

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**MONTAJ HATLARINDA ÇALIŞANLARIN İŞ YÜKÜNÜ
DENGELEYECEK ERGONOMİK İŞ ROTASYONU ÇİZELGELEME**

HAZIRLAYAN

SELİN IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**MONTAJ HATLARINDA ÇALIŞANLARIN İŞ YÜKÜNÜ
DENGELEYECEK ERGONOMİK İŞ ROTASYONU ÇİZELGELEME**

**HAZIRLAYAN
SELİN IŞIK**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ESRA DİNLER**

**TEZ ORTAK DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ AYYÜCE AYDEMİR KARADAĞ**

ANKARA - 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Selin IŞIK tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 10 / 01 / 2022

Tez Adı: Montaj Hatlarında Çalışanların İş Yükünü Dengeleyecek Ergonomik İş Rotasyonu Çizelgeleme

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Ergün ERASLAN, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Ayyüce AYDEMİR KARADAĞ, Çankaya Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı: Selin IŞIK

Öğrencinin Numarası: 21810121

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER

Tez Başlığı: Montaj Hatlarında Çalışanların İş Yükünü Dengeleyecek Ergonomik İş Rotasyonu Çizelgeleme

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam sayfalık kısmına ilişkin, / ... / 20 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 'dır. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca benden hiçbir zaman desteğini ve zamanını esirgemeyen, fikir ve yönlendirmeleriyle akademik kariyerime büyük katkı sağlayan, tez çalışmasının her aşamasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve yardım eden değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER ve Dr. Öğr. Üyesi Ayyüce AYDEMİR KARADAĞ saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimimde tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen, kendimi geliştirmemde ve bu alanda çalışma isteğimi daima sürdürmemi sağlayan Başkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca beni motive eden ve bana sevgilerini hissettiren arkadaşlarıma; lisanstan beri hep yanımda olup sevgi ve desteğini benden hiç esirgemeyen ve iyi veya kötü günlerimde daima yanımda olup beni motive eden Elif Altınbaş'a; maddi manevi her konuda, sabır ve özveri ile her an yanımda olup her zaman beni destekleyen ve bana daima inanan bu hayattaki en büyük şanslarım canım aileme çok teşekkür ederim.

ÖZET

Selin IŞIK

MONTAJ HATLARINDA ÇALIŞANLARIN İŞ YÜKÜNÜ DENGELYECEK ERGONOMİK İŞ ROTASYONU ÇİZELGELEME

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Üretimde insan emeği önemli bir rol oynamaktadır ve bunun değerlendirilmesi birçok çalışmada konu olmaktadır. Seri üretim montaj hatlarında genellikle çok sayıda tekrarlayan manuel görevlerden oluşmaktadır ve bu sistemlerde çalışanların iş yükleri fazladır. İş günü boyunca tekrarlayan manuel görevler ve uzun süreli hareketler olmasından kaynaklı çalışanların uzuvlarında biyomekanik aşırı yüklenme meydana gelmektedir ve çalışanlar kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları riskine maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle montaj hatlarındaki ergonomik unsurlar dikkate alınarak operatörler arasındaki iş yükünün dengelenmesi konusu hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, operatörün tüm duruş pozisyonlarından kaynaklı riskleri değerlendirmek için ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden hızlı tüm vücut değerlendirme yöntemi (REBA) kullanılmıştır ve operatörlerin yetenekleri ve tercihlerini dikkate alan çok amaçlı iş rotasyonu çizelgeleme modeli geliştirilmiştir. Önerilen model, çalışanların motivasyonlarını artırmayı, işleri iş yükleri ve işlem süreleri bakımından dengelemeyi amaçlayarak işin en kısa sürede tamamlanmasını ve montaj hattındaki görevlere uygun operatörlerin atanmasını sağlamaktadır. Literatürden farklı olarak geliştirilen modelde çalışanların REBA skorları arasındaki farkı enküçüklemesi, çalışanların tercihlerine göre atamaları gerçekleştirmesi ve işlem süreleri arasındaki dengelemeyi sağlaması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma gerçek bir uygulamadır ve Ankara’da faaliyet gösteren bir otomotiv firmasında yapılmıştır. Önerilen matematiksel modelin sonuçları uzun sürelerde çözüm sağladığı için belirli bir görev sayısı için sonuçlar elde edilebilmiştir. Geliştirilen çok amaçlı matematiksel model ve Tavlama Benzetimi sezgiselinin sonuçları farklı performans ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmıştır

Anahtar Sözcükler: Ergonomik İş Rotasyonu, REBA, Montaj Hattı, Tavlama Benzetimi, İş Yüğü Dengeleme

ABSTRACT

Selin IŞIK

ERGONOMIC WORK ROTATION SCHEDULE TO BALANCE THE WORKLOAD OF EMPLOYEES ON ASSEMBLY LINES

Başkent University, Institute of Science and Engineering

Department of Industrial Engineering

2022

Human labor plays an important role in production and its evaluation is the subject of many studies. Assembly lines in mass production often consist of a large number of repetitive manual tasks, and the workload of workers in these systems is high. Due to the repetitive manual tasks and the prolonged movements during the working day, biomechanical overload of workers' limbs occurs and workers are at risk of musculoskeletal disorders. For this reason, it is crucial to balance the workload between the operators by considering the ergonomic elements on the assembly lines. In this study, the REBA method, one of the ergonomic risk assessment methods, was used to evaluate the risks arising from all posture positions of the operators, and a multi-criteria job rotation scheduling model was developed that takes into account the abilities and preferences of the operators. The proposed model aims to increase the motivation of the employees, balance the work in terms of workload and processing times, ensuring that the work is completed in the shortest time and that appropriate operators are assigned to the tasks on the assembly line. In the model developed differently from the literature, it is aimed to minimize the difference between the REBA scores of the operators, to make the assignments according to the preferences of the operators and to provide the balance between the processing times. The work carried out is a real-world application and was conducted in an automotive company operating in Ankara. Since the results of the proposed mathematical model provide long-term solutions, results can be obtained for a certain number of tasks. The results of the developed multi-criteria mathematical model and the Simulated Annealing heuristic were compared using different performance measures.

Keywords: Ergonomic Work Rotation, REBA, Assembly Line, Simulated Annealing, Workload Balancing

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. YÖNTEMLER.....	3
2.1. İş Rotasyonu Çizelgeleme	3
2.1.1. REBA yöntemi	7
2.2. Çok Amaçlı İş Rotasyonu Çizelgeleme	9
2.2.1. Pareto optimal çözüm yöntemi.....	10
2.2.2. Ağırlıklı toplam yöntemi.....	11
2.3. Tavlama Benzetimi.....	13
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	16
3.1. İş Rotasyonu Çizelgeleme Problemi	16
3.1.1. Ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme.....	17
3.2. Çok Amaçlı İş Rotasyonunu Çizelgelemesinde Yapılan Çalışmalar	19
3.2.1. Çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme	19
3.3. İş Rotasyonun Çizelgeleme Probleminde Sezgisel Yöntemler	