup olmadığını değerlendirmek için uygunluk fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu çalışmada uygunluk

fonksiyonu Ergo-KUMHD için geliştirilmiş olan KTDP modelinin amaç fonksiyonudur ve denklem (5.1) de görülmektedir.

$$w_1 \times z_j + w_2 \times m\phi \quad (5.1)$$

Burada,

$w_1 \times z_j$: Açılan istasyon sayısını

$w_2 \times m\phi$: Hat içerisinde en yüksek HMD skorunu temsil etmektedir.

Seçilim mekanizması

Montaj hattı dengelemede genetik algoritma ile yapılan çalışmalarda, seçim mekanizması olarak yaygın kullanılan yöntem Rulet çarkı seçilimidir (Taha vd. (2011), Sabuncuoğlu vd. (2000), Mutlu vd.(2013), Kalaycı vd.(2016), Hwang vd. (2008), Cheng vd. (2013)). Bu nedenle, bu çalışmada seçim yöntemi olarak Rulet çarkı kullanılmıştır. Rulet çarkı yöntemiyle seçilmiş iki ebeveyn Şekil 5.13`de sunulmuştur.

Ebeveyn 1	8	4	9	11	7	5	3	1	10	2	6
Ebeveyn 2	8	11	5	4	9	2	3	7	10	1	6

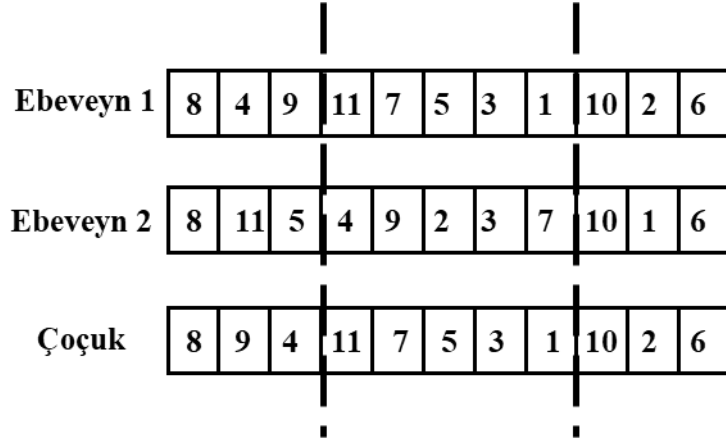
Şekil 5.13. Rulet çarkı yöntemiyle örnek problem için seçilmiş iki ebeveyn

Genetik operatörler

Çaprazlama ve mutasyon olmak üzere iki tür genetik operatör vardır. Çaprazlama, mevcut popülasyondaki iki bireyin bir sonraki popülasyon için çocuk oluşturma işlemidir. Mutasyon operatörü, kromozomlardaki genleri rastgele değiştirmek için kullanılır. Yapılmış genetik algoritmayla ilgili montaj hattı dengeleme çalışmalarında çaprazlama operatörü olarak Sıralı çaprazlama (Davis` Order Crossover-OX1 Davis (1985)) yönteminin iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Kalaycı vd. (2016), Cheng vd. (2013), Razali ve Geraghty (2011)).

GA`da kesme noktalarının seçimi karar vericiye bağlıdır. Çalışmada, ilk kesme noktasını seçmek için toplam gen sayısı dörde bölünmüş, ikinci kesme noktasıysa toplam

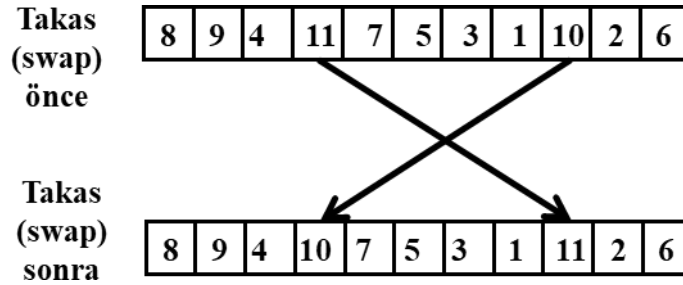
gen sayısının üçle çarpılıp dörde bölünmesiyle seçilmiştir. Seçilmiş kesme noktalarına uygun olarak çaprazlama örneği Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Örnek problem için OX1 Çaprazlama örneği

Çaprazlama ve bu yöntem hakkında 5. bölümde detaylı bilgi verilmiştir.

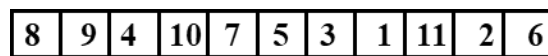
Çalışmada mutasyon operatörü olarak takas (swap) yöntemi kullanılmıştır. Montaj hattı dengeleme problemlerine en uygun mutasyon operatörü yöntemidir. Bu yöntemle çözülmüş bir çok problem literatürde yer almaktadır (Mutlu vd.(2013), Kalayci vd.(2016), Hwang vd. (2008), Razali ve Geraghty (2011)). Örnek problem için Swap yöntemiyle takas işlemi Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.15. Örnek problem için Swap (takas) örneği

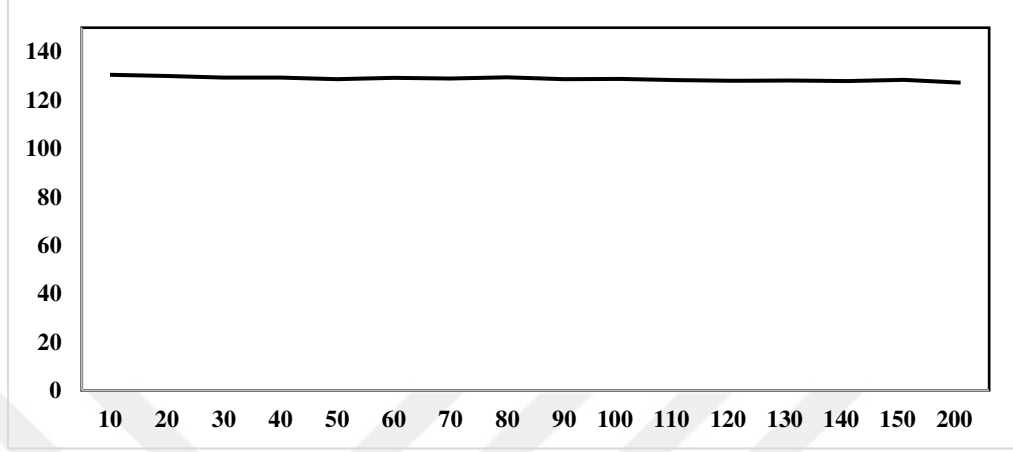
Sonlandırma koşulu

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi genetik algoritmaları durdurmak için sonlandırma koşulu belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada genetik algoritma, 100 iterasyon sayısına ulaştığında durmaktadır ve uygunluk değeri en iyi olan kromozom çözüm olarak seçilmektedir.



Şekil 5.16. Uygunluk değeri en iyi olan kromozom

Şekil 5.17`de uygulama çalışması ($w_1 = 10$, $w_2 = 1$) ağırlıkları için farklı iterasyonların uygunluk değerine yakınsama grafiği verilmiştir. 100 iterasyon bu grafik dikkate alınarak seçilmiştir.



Şekil 5.17. Yakınsama grafiği

5.2.3. Ergo-KUMHD genetik algoritma model uygulaması

GA modelinin amaç fonksiyonundaki ağırlıklara yönelik analiz yapabilmek amacıyla, amaç fonksiyonlarının ağırlıkları ($w_1 = 10$, $w_2 = 1$) ; ($w_1 = 100$, $w_2 = 1$) ; ($w_1 = 1$, $w_2 = 0$) olacak şekilde 3 farklı durum için sınanmıştır. GA modeli 10 defa çalıştırılmıştır. Model Intel(R) Celeron(R) CPU N2830 2.16 GHz işlemcili ve 8 GB RAM bulunan bir kişisel bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Üç farklı amaç fonksiyonu ağırlıkları ile amortisör fabrikasında yapılan uygulama verileri için GA modelimizi çalıştırdığımızda Tablo 5.4`te yer alan istasyon sayısı, istasyonlardaki toplam HMD skorları ve standart sapma değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.4. Uygulama çalışması için GA`dan elde edilmiş istasyon HMD değerleri karşılaştırması

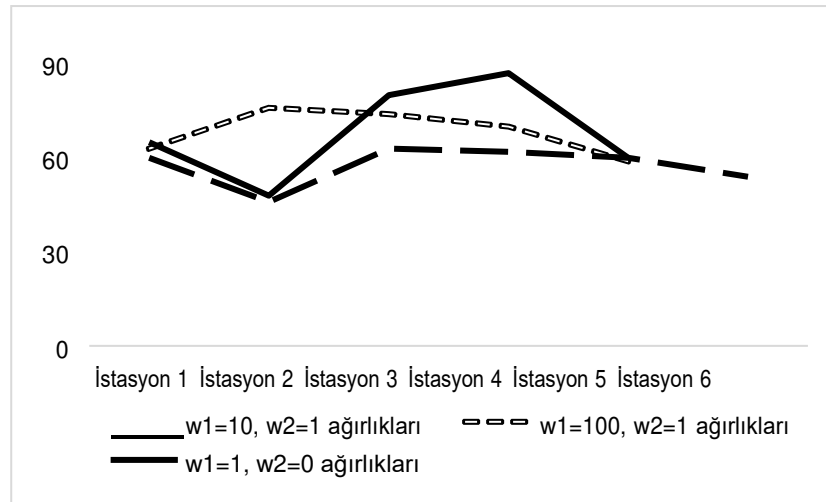
Amaç ağırlıkları	($w_1 = 10$, $w_2 = 1$)	($w_1 = 100$, $w_2 = 1$)	($w_1 = 1$, $w_2 = 0$)
İstasyon 1	61	64	66
İstasyon 2	47	77	49
İstasyon 3	64	75	81
İstasyon 4	63	71	88
İstasyon 5	61	60	61
İstasyon 6	55	-	-
Standart Sapma	5.88	6.47	13.99

$w_1 = 1$, $w_2 = 0$ amaç fonksiyonu ağırlıklarının kullanıldığı GA modelinde, yani ergonomik risk faktörünün dikkate alınmadığı durumda ortaya çıkan sonuç; montaj hattının enbüyük HMD skorunun daha yüksek atandığı, standart sapma değerinin de, yani

istasyonlar arası ortalamadan sapma değeri de daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bu bize ergonomik açıdan operatörlere dengesiz iş yükü dağıldığını göstermektedir. GA modelinin bu amaç fonksiyonları ağırlıklarıyla çözüm süresi 114 saniyedir.

Diğer amaç ağırlığı çözümlerinde ($w_1 = 10, w_2 = 1$; $w_1 = 100, w_2 = 1$) enbüyük HMD değeri ve istasyonlar arası ortalamadan sapma değeri amaçlandığı şekilde daha düşük gerçekleşmiştir. ($w_1 = 100, w_2 = 1$) amaç fonksiyonu ağırlıkları ile GA modelinin çözüm süresi 121 saniyedir. Bu ağırlıklarla istasyon sayısı daha çok önemsendiği için ergonomik denge, istasyon sayısından ödün vermeden elde edilmiştir. ($w_1 = 10, w_2 = 1$) amaç fonksiyonu ağırlıklarının çözümünde görülmektedir ki, istasyon sayısını $w_1 = 10$ amaç ağırlığıyla $w_1 = 100$ 'e göre daha az önemsediklerimizde, bir fazla istasyonla ergonomik açıdan daha dengelenmiş bir montaj hattı ataması elde edebilmekteyiz. Modelin bu esnekliği karar vericilere, alternatif ağırlıklarla istenen sonucu üretebilmektedir. GA modelinin ($w_1 = 10, w_2 = 1$) amaç ağırlıklarıyla çözüm süresi 114 saniyedir.

Şekil 5.18 incelendiğinde, $w_1 = 10, w_2 = 1$ ve $w_1 = 100, w_2 = 1$ ağırlıklarıyla elde edilen istasyon HMD skorlarının $w_1 = 1, w_2 = 0$ ağırlıklarıyla elde edilen atamaya göre daha dengeli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.18. İstasyonların HMD skorlarının çözümlere göre dağılımı

Ergo-KUMHD problemine yönelik geliştirilmiş KTDP modelinin amortisör fabrikasında yapılan uygulaması ile GA modelinin sonuçları (EK-8) karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Optimal çözümü garantileyen KTDP modeli atamalarında, GA modeli atamalarından daha iyi bir çözüm elde edilmiş olsa da GA modeli de kısa sürede

istasyonlar arası HMD skorlarını küçük standart sapma değeriyle elde edebilmiştir. KTDP modelinin makul sürede çözüm bulamayacağı büyüklükteki problemler için, önerilen GA modelinin tatmin edici sonuçlar sunduğu görülmektedir. Modelin farklı problemler için test sonuçları izleyen başlık altında verilmiştir.

Test Problemleri Üzerinde Sınama

Bu bölümde, Ergo-KUMHD için geliştirilmiş olan GA modeli Tablo 5.5'te gösterilen 7 farklı test problemi için sınanmıştır. Bu problemlerin literatürde var olan farklı çevrim süreleri de dikkate alınmıştır. Böylece test edilen veri seti sayısı 26'ya ulaşmıştır.

Tablo 5.5. GA modelinin uygulandığı test problemleri

PROBLEM	MODEL SAYISI	GÖREV SAYISI	ÇEVİRİM SÜRESİ
Thomopoulos (N=19)	3	19	19
Mitchell (N=21)	4	21	21
Kim (N=61)	4	61	12
Tonge (N=70)	4	70	176
Weemag (N=75)	5	75	56
Arcus (N=111)	5	111	5755
Barthol (N=148)	4	148	170

Bir GA'nın çözümünde, kullanılan seçim mekanizması, algoritma operatörleri ve sonlandırma koşulları gibi yöntemler çok önemlidir. Bunların yanı sıra popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı, deneme sayısı, mutasyon oranı gibi değerlerde çözüme ve çözümün süresine büyük etki eden parametrelerdir. Tablo 5.6'de bu parametreler ve miktarları hakkında bilgiler verilmektedir.

Tablo 5.6. GA'nın parametreleri ve miktarları

PARAMETRE	DEĞER
Popülasyon büyüklüğü	30
İterasyon sayısı	100
Deneme sayısı	10
Mutasyon oranı	0.2
Mutasyon yöntemi	TAKAS (SWAP)
Seçilim	Rulet çarkı
Çaprazlama yöntemi	OX 1 (Davis`order)

Tablo 5.6`de verilen parametrelere göre Tablo 5.5`te verilen test problemleri, amaç fonksiyonundaki ağırlıkların daha önce ele alınan üç farklı değerlerine göre çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 5.7`de sunulmuştur.

Tablo 5.7. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinden elde edilen sonuçlar

		İSTASYON SAYILARI		
PROBLEM	C	w ₁ =1, w ₂ =0	w ₁ =100, w ₂ =1	w ₁ =10, w ₂ =1
Thomopoulos (N=19)	19	4	4	5
	48	2	2	5
	76	2	2	5
	120	2	2	7
Mitchell (N=21)	14	8	8	8
	15	8	8	8
	21	5	5	5
Kim (N=61)	12	10	9	10
	40	3	3	3
	60	2	2	2
	600	2	2	10
Tonge (N=70)	176	21	21	21
	364	10	10	10
	468	8	8	8
Weemag (N=75)	56	30	30	30
	120	13	13	13
	164	10	10	10
Arcus (N=111)	5755	28	27	28
	6615	24	25	25
	10000	16	16	16
	10743	15	15	15
	11378	14	14	14
	17067	9	9	9
Barthol (N=148)	84	52	53	53
	101	44	44	44
	170	26	26	26

Tablo 5.8`da farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinden elde edilen HMD skorlarının standart sapması verilmiştir. Tablo 5.7 ve Tablo 5.8`u incelediğimizde ortaya çıkan sonuç ergonomik değeri (w₂) istasyon enküçüklemeye (w₁) nazaran daha küçük ağırlıkla dikkate alsak bile, montaj hattında açılan istasyonlar arası HMD skorlarının daha dengeli dağıldığı görülmektedir (EK-9, EK-10). N=111 ve N=148 gibi büyük boyutlu problemlerde amaç ağırlıkları karar vericinin ihtiyacına göre değiştirilerek daha iyi sonuçlara ulaşmak mümkündür.

Tablo 5.8. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinden elde edilen HMD skorlarının standart sapması

		HMD SKORLARIN STD.S		
PROBLEM	C	w ₁ =1, w ₂ =0	w ₁ =100, w ₂ =1	w ₁ =10, w ₂ =1
Thomopoulos (N=19)	19	31.10	1.27	3.71
	48	84.43	0.27	4.15
	76	106.59	103.05	3.22
	120	106.88	103.05	48.66
Mitchell (N=21)	14	7.72	6.68	6.60
	15	7.84	6.02	6.59
	21	7.18	3.50	5.62
Kim (N=61)	12	2.86	2.39	1.11
	40	9.07	1.44	0.45
	60	10.00	0.90	0.75
	600	28.20	5.70	1.51
Tonge (N=70)	176	7.08	4.96	5.64
	364	12.96	8.40	6.71
	468	10.82	5.41	7.05
Weemag (N=75)	56	4.07	3.84	3.49
	120	4.86	4.21	2.77
	164	11.43	6.47	7.95
Arcus (N=111)	5755	18.96	15.23	15.42
	6615	18.60	17.80	15.89
	10000	22.04	19.17	19.60
	10743	25.59	19.32	22.41
	11378	26.70	20.38	19.41
	17067	34.59	15.69	24.33
Barthol (N=148)	84	16.77	16.04	16.00
	101	17.14	16.28	16.78
	170	21.17	13.26	13.71

Tablo 5.9`da Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinin çözüm süreleri verilmiştir.

Tablo 5.9. Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinin test problemlerinde gerçekleşen çözüm süreleri

		ORTALAMA ÇÖZÜM SÜRESİ (sn)		
PROBLEM	C	w ₁ =1, w ₂ =0	w ₁ =100, w ₂ =1	w ₁ =10, w ₂ =1
Thomopoulos (N=19)	19	5	4	17
	48	4	5	10
	76	4	5	9
	120	5	5	18
Mitchell (N=21)	14	10	9	9
	15	9	9	9
	21	9	9	9
Kim (N=61)	12	138	140	136
	40	132	135	136
	60	136	137	138
	600	136	140	145
Tonge (N=70)	176	221	218	224
	364	211	223	226
	468	225	212	228
Weemag (N=75)	56	194	201	223
	120	191	185	192
	164	177	195	182
Arcus (N=111)	5755	856	894	900
	6615	881	873	923
	10000	880	868	981
	10743	820	881	930
	11378	920	908	939
	17067	882	945	910
Barthol (N=148)	84	1644	1634	1631
	101	1660	1629	1660
	170	1606	1653	1602

Tablo 5.10`de Farklı amaç ağırlıklarına göre GA modelinin çözümünden ele edilmiş istasyon sayıları ile literatürde var olan klasik UMHD ve KUMHD`lerin çözümlerinden elde edilen istasyon sayıları karşılaştırılması sunulmuştur. Bu çözüm sonuçlarını kullanma nedenimiz literatürde Ergo-KUMHD`yle ilgili herhangi bir çalışmaya rastlamamış olmamızdır. Sonuçları incelediğimizde, problemlerin çözümlerinin çoğunda daha zor bir problemi ele almamıza rağmen aynı istasyon sayılarına erişilmiştir. Ele alınan problem yapısının getirdiği ergonomik zorlukları dengelemek, teorik olarak daha az sayıda istasyonla çalışıldığında zamanla gerçekleşecek sapmaların planlamaya etkisini azaltacaktır. Planlanan üretim çıktısı hedeflerine ulaşamamak, firmalara hem mali yük hem de itibar kaybı yaşatacağından, ergonomik

yüklerin getireceği sapmaları dikkate almak özellikle bu tür karmaşık problem yapılarında çok önemlidir.

Tablo 5.10. Örnek problemlerin çözümlerinin karşılaştırılması

		İSTASYON SAYILARI			İSTASYON SAYILARI	
		ERGO-KUMHD			UMHD	KUMHD
PROBLEM	C	w ₁ =1, w ₂ =0	w ₁ =100, w ₂ =1	w ₁ =10, w ₂ =1		GA
Thomopoulos (N=19)	120	2	2	7		4
Mitchell (N=21)	14	8	8	8	8	
	15	8	8	8	8	
	21	5	5	5	5	
Kim (N=61)	600	2	2	10		10
Tonge (N=70)	176	21	21	21	21	
	364	10	10	10	10	
	468	8	8	8	8	
Weemag (N=75)	56	30	30	30	30	
Arcus (N=111)	5755	28	27	28	27	16
	10000	16	16	16	15	
	10743	15	15	15	15	
	11378	14	14	14	14	
	17067	9	9	9	9	
Barthol (N=148)	84	52	53	53	51	
	101	44	44	44	42	
	170	26	26	26	25	

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gelişen rekabetçi üretim ortamıyla şirketlerin daha çok kârlılığı artırmaya odaklanması, montaj hatlarında ergonomik etkenlerin önemsenmemesine sebep olabilmektedir. Ergonomik etkenleri dikkate almayan montaj hattı dengeleme çözümleri, işçilerin iş yükünü dikkate almadan sadece istasyon veya çevrim süresinin enküçüklenmesine odaklanmaktadır. Bu şekilde atanan görevler yorgunluk vb. etkilerle planlanan sürede eksiksiz tamamlanamamaktadır. İşçiler, görevleri tamamlasalar dahi uzun süre dengesiz yük altında çalıştıkları için oluşan strese bağlı hatalar ve hatalara bağlı olarak da iş kazaları oluşabilmektedir. Uzun vadede ergonomik etkenlerin göz ardı edilmesi KİSH'e neden olabilmektedir.

Literatür araştırması yaparken ergonomiyi dikkate alan bazı çalışmalara rastlasak da bu çalışmalarda operatör iş yükünü daha da artıran karma modellenli U-tipi montaj hattı dengeleme problemi üzerinde bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu tez çalışması ile Karma Modelli U-tipi Montaj Hattı Dengeleme problemi için ergonomik etkenler dikkate alınarak bir KTDP modeli ortaya konmuştur. Model bir uygulama çalışmasında kullanılmış, literatürdeki bazı test problemleri üzerinde sınanmıştır. Literatürdeki test problemlerinde OCRA ile elde edilmiş risk değerleri HMD skorlarına işlem süresi ve iş tanımları dikkate alınarak dönüştürülmüş ve modelde kullanılmıştır. 53 görev sayısına ait bir test probleminin çözümü bir günden fazla sürdüğünden, problem boyutu büyüdüğünde dinamik çalışma ortamında hızlı sonuç almak için modelimiz yetersiz kalacağından, problemin çözümüne yönelik bir Genetik Algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen Ergo-KUMHD modelinin, klasik KUMHD modellerine nazaran HMD skorlarını istasyonlara daha dengeli atadığı görülmektedir. Karar vericinin benimseyeceği amaç ağırlıklarına göre, HMD skorunu dengeli atamanın yanında yeni istasyon açmadan bunu yapması işletmeler için ekonomik açıdan daha cazip olmaktadır. Çalışmanın en önemli katkısıysa, hat boyunca operatörlere ergonomik açıdan daha dengeli bir atama yaparak çalışma koşullarını iyileştirmesidir. Bu iyileştirme, iş kazalarının ve tekrarlı işlere bağlı oluşan hastalıkların azaltılmasında yardımcı olacaktır. Modelde kullanılan HMD Risk Değerlendirme Yöntemi yerine çeşitli risk değerlendirme yöntemleri modele dâhil edilebilir. Birden fazla risk değerlendirme yöntemi aynı anda kullanılabilir.

Genetik algoritmelerde, kromozomun nasıl kodlanacağı problemde sonraki tüm adımları şekillendiren kilit ve önemli bir faktördür. Bu çalışmada da permütasyon tabanlı kodlama tercih edilmiştir. Bu kodlama yöntemi bir görev sırasını ve optimizasyon probleminin bir çözümünü temsil etmenin en okunabilir yolu olduğundan tercih edilmiştir. Önerilen permütasyon kodlamayla verimli bir biçimde yeni kromozom üretilmesini sağlamak amacıyla uygun genetik operatörler seçilmiştir. Çaprazlama operatörü olarak sıralı çaprazlama (Davis` Order Crossover-OX1) ve mutasyon operatörü olarak da takas (swap) yöntemleri kullanılmıştır. Önerilmiş genetik algoritma, belirlenmiş enbüyük iterasyon sayısına ulaştığında sonlandırılmaktadır. Geliştirilmiş genetik algoritma, 2 küçük 3 orta ve 2 büyük olmak üzere farklı çevrim süreleriyle, toplam 26 veri setinde test edilmiştir. Literatürde KUMHD`de ergonomi dikkate alan çalışmaya rastlanmadığından herhangi bir kıyaslama yapılamamıştır. Ancak, model sonuçları, literatürden erişilebilen UMHD ve KUMHD`lerle kıyaslanmıştır. Sonuçlar, amaç ağırlıkları için ($w_1 = 10, w_2 = 1$) ; ($w_1 = 100, w_2 = 1$) ; ($w_1 = 1, w_2 = 0$) olacak şekilde 3 farklı duruma yönelik sınanmıştır.

Tüm bunlar işletmelerdeki sürdürülebilirliği artıracak ve daha iyi çalışma koşulları oluşturulabilecektir. Ergonomik etkenleri dikkate almak, şirketler tarafından genellikle zahmetli yükümlülük olarak görülmektedir. Bu düşünceye etki eden en büyük nedenlerden biri, ergonomik etkenler dikkate alındığında genellikle istasyon sayısının artması ve buna bağlı olarak işçi sayısının artmasıdır. İşçi sayısının artması işçi maliyetinin artması anlamında değerlendirilmektedir. Uzun vadede, artan istasyon sayısının hedeflenen üretim çıktılarından sapma ve işçilerde oluşabilecek sağlık problemlerinin getireceği yüklerden şirketleri koruyacağı göz ardı edilmektedir. Bu çalışmadan ortaya çıkan sonuçların, şirketleri ergonomik normlara uyum sağlayabilecek ve kârlılıklarını koruyabilecek tasarım metodolojilerini benimsemeye teşvik edeceğini umuyoruz.

KAYNAKÇA

- Aase, G., Olson, J., & Schniederjans, M. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156(3), 698-711. <https://academic.microsoft.com/paper/2045070534> adresinden alındı
- Akyol, S., & Baykasoğlu, A. (2016). ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 291-302. <https://academic.microsoft.com/paper/2462487023> adresinden alındı
- Alkan, E., & Ilgin, M. (2018). BİR ELEKTRONİK FİRMASININ MONTAJ HATLARININ ERGONOMİK ANALİZİ. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 149-158. <https://academic.microsoft.com/paper/2785602375> adresinden alındı
- Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra, J., & Lazarev, A. (2018). Work planning in low-volume assembly lines under ergonomic constraints. *Procedia CIRP*, 72, 786-789. <https://academic.microsoft.com/paper/2810315531> adresinden alındı
- Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra, J., & Lazarev, A. (2018). Work planning in low-volume assembly lines under ergonomic constraints. *Procedia CIRP*, 72, 786-789. <https://academic.microsoft.com/paper/2810315531> adresinden alındı
- Asl, A., Solimanpur, M., & Shankar, R. (2019). Multi-objective multi-model assembly line balancing problem: a quantitative study in engine manufacturing industry. *Opsearch*, 56(3), 603-627. <https://academic.microsoft.com/paper/2952971276> adresinden alındı
- Bagher, M., Zandieh, M., & Farsijani, H. (2011). BALANCING OF STOCHASTIC U-TYPE ASSEMBLY LINES: AN IMPERIALIST COMPETITIVE ALGORITHM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(14), 271-285. <https://academic.microsoft.com/paper/2063161760> adresinden alındı

- Battini, D., Calzavara, M., Otto, A., & Sgarbossa, F. (2016). The Integrated Assembly Line Balancing and Parts Feeding Problem with Ergonomics Considerations. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 191-196. <https://academic.microsoft.com/paper/2507122707> adresinden alındı
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., & Sgarbossa, F. (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative methods. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 586-591. <https://academic.microsoft.com/paper/2301111833> adresinden alındı
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2016). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model. *International Journal of Production Research*, 54(3), 824-845. <https://academic.microsoft.com/paper/2293198657> adresinden alındı
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), 30-42. <https://academic.microsoft.com/paper/2087430933> adresinden alındı
- Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., & Batalla-García, C. (2016). Maximizing comfort in Assembly Lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. *computational intelligence*, 9(4), 788-799. <https://academic.microsoft.com/paper/2462439398> adresinden alındı
- Bautista, J., Batalla-García, C., & Alfaro-Pozo, R. (2016). Models for assembly line balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes. *European Journal of Operational Research*, 251(3), 814-829. <https://academic.microsoft.com/paper/2199990803> adresinden alındı
- Baykasoğlu, A., & Akyol, Ş. (2014). ERGONOMİK MONTAJ HATTI DENGELEME. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4). <https://academic.microsoft.com/paper/1541590761> adresinden alındı
- Baykasoğlu, A., & Özbakır, L. (2007). Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

- 32(1), 139-147. <https://academic.microsoft.com/paper/2020903639> adresinden alındı
- Baykasoglu, A., Tasan, S., Tasan, A., & Akyol, S. (2017). Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(2), 96-115. <https://academic.microsoft.com/paper/2587471271> adresinden alındı
- Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M., & Pilati, F. (2017). Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 348-367. <https://academic.microsoft.com/paper/2753044269> adresinden alındı
- Botti, L., Mora, C., & Regattieri, A. (2017). Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 481-491. <https://academic.microsoft.com/paper/2612288059> adresinden alındı
- Boysen, N., Flidner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693. <https://academic.microsoft.com/paper/2127823468> adresinden alındı
- Cheng, C., Gunasekaran, A., & Ho, K. (2013). Genetic search and the U-line balancing problem. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 14(4), 414-440. <https://academic.microsoft.com/paper/2039644278> adresinden alındı
- David, G. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine*, 55(3), 190-199. <https://academic.microsoft.com/paper/2149552744> adresinden alındı
- Davis, L. (1985). Applying adaptive algorithms to epistatic domains. *IJCAI'85 Proceedings of the 9th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 1*, (s. 162-164). <https://academic.microsoft.com/paper/1589975099> adresinden alındı
- Eryuruk, S., Kalaoglu, F., & Baskak, M. (2008). Assembly Line Balancing in a Clothing Company. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. <https://academic.microsoft.com/paper/2129840342> adresinden alındı

- Fokkert, J.-d., & Kok, A. (1997). The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 399-412. <https://academic.microsoft.com/paper/2017146819> adresinden alındı
- Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach*. <https://academic.microsoft.com/paper/629041493> adresinden alındı
- Gökçen, H., & Ağpak, K. (2004). A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 577-585. <https://academic.microsoft.com/paper/2132248597> adresinden alındı
- Gökçen, H., Ağpak, K., Gencer, C., & Kizilkaya, E. (2004). A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 29(4), 373-380. <https://academic.microsoft.com/paper/1964785556> adresinden alındı
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. <https://academic.microsoft.com/paper/1639032689> adresinden alındı
- Grzechca, W. (2011). *Assembly Line - Theory and Practice*. <https://academic.microsoft.com/paper/2475719997> adresinden alındı
- Güner, B., & Servet, H. (2012). SÜRDÜRÜLEBİLİR DENGE İÇİN ERGONOMİK FAKTÖRLERİ İÇEREN U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELMESİ. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2). <https://academic.microsoft.com/paper/1927684390> adresinden alındı
- Gürleyen, E., & Kahya, E. (2018). KOMBİ MONTAJ HATTINDA REBA YÖNTEMİ İLE ERGONOMİK RİSK ANALİZİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 58-66. <https://academic.microsoft.com/paper/2906153793> adresinden alındı
- Helander, M. (2005). *A Guide to Human Factors and Ergonomics*. <https://academic.microsoft.com/paper/1816550322> adresinden alındı
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*.

- Hwang, R., Katayama, H., & Gen, M. (2008). U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46(16), 4637-4649. <https://academic.microsoft.com/paper/2059589028> adresinden alındı
- Kahya, E., Şahin, B., Daşdelen, E., & Doğru, S. (2018). ERGONOMİK RİSK KISITLARI ALTINDA YENİ BİR MONTAJ HATTI DENGELEME MODELİ GELİŞTİRİLMESİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 49-57. <https://academic.microsoft.com/paper/2905123361> adresinden alındı
- Kalayci, C., Polat, O., & Gupta, S. (2016). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 242(2), 321-354. <https://academic.microsoft.com/paper/2034549403> adresinden alındı
- Kenger, Ö., Kenger, Z., Çil, Z., Mete, S., Karataş, H., & Özceylan, E. (2018). İş ve Tarım Makinaları Montajı Yapan Bir Tesiste REFA Standartları ile İş Örnekleme Uygulaması. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1), 77-83. <https://academic.microsoft.com/paper/2884795321> adresinden alındı
- Liao, L.-M. (2014). Construction and comparison of multi-model and mixed-model assembly lines balancing problems with bi-objective. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 31(8), 483-490. <https://academic.microsoft.com/paper/2042532382> adresinden alındı
- Liepins, G., & Hilliard, M. (1990). Genetic algorithms: foundations and applications. *Annals of Operations Research*, 21(1), 31-58. <https://academic.microsoft.com/paper/1998456004> adresinden alındı
- Mattos, D., Neto, R., Merino, E., & Forcellini, F. (2019). Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: A case study in an automotive electrical component plant. *Applied Ergonomics*, 79, 107-121. <https://academic.microsoft.com/paper/2885135795> adresinden alındı
- McAtamney, L., & Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99. <https://academic.microsoft.com/paper/2024097232> adresinden alındı

- Michalewicz, Z. (1994). *Genetic algorithms + data structures = evolution programs* (2nd, extended ed.). <https://academic.microsoft.com/paper/38218484> adresinden alındı
- Miltenburg, G. J., & Wijngaard, J. (1994). The U-line Line Balancing Problem. *Management Science*, 40(10), 1207-1393. doi:10.1287/mnsc.40.10.1378
- Miltenburg, G., & Wijngaard, J. (1994). The U-line balancing problem. *Management Science*, 40(10), 1378-1388. <https://academic.microsoft.com/paper/2098218469> adresinden alındı
- Miltenburg, J. (2002). Balancing and Scheduling Mixed-Model U-Shaped Production Lines. <https://academic.microsoft.com/paper/101335119> adresinden alındı
- Mura, M., & Dini, G. (2019). Optimizing ergonomics in assembly lines: A multi objective genetic algorithm. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, 27, 31-45. <https://academic.microsoft.com/paper/2974828884> adresinden alındı
- Mutlu, Ö., & Özgörmüş, E. (2012). A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5281-5291. <https://academic.microsoft.com/paper/2078175490> adresinden alındı
- Mutlu, Ö., Polat, O., & Supciller, A. (2013). An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426. <https://academic.microsoft.com/paper/2074627421> adresinden alındı
- Otto, A., & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 277-286. <https://academic.microsoft.com/paper/2057599986> adresinden alındı
- Özkaya, K., Polat, O., Kalinkara, V., & Çakanel, H. (2018). MOBİLYA MONTAJ HATTINDA ÇALIŞAN BİREYLERDE BEDENSEL ZORLANMA VE EYLEMSEL DURUŞ İLİŞKİSİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 271-278. <https://academic.microsoft.com/paper/2905836581> adresinden alındı

- Pearce, B., Antani, K., Mears, L., Funk, K., Mayorga, M., & Kurz, M. (2018). An effective integer program for a general assembly line balancing problem with parallel workers and additional assignment restrictions. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 180-192. <https://academic.microsoft.com/paper/2909361178> adresinden alındı
- Razali, N., & Geraghty, J. (2011). Biologically inspired genetic algorithm to minimize idle time of the assembly line balancing. *2011 Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, (s. 105-110). <https://academic.microsoft.com/paper/2056240722> adresinden alındı
- Rekiek, B., & Delchambre, A. (2005). *Assembly Line Design: The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms (Springer Series in Advanced Manufacturing)*. <https://academic.microsoft.com/paper/2613086274> adresinden alındı
- Sabuncuoglu, I., Erel, E., & Tanyer, M. (2000). Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(3), 295-310. <https://academic.microsoft.com/paper/79318708> adresinden alındı
- Şahin, B., & Kahya, E. (2018). HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ İLE ERGONOMİK KISITLAR ALTINDA MONTAJ HATTI DENGELMESİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 188-196. <https://academic.microsoft.com/paper/2905684818> adresinden alındı
- Sawsan, S. A.-z., & Fatih, F. (2013). Multi-model Production and Assembly Line Balancing (Caravans Production Workshop). *Journal of Babylon University Engineering Sciences*, 21, 1301-1312.
- Scholl, A. (1995). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. <https://academic.microsoft.com/paper/1515244187> adresinden alındı
- Sivanandam, S., & Deepa, S. (2007). *Introduction to genetic algorithms*. <https://academic.microsoft.com/paper/1553010236> adresinden alındı
- Stanton, N., Hedge, A., Hendrick, H., Salas, E., & Brookhuis, K. (2009). *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*. <https://academic.microsoft.com/paper/2149504281> adresinden alındı

- Suresh, N. K., & S.Anil. (2008). *Production and Operations Management : With Skill Development, Caselets and Cases*. New Age International Publishers.
- Taha, R., El-Kharbotly, A., Sadek, Y., & Afia, N. (2011). A Genetic Algorithm for solving two-sided assembly line balancing problems. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(3), 227-240. <https://academic.microsoft.com/paper/2085313872> adresinden alındı
- Tiacci, L. (2018). The problem of assigning rest times to reduce physical ergonomic risk at assembly lines. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 692-697. <https://academic.microsoft.com/paper/2889727310> adresinden alındı
- Tiacci, L., & Mimmi, M. (2018). Integrating ergonomic risks evaluation through OCRA index and balancing/sequencing decisions for mixed model stochastic asynchronous assembly lines. *Omega-international Journal of Management Science*, 78, 112-138. <https://academic.microsoft.com/paper/2756755627> adresinden alındı
- Urban, T. L. (1998). Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science*, 44(5), 738-741. <https://academic.microsoft.com/paper/2010919652> adresinden alındı
- Valhondo, J., García, C., Pozo, R., & Pérez, A. (2013). Extended models for TSALBP with ergonomic risk constraints. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 839-844. <https://academic.microsoft.com/paper/165357251> adresinden alındı
- Yürekli, A. (2019). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-12.

EKLER

EK-1 Literatür araştırmasında kullanılan çalışmaların özet bilgileri

Yazar(lar)	Problem özelliği	Çözüm yöntemi	Ergonomik risk değerlendirme yöntemi
Miltenburg ve Wijngaard (1994)	UMHD için ilk çalışma	Dinamik Programlama ve RPWT	-
Fokkert ve Kok (1997)	KMHD	Dal ve Sınır algoritması	-
Urban (1998)	UMHD	Matematiksel Model	-
Miltenburg J (2002)	KUMHD	Genetik algoritma	-
Gökçen vd. (2004)	UMHD	Matematiksel Model	-
Gökçen ve Ağpak (2004)	UMHD	Tamsayılı Programlama Temelli Hedef Programlama	-
Aase vd. (2004)	UMHD	Matematiksel Model ve Dal Sınır Algoritması	-
Boysen vd. (2007)	MHD sınıflandırılması	-	-
Baykasoğlu ve Özbakır (2007)	Stokastik UMHD	Genetik algoritma	-
Eryuruk vd. (2008)	ÇMHD	Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve Olasılıklı Hat Dengeleme Yöntemi	-
Bagher vd. (2011)	Stokastik UMHD	emperyalist rekabetçi algoritma	-
Otto ve Scholl (2011)	Ergo-MHD	Tavlama Benzetimi	OCRA
Battini vd. (2011)	MHD	Simülasyon	OWAS
Mutlu ve Özgörmüş (2012)	MHD	Bulanık doğrusal programlama	Fiziksel iş yükü
Güner ve Hasgöl (2012)	UMHD	Tamsayılı Programlama Modeli	Enerji düzeyi
Valhondo vd. (2013)	Zaman ve Yer kısıtlamalı Montaj Hattı Dengeleme	Matematiksel Model	OCRA,NIOSH,RULA
Sawsan ve Fatih (2013)	ÇMHD	Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	-
Liao (2014)	KMHD VE ÇMHD	Matematiksel Model	-
Baykasoğlu ve Akyol (2014)	MHD	COMSOAL	-
Battini vd. (2015)	MHD	Çok Amaçlı Matematiksel Model	Enerji düzeyi
Battini vd. (2016)	MHD	Çok Amaçlı Matematiksel Model	Önceden Tanımlanmış Hareket Enerji Sistemi
Battini vd. (2016)	Montaj Hattı Dengeleme ve Parça Besleme	Matematiksel Model	Enerji düzeyi
Bautista vd. (2016)	KMHD	Matematiksel Model	OCRA,NIOSH,EAWS
Bautista, vd. (2016)	MHD	KTDP ve Açgözlü Arama prosedürü	OCRA,NIOSH,RULA
Akyol ve Baykasoğlu (2016)	Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme	Kural Tabanlı Arama algoritma	OCRA
Baykasoğlu vd. (2017)	MHD	Kural Tabanlı Arama algoritma	OCRA
Bortolini vd. (2017)	Montaj Hattı Dengeleme ve Parça Besleme	Çok amaçlı Matematiksel Model	REBA
Botti vd. (2017)	Hibrit MHD	Tamsayılı Programlama Modeli	OCRA
Pearce vd. (2018)	KMHD	TDP ve Geliştirilmiş Konumsal Ağırlıklı Sezgisel	-
Tiacci ve Mimmi (2018)	MHD	Genetik algoritma	OCRA
Arkhipov vd. (2018)	MHD	TDP ve Kısıt programlama	OCRA
Tiacci (2018)	KMH için Dinlenme Süresi Atama	Matematiksel Model	OCRA
Kenger, vd. (2018)	MH için İş örnekleme	-	REFA
Şahin ve Kahya (2018)	MHD	Matematiksel Model	REBA
Kahya vd. (2018)	MHD	COMSOAL	REBA
Alkan ve Ilgin (2018)	MHD	Çok kriterli karar verme	NIOSH
Gürleyen ve Kahya (2018)	MH için İş örnekleme	-	REBA
Özkaya vd. (2018)	MH için İş örnekleme	-	OWAS
Mura ve Dini (2019)	MHD	Çok Amaçlı Genetik algoritma	Enerji düzeyi
Mattos vd. (2019)	MHD	-	EWA
Asl vd.(2019)	MHD	Çok amaçlı KTDP	İş yükü

EK-2a HMD Risk Değerlendirme Tablosu

		TARİH = XX.XX.XXXX		OPERASYON ADI = XXXXXXXXXXXXX			
		İŞ İSTASYONU = XXXX		GÖZLEM YAPAN = XXX XXXX			
GÖZLEMCİNİN DEĞERLENDİRMESİ				İŞÇİLERİN DEĞERLENDİRMESİ			
BACK (SIRT POZİSYON)				İŞÇİ			
GERİ POZİSYONDA GÖREVİ YERİNE GETİRİYORMU		İÇİN, ARKA KISIM ÇOĞU ZAMAN STATİK BİR KONUMDAMI ?		GÖREV ESNASINDA İŞÇİ TARAFINDAN ELE ALINAN AĞIRLIK MİKTARI		BU GÖREV İÇİN GÜNDE NE KADAR ZAMAN HARCANIYOR	
TARAFSIZ	A1	HAYIR	B1	AFİF (5 KG VEYA DAHA AZ)	H1	2 SAATTEN AZ	J1
ORTA DERECEDE BÜKÜLDÜYSE VEYA BÜKÜLDÜYSE VEYA	A2	EVET	B2	ORTA DÜZEYDE (6 İLE 10 KG ARASI)	H2	2 İLE 4 SAAT ARASI	J2
BÜKÜLDÜYSE VEYA BÜKÜLDÜYSE VEYA YANA YATTIYSA	A3	KALDIRMA, İTME/ÇEKME VE TAŞIMA GÖREVLERİ İÇİN, SIRTIN HAREKETİ		AĞIR (11 İLE 20 KG ARASI)	H3	4 SAATTEN FAZLA	J3
		SEYREK (HER DAKİKA İÇİN 3 KERE VEYA DAHA AZ)	B3	ÇOK AĞIR (20 KG DAN DAHA FAZLA)	H5		
		SIK (DAKİKADA 8 KERE)	B4	GÖREVİ YERİNE GETİRİRKEN 1 ELLE UYGULANAN MAKSİMUM KUVVET DÜZEYİ		BU GÖREVİN GÖRSEL TALEBİ NEDİR ?	
		ÇOK SIK (DAKİKADA 12 KERE VEYA DAHA FAZLA)	B5	AZ (1 KG VEYA DAHA AZ)	K1	DÜŞÜK (İNCE DETAYLARI GÖRMEK NEREDEYSE ÇOK)	L1
KOL VE OMUZLAR				ORTA DÜZEYDE (1 İLE 4 KG ARASINDA)		K2	YÜKSEK (DETAYLARI GÖRMEK OLDUKÇA GEREKLİDİR)
GÖREV YERİNE GETİRİLİRKEN ELLER		KOL VE OMUZLARIN HAREKETİ		ÇOK (4 KG DAN DAHA FAZLA)		K3	
BEL YÜKSEKLİĞİNDE VEYA ALTINDA	C1	SEYREK (ARALIKLI HAREKET)	D1	İŞYERİNDE BİR ARAÇ KULLANILDIMI ?		GÖREVİ YERİNE GETİRİRKEN TITREŞİMLİ ARAÇ KULLANIMI NE DÜZEYDEDİR ?	
GÖĞÜS YÜKSEKLİĞİ ÇIVARINDA	C2	SIK (DURAKLAMALARLA DÜZENLİ HAREKET)	D2	HERGÜN 1 SAAT VEYA DAHA AZ	M1	1 SAATTEN AZ VEYA HIÇ	N1
KOL VE OMUZLAR	C3	ÇOK SIK (NEREDEYSE SÜREKLİ HAREKET)	D3	HERGÜN 1 SAAT İLE 4 SAAT ARASI	M2	1 SAAT İLE 4 SAAT ARASI	N2
EL VE BİLEKLER				HERGÜN 4 SAAT VEYA DAHA FAZLA	M3	4 SAATTEN FAZLA	N3
EL VE BİLEKLER İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN GÖREV İÇİN		TEKRARLANAN BENZER HAREKET KALIPLARI		İŞİ TAKİP ETMEKTE GÜÇLÜK ÇEKİLİYOR MU ?		GENEL OLARAK BU İŞİ NASIL BULUYORSUN	
NEREDEYSE DÜZ BİLEK	E1	HER DAKİKADA 10 KERE VEYA DAHA AZ DÜZEYDE	F1	HIÇ	P1	HIÇ STRESLİ DEĞİL	Q1
SAPMIŞ VEYA BÜKÜLMÜŞ BİLEK	E2	HER DAKİKADA 11 İLE 20 ARASI TEKRARLAMA	F2	BAZEN	P2	AZ STRESLİ	Q2
		HER DAKİKADA 20 KERE VEYA DAHA FAZLA TEKRARLAMA	F3	SIKLIKLA	P3	ORTA DÜZEYDE STRESLİ	Q3
BOYUN						ÇOK STRESLİ	Q4
GÖREVİ YERİNE GETİRİRKEN, BAŞ/BOYUN KIVRILMIŞ VEYA BÜKÜLMÜŞ MÜ ?							
HAYIR	G1						
EVET, BAZEN	G2						
EVET, SIKLIKLA	G3						

EK-2b HMD Risk Değerlendirme Tablosu (Devamı)

SIRT										OMUZ/KOL									
SIRT DURUŞ (A) & AĞIRLIK (H)					SIRT DURUŞ(A) & SÜRE (J)					BOY(C) & AĞIRLIK (H)					BOY (C) & SÜRE (J)				
A&H	A1	A2	A3	SCORE 1	A&J	A1	A2	A3	SCORE 2	C&H	C1	C2	C3	SCORE 1	C&J	C1	C2	C3	SCORE 2
H1	2	4	6		J1	2	4	6		H1	2	4	6		J1	2	4	6	
H2	4	6	8		J2	4	6	8		H2	4	6	8		J2	4	6	8	
H3	6	8	10		J3	6	8	10	6	H3	6	8	10		J3	6	8	10	8
H4	8	10	12	2						H4	8	10	12	4					
SÜRE (J) & AĞIRLIK (H)					SÜRE (J) & SABİT DURUŞ (B)					SÜRE (J) & AĞIRLIK (H)					SIKLIK (D) & AĞIRLIK (H)				
J&H	J1	J2	J3	SCORE 3	J&B	J1	J2	J3	SCORE 4	J&H	J1	J2	J3	SCORE 3	D&H	D1	D2	D3	SCORE 4
H1	2	4	6		B1	2	4	6	6	H1	2	4	6		H1	2	4	6	
H2	4	6	8		B2	4	6	8		H2	4	6	8		H2	4	6	8	
H3	6	8	10							H3	6	8	10		H3	6	8	10	
H4	8	10	12	6						H4	8	10	12	6	H4	8	10	12	4
SIKLIK(B) & AĞIRLIK (H)					SIKLIK (B) & SÜRE (J)					SIKLIK (D) & SÜRE (J)									
D%&H	B3	B4	B5	SCORE 5	D&J	B3	B4	B5	SCORE 6	D&J	D1	D2	D3	SCORE 5					
H1	2	4	6		J1	2	4	6		J1	2	4	6						
H2	4	6	8		J2	4	6	8		J2	4	6	8						
H3	6	8	10		J3	6	8	10	0	J3	6	8	10	8					
H4	8	10	12	0															
BİLEK/EL										BOYUN									
TEKRARLANAN HAREKET (F) & KUVVET (K)					TEKRARLANAN HAREKET (F) & SÜRE (J)					BOYUN DURUŞU (G) & SÜRE (J)					BAKMA GEREKSİMİ (L) & SÜRE (J)				
F&K	F1	F2	F3	SCORE 1	F&J	F1	F2	F3	SCORE 2	G&J	G1	G2	G3	SCORE 1	L&J	J1	J2	J3	SCORE 2
K1	2	4	6		J1	2	4	6		J1	2	4	6		L1	2	4	6	
K2	4	6	8		J2	4	6	8		J2	4	6	8		L2	4	6	8	8
K3	6	8	10	4	J3	6	8	10	8	J3	6	8	10	6					
SÜRE (J) & KUVVET (K)					BİLEK DURUŞU(E) & KUVVET (K)					SÜRÜŞ					TİTREŞİM				
J&K	J1	J2	J3	SCORE 3	E&K	K1	K2	K3	SCORE 4	M1	M2	M3	SCORE 1		N1	N2	N3	SCORE 1	
K1	2	4	6		E1	2	4	6	4	1	4	9	1		1	4	9	1	
K2	4	6	8		E2	4	6	8		ÇALIŞMA					STRES				
K3	6	8	10	6						P1	P2	P3	SCORE 1		Q1	Q2	Q3	Q4	SCORE 1
										1	4	9	1		1	4	9	16	9
BİLEK DURUŞU (E) & SÜRE (J)																			
J&E	J1	J2	J3	SCORE 5															
E1	2	4	6																
E2	4	6	8	8															

EK-3 Model bazında iş elemanları süreleri (san)

İŞLEM SÜRELERİ					
MODEL İŞ ELEMANLARI	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
1- Rezerv Boru Kesme	9	6	6	7	7
2- Rezerv Boru Yıkama	8	5	4	5	6
3- Rezerv Boru Sıvama	6	9	7	6	6
4- Basınç Borusu Kesme	10	8	7	9	7
5- Basınç Borusu Köşe Kırma	7	6	5	5	4
6- Basınç Borusu Kanal Açma	10	13	11	10	12
7- Metal Stoper Montajı	22	24	26	25	23
8- Piston Grubu Montajı	18	15	15	20	14
9- Taban Valf Grubu Montajı	16	18	15	17	16
10- Taban Valf Grubu Perçinleme	5	5	5	6	6
11- Basınç Boru Montajı	11	13	10	12	10
12- Kaynak 1	17	21	21	27	17
13- Kaynak 2	18	20	20	20	17
14- Körük Bileziği CNC Tornalama	11	10	9	11	8
15- Kaynak 3	17	15	25	28	22
16- Rezerv Boru Montajı	14	13	11	13	12
17- Yağ Dolum	10	10	9	8	8
18- Mil Montaj	24	24	22	26	26
19- Kılavuz Basma	5	6	8	6	8
20- Amortisör Kapama	9	8	7	7	9
21- Markalama	10	10	11	11	10
22- Boyama	23	26	25	26	24
23- Manşon Kaynak	18	18	21	20	17
24- Üst Bağlantı Boyama	11	13	12	13	10
25- Burçlu Kauçuk Montajı	10	10	8	9	7
26- Gaz Basma	16	16	15	17	16
27- Son Montaj	16	16	14	15	13
28- Ambalajlama	15	15	17	14	15

EK-4 Model bazında iş elemanları için HMD skorları

HMD SKORLARI					
MODEL İŞ ELEMANLARI	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
1- Rezerv Boru Kesme	9.3	6.2	6.2	7.2	7.2
2- Rezerv Boru Yıkama	7.4	4.6	3.7	4.6	5.6
3- Rezerv Boru Sıvama	7.4	11.1	8.6	7.4	7.4
4- Basınç Borusu Kesme	9.3	7.4	6.5	8.3	6.5
5- Basınç Borusu Köşe Kırma	6.8	5.8	4.9	4.9	3.9
6- Basınç Borusu Kanal Açma	14.8	19.3	16.3	14.8	17.8
7- Metal Stoper Montajı	13.0	14.1	15.3	14.7	13.6
8- Piston Grubu Montajı	12.3	10.3	10.3	13.7	9.6
9- Taban Valf Grubu Montajı	14.2	16.0	13.3	15.1	14.2
10- Taban Valf Grubu Perçinleme	9.3	9.3	9.3	11.1	11.1
11- Basınç Boru Montajı	16.7	19.7	15.2	18.2	15.2
12- Kaynak 1	11.7	14.5	14.5	18.6	11.7
13- Kaynak 2	15.4	17.1	17.1	17.1	14.6
14- Körük Bileziği CNC Tornalama	15.4	14.0	12.6	15.4	11.2
15- Kaynak 3	13.0	11.4	19.1	21.4	16.8
16- Rezerv Boru Montajı	15.4	14.3	12.1	14.3	13.2
17- Yağ Dolum	1.9	1.9	1.7	1.5	1.5
18- Mil Montaj	11.1	11.1	10.2	12.0	12.0
19- Kılavuz Basma	11.1	13.3	17.8	13.3	17.8
20- Amortisör Kapama	21.0	18.7	16.3	16.3	21.0
21- Markalama	7.4	7.5	8.4	8.3	7.8
22- Boyama	19.1	21.6	21.0	21.6	20.1
23- Manşon Kaynak	13.6	13.6	15.8	15.1	12.8
24- Üst Bağlantı Boyama	13.0	15.3	14.1	15.3	11.8
25- Burçlu Kauçuk Montajı	9.3	9.3	7.4	8.3	6.5
26- Gaz Basma	5.6	5.6	5.3	5.9	5.6
27- Son Montaj	7.4	7.4	6.5	6.9	6.0
28- Ambalajlama	3.1	3.1	3.5	2.9	3.1

EK-6a Matematiksel modelle çözüm elde edilmiş 19 görevli test problemi atamaları

Thomopoulos (N=19)	$w_1=1, w_2=0$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[2, 3, 5, 8, 9]	[1, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]	222

Thomopoulos (N=19)	$W_1=100, W_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	Hmd Skoru
İstasyon 1	[1, 2, 3, 4, 6]	[10, 14, 16, 18, 19]	107
İstasyon 2	[5, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 17]	[]	86

Thomopoulos (N=19)	$W_1=10, W_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	Hmd Skoru
İstasyon 1	[2, 3, 5]	[16, 19]	20
İstasyon 2	[1, 6, 7, 8, 12]	[10]	67
İstasyon 3	[4, 9, 11, 15]	[13, 17]	51

EK-6b Matematiksel modelle çözüm elde edilmiş 21 görevli test problemi atamaları

Mitchell (N=21)	$w_1=100, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1]	[18, 19, 20]	20
İstasyon 2	[3, 4]	[]	12
İstasyon 3	[]	[17]	6
İstasyon 4	[]	[13, 15, 16]	18
İstasyon 5	[5]	[10, 11, 12]	24
İstasyon 6	[]	[8, 9]	24
İstasyon 7	[6]	[21]	15
İstasyon 8	[2, 7, 14]	[]	22

Mitchell (N=21)	$w_1=10, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1]	[18, 19, 20]	20
İstasyon 2	[]	[17]	6
İstasyon 3	[3, 4]	[]	12
İstasyon 4	[5]	[16]	8
İstasyon 5	[]	[15, 21]	5
İstasyon 6	[6, 7]	[10, 12]	29
İstasyon 7	[]	[2, 11, 13, 14]	20
İstasyon 8	[]	[8, 9]	24

Mitchell (N=21)	$w_1=1, w_2=0$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1]	[20, 21]	29
İstasyon 2	[3, 4]	[]	20
İstasyon 3	[]	[17]	7
İstasyon 4	[2]	[18, 19]	20
İstasyon 5	[]	[13, 15, 16]	24
İstasyon 6	[5, 6]	[12]	16
İstasyon 7	[7]	[11, 14]	25
İstasyon 8	[8, 9, 10]	[]	28

EK-6c Matematiksel modelle çözüm elde edilmiş 35 görevli test problemi atamaları

Gunther (N=35)	$w_1=100, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 2, 5, 6]	[29]	30.17
İstasyon 2	[3, 7, 8]	[33, 35]	24.7
İstasyon 3	[17]	[26, 27, 28, 34]	22.8
İstasyon 4	[4, 10, 14]	[]	17.55
İstasyon 5	[12]	[13, 32]	27.25
İstasyon 6	[]	[23, 24, 25, 30, 31]	29.75
İstasyon 7	[18, 19]	[9, 22]	25.22
İstasyon 8	[20]	[11]	34.16
İstasyon 9	[]	[15, 16, 21]	23.53

Gunther (N=35)	$w_1=10, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 5, 6, 8]	[]	26.87
İstasyon 2	[7, 9, 12]	[]	25.22
İstasyon 3	[]	[30, 31, 32, 33, 35]	30.3
İstasyon 4	[2, 10, 18, 19]	[]	19.26
İstasyon 5	[3, 4, 13, 14, 17]	[]	30.85
İstasyon 6	[11, 20]	[]	34.16
İstasyon 7	[15, 16, 21]	[]	23.53
İstasyon 8	[25, 26]	[28, 29, 34]	22.4
İstasyon 9	[]	[22, 23, 24, 27]	23.81

Gunther (N=35)	$w_1=1, w_2=0$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 2, 5, 6]	[35]	31
İstasyon 2	[3, 4, 8, 9]	[]	26
İstasyon 3	[7]	[30, 31, 32, 33]	30
İstasyon 4	[]	[26, 27, 28, 29, 34]	23
İstasyon 5	[]	[22, 23, 24, 25]	25
İstasyon 6	[]	[19, 20, 21]	44
İstasyon 7	[17]	[14, 15, 16, 18]	26
İstasyon 8	[13]	[10]	22
İstasyon 9	[11]	[12]	13

EK-6d Matematiksel modelle çözüm elde edilmiş 45 görevli test problemi atamaları

Kılbrid (N=45)	$w_1=100, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 2, 3, 11, 12, 13]	[]	35.6
İstasyon 2	[7, 15, 18, 24]	[]	25.3
İstasyon 3	[5, 8, 14, 37]	[]	23.9
İstasyon 4	[9, 25, 39]	[45]	41.6
İstasyon 5	[17, 23]	[42, 44]	19.4
İstasyon 6	[16, 19, 20, 27, 33]	[43]	19.7
İstasyon 7	[21]	[]	9.0
İstasyon 8	[36]	[10, 41]	47.9
İstasyon 9	[4, 6, 26, 30, 34]	[29, 31, 32]	46.3
İstasyon 10	[]	[22, 28, 35, 38, 40]	22.2

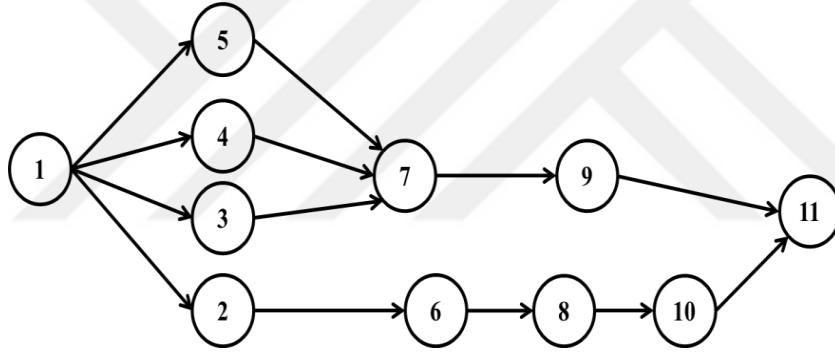
Kılbrid (N=45)	$w_1=10, w_2=1$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 2, 7, 8, 12]	[]	25.7
İstasyon 2	[11, 13, 15, 16]	[44, 45]	43.7
İstasyon 3	[3, 5, 9, 18]	[43]	45.3
İstasyon 4	[19, 20, 24]	[37, 42]	42.3
İstasyon 5	[21]	[]	9
İstasyon 6	[4, 6, 14, 31]	[]	31.3
İstasyon 7	[17, 25, 27, 29, 32, 39]	[]	44.5
İstasyon 8	[23, 26, 30, 33, 34]	[]	30
İstasyon 9	[36]	[10, 41]	47
İstasyon 10	[22]	[28, 35, 38, 40]	46.7

Kılbrid (N=45)	$w_1=1, w_2=0$		
İstasyonlar	İleri Atanan İşler	Geri Atanan İşler	HMD SKORU
İstasyon 1	[1, 2, 4, 7, 8]	[]	37
İstasyon 2	[11, 12, 39]	[42, 43, 44, 45]	44
İstasyon 3	[13]	[26, 29, 32, 37, 38, 40, 41]	77
İstasyon 4	[14, 15, 18]	[10]	38
İstasyon 5	[23, 24]	[]	18
İstasyon 6	[16]	[6, 9]	39
İstasyon 7	[3, 17, 19, 20, 30]	[35, 36]	36
İstasyon 8	[]	[22, 28, 33, 34]	43
İstasyon 9	[]	[21]	9
İstasyon 10	[5, 31]	[25, 27]	40

EK-7 11 görevli Jackson (C=7) test probleminin modellere göre görev süreleri, HMD skorları ve öncelik diyagramı

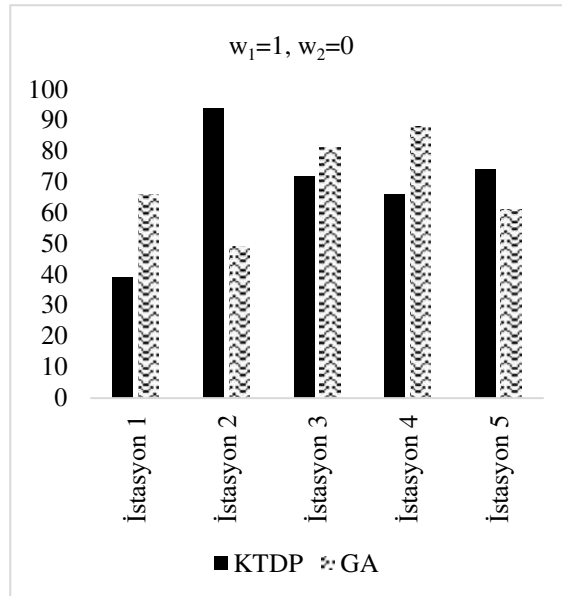
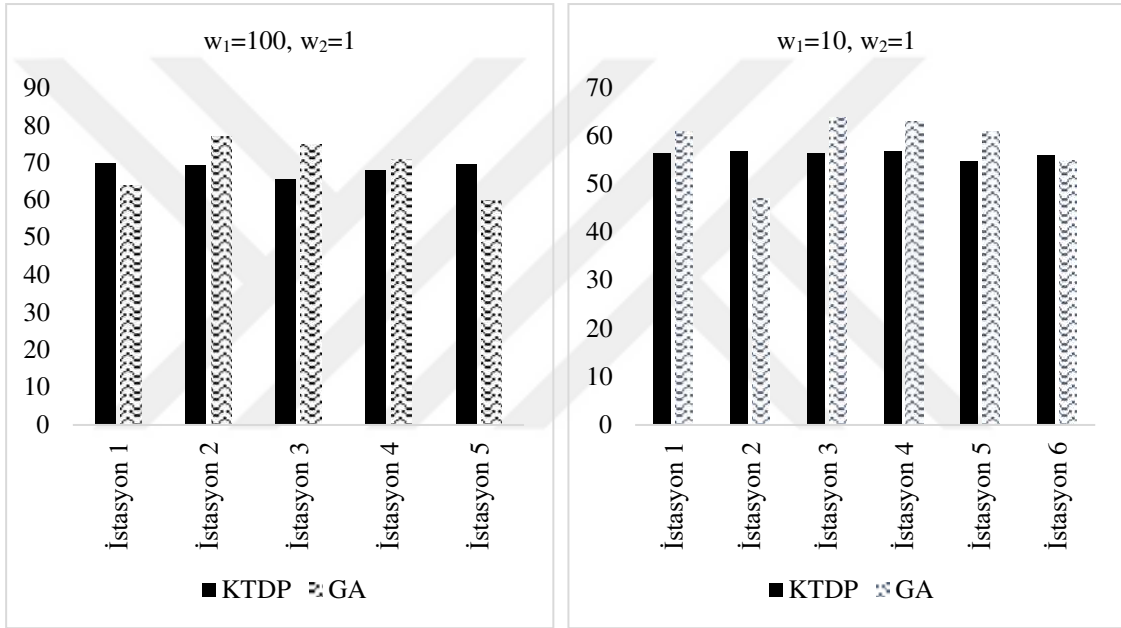
Jackson (N=11, C=7) problemin modellere göre görev süreleri			
Görevler	M-1	M-2	M-3
1	6	5.4	5.94
2	2	1.8	1.98
3	5	4.5	4.95
4	7	6.3	6.93
5	1	0.9	0.99
6	2	1.8	1.98
7	3	2.7	2.97
8	6	5.4	5.94
9	5	4.5	4.95
10	5	4.5	4.95
11	4	3.6	3.96

Jackson (N=11, C=7) problemin modellere göre HMD skorları			
Görevler	M-1	M-2	M-3
1	6.9	5.7	8.4
2	6	4.8	3.9
3	5.25	6.3	6.3
4	9	9	6
5	3.45	8.3	4.5
6	4.8	18.3	4.8
7	3.75	22.4	10.8
8	6.9	4.4	4.35
9	7.5	7.8	7.8
10	5.25	7.5	5.4
11	6.6	4.8	3.9



EK-8 KTDP ve GA modelleri için yapılmış olan uygulama çalışmasının farklı amaç ağırlarına göre elde edilmiş HMD skor değerlerinin karşılaştırılması

	KTDP	GA	KTDP	GA	KTDP	GA
İstasyonlar	$w_1=10, w_2=1$		$w_1=100, w_2=1$		$w_1=1, w_2=0$	
İstasyon 1	56.4	61	69.8	64	39	66
İstasyon 2	56.8	47	69.3	77	94	49
İstasyon 3	56.5	64	65.6	75	72	81
İstasyon 4	56.8	63	68	71	66	88
İstasyon 5	54.8	61	69.7	60	74	61
İstasyon 6	56	55	-	-	-	-
Enbüyük Değer	56.8	64	69.7	77	94	88
Ortalama Değer	55.21	58.5	68.48	69.4	69	69
Standart Sapma	0.69	5.88	1.57	6.47	17.71	13.99



EK-9a Ergo-KUMHD için genetik algoritma yaklaşımıyla Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 1, w_2 = 0$ değerleri için elde edilen çözüm

VERİ SETİ	MODEL SAYI	İŞLEM SAYI	ÇEVİRİM SÜRESİ	İSTAYON SAYISI	MIN_ERGO	MAX_ERGO	ORTA_ERGO	MIN_CPU	MAX_CPU	ORTA_CPU	MIN_OBJECTIVE	MAX_OBJECTIVE	ORTA_OBJECTIVE
Thomopoulos	3	19	19	4	17	100	58	5	5	5	4	4	4
Thomopoulos	3	19	48	2	32	201	117	4	5	4	2	2	2
Thomopoulos	3	19	76	2	9	222	116	4	5	4	2	2	2
Thomopoulos	3	19	120	2	7	221	114	4	6	5	2	2	2
MITCHELL	4	21	14	8	7	31	21	9	11	10	8	8	8
MITCHELL	4	21	15	8	7	31	21	9	10	9	8	8	8
MITCHELL	4	21	21	5	25	43	34	9	10	9	5	5	5
Kim	4	61	12	10	13	23	19	127	154	138	10	10	10
Kim	4	61	40	3	47	67	60	114	160	132	3	3	3
Kim	4	61	60	2	82	102	92	120	153	136	2	2	2
Kim	4	61	600	2	64	121	92	126	156	136	2	2	2
Tonge	4	70	176	21	5	35	19	205	253	221	21	22	21
Tonge	4	70	364	10	18	63	37	202	232	211	10	10	10
Tonge	4	70	468	8	33	69	46	210	240	225	8	8	8
Weemag	5	75	56	30	14	30	19	162	227	194	30	31	30
Weemag	5	75	120	13	35	49	42	154	292	191	13	13	13
Weemag	5	75	164	10	22	63	55	147	208	177	10	10	10
Arcus	5	111	5755	28	6	76	32	741	960	856	28	28	28
Arcus	5	111	6615	24	9	70	38	773	952	881	24	26	25
Arcus	5	111	10000	16	13	91	51	770	1014	880	16	16	16
Arcus	5	111	10743	15	9	103	56	761	882	820	15	16	15
Arcus	5	111	11378	14	18	107	58	864	1010	920	14	14	14
Arcus	5	111	17067	9	26	141	89	756	949	882	9	9	9
Barthol	4	148	84	52	9	77	33	1554	1744	1644	52	54	53
Barthol	4	148	101	44	13	81	39	1365	1812	1660	44	45	44
Barthol	4	148	170	26	22	108	61	1509	1685	1606	26	26	26

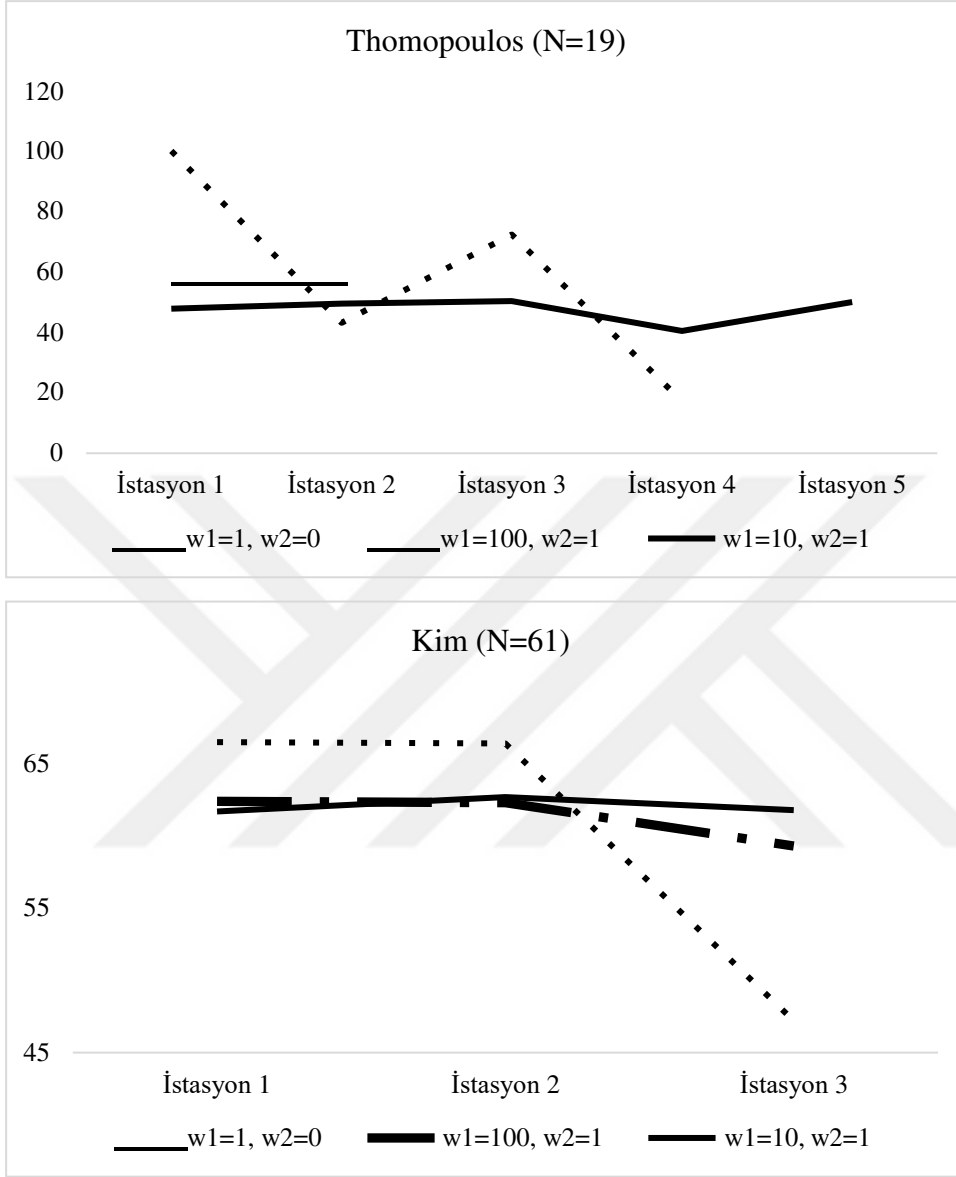
EK-9b Ergo-KUMHD için genetik algoritma yaklaşımıyla Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 10, w_2 = 1$ değerleri için elde edilen çözüm

VERİ SETİ	MODEL SAYI	İŞLEM SAYI	ÇEVİRİM SÜRESİ	İSTAYON SAYISI	MIN_ERGO	MAX_ERGO	ORTA_ERGO	MIN_CPU	MAX_CPU	ORTA_CPU	MIN_OBJECTIVE	MAX_OBJECTIVE	ORTA_OBJECTIVE
Thomopoulos	3	19	19	5	41	50	47	16	18	17	100	107	105
Thomopoulos	3	19	48	5	26	38	32	9	11	10	88	94	91
Thomopoulos	3	19	76	5	30	39	34	9	11	9	89	93	90
Thomopoulos	3	19	120	7	7	142	32	17	20	18	212	214	213
MITCHELL	4	21	14	8	7	27	21	9	10	9	107	110	108
MITCHELL	4	21	15	8	7	27	22	8	10	9	107	110	109
MITCHELL	4	21	21	5	24	39	33	9	10	9	89	91	90
Kim	4	61	12	10	17	20	19	126	144	136	120	122	121
Kim	4	61	40	3	62	63	62	127	143	136	93	96	95
Kim	4	61	60	2	90	91	90	124	152	138	111	119	115
Kim	4	61	600	10	16	21	20	121	161	145	121	123	122
Tonge	4	70	176	21	8	28	19	220	254	224	238	251	243
Tonge	4	70	364	10	27	45	38	203	255	226	145	149	146
Tonge	4	70	468	8	36	52	45	207	255	228	132	138	135
Weemag	5	75	56	30	11	25	19	207	242	223	325	335	330
Weemag	5	75	120	13	35	44	39	159	227	192	173	178	175
Weemag	5	75	164	10	30	58	52	122	214	182	158	161	159
Arcus	5	111	5755	28	9	60	33	730	988	900	340	359	349
Arcus	5	111	6615	25	4	66	35	833	1121	923	316	326	321
Arcus	5	111	10000	16	16	80	52	820	1096	981	240	255	248
Arcus	5	111	10743	15	13	82	54	829	1020	930	232	268	243
Arcus	5	111	11378	14	18	82	58	874	1095	939	222	245	232
Arcus	5	111	17067	9	42	111	84	838	1023	910	201	235	213
Barthol	4	148	84	53	9	76	32	1481	1892	1631	606	626	614
Barthol	4	148	101	44	13	76	39	1514	1799	1660	516	528	520
Barthol	4	148	170	26	32	85	61	1415	1715	1602	345	351	348

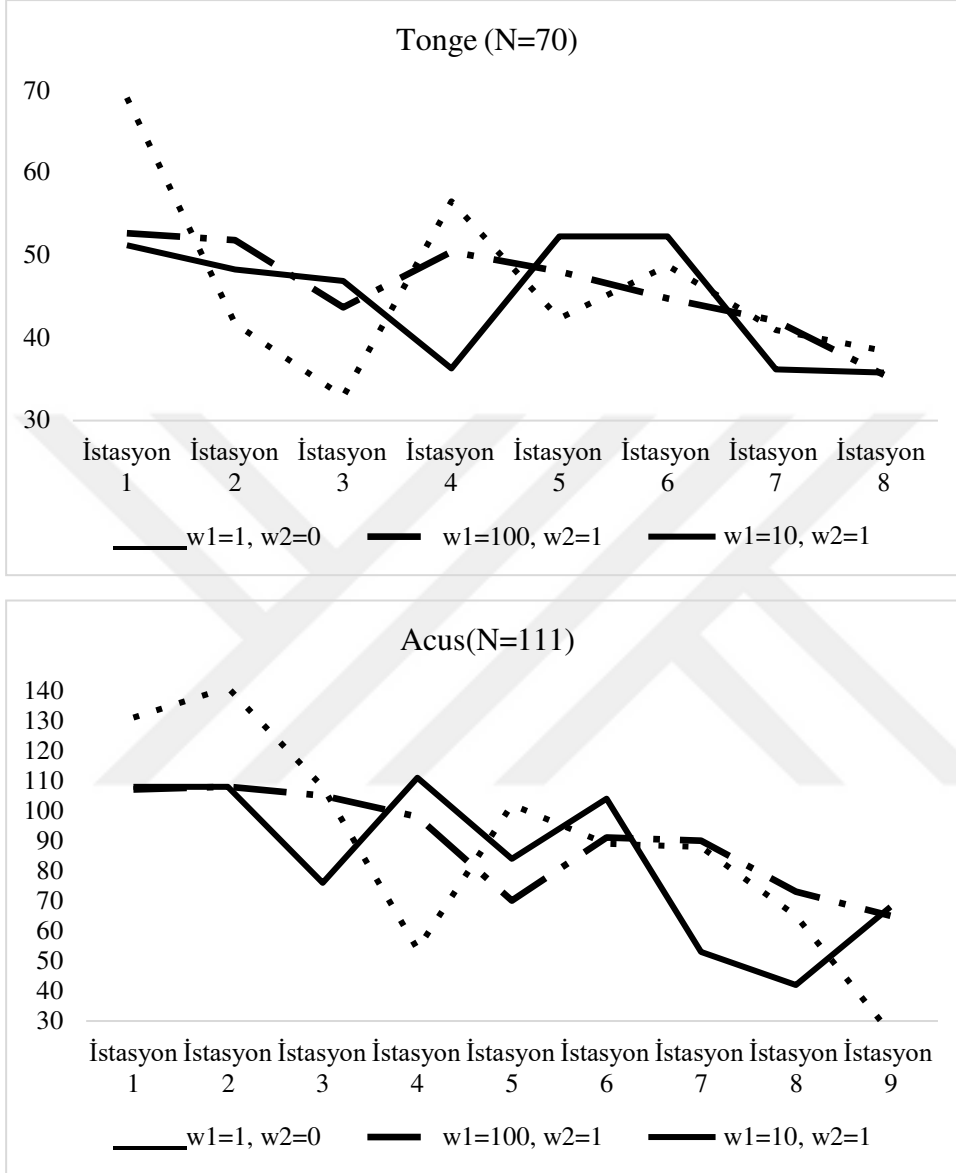
EK-9c Ergo-KUMHD için genetik algoritma yaklaşımıyla Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1 = 100, w_2 = 1$ değerleri için elde edilen çözüm

VERİ SETİ	MODEL SAYI	İŞLEM SAYI	ÇEVİRİM SÜRESİ	İSTAYON SAYISI	MIN_ERGO	MAX_ERGO	ORTA_ERGO	MIN_CPU	MAX_CPU	ORTA_CPU	MIN_OBJECTIVE	MAX_OBJECTIVE	ORTA_OBJECTIVE
Thomopoulos	3	19	19	4	55	58	57	4	5	4	458	470	467
Thomopoulos	3	19	48	2	111	111	111	4	5	5	311	320	315
Thomopoulos	3	19	76	2	215	9	112	5	5	5	415	415	415
Thomopoulos	3	19	120	2	215	9	112	5	4	5	415	415	415
MITCHELL	4	21	14	8	7	27	21	9	10	9	827	828	827
MITCHELL	4	21	15	8	7	27	23	9	10	9	827	830	829
MITCHELL	4	21	21	5	29	38	34	8	11	9	538	544	540
Kim	4	61	12	9	17	25	22	130	150	140	925	1022	1012
Kim	4	61	40	3	59	62	61	124	150	135	362	368	364
Kim	4	61	60	2	89	91	90	126	153	137	291	298	294
Kim	4	61	600	2	81	92	86	131	150	140	292	331	310
Tonge	4	70	176	21	9	27	19	205	241	218	2127	2230	2161
Tonge	4	70	364	10	17	45	37	200	238	223	1045	1048	1046
Tonge	4	70	468	8	36	53	46	212	247	212	852	860	856
Weemag	5	75	56	30	12	26	19	186	218	201	3025	3125	3067
Weemag	5	75	120	13	29	44	40	158	205	185	1344	1348	1345
Weemag	5	75	164	10	39	57	50	172	223	195	1057	1059	1058
Arcus	5	111	5755	27	9	62	33	764	964	894	2762	2873	2854
Arcus	5	111	6615	25	9	65	35	756	978	873	2565	2662	2582
Arcus	5	111	10000	16	16	73	51	721	944	868	1673	1696	1686
Arcus	5	111	10743	15	16	82	54	790	995	881	1582	1608	1593
Arcus	5	111	11378	14	16	82	57	760	994	908	1482	1499	1489
Arcus	5	111	17067	9	65	108	90	873	1013	945	1008	1043	1020
Barthol	4	148	84	53	9	76	32	1503	1784	1634	5376	5576	5446
Barthol	4	148	101	44	13	76	38	1529	1794	1629	4476	4579	4509
Barthol	4	148	170	26	36	85	60	1575	1752	1653	2685	2692	2687

EK-10a GA modelinin örnek problemlerin çözümlerinin farklı ağırlıklar için HMD skorlarının istasyonlara göre dağılımı



EK-10b GA modelinin örnek problemlerin çözümlerinin farklı ağırlıklar için HMD skorlarının istasyonlara göre dağılımı



ÖZGEÇMİŞ

Ben Mahammadalı NAHMATLI Üniversiteye kadar tüm eğitim hayatımı Şamahıda tamamladım. Lisansımı 2018 yılında Bakü'de Azərbaycan Devlet Petrol ve Endüstri Üniversitesinde Endüstri mühendisliğinde tamamladım. Aynı yıl Anadolu Üniversitesi (Eskişehir Teknik Üniversitesi)'nde Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapma hakkı kazandım.

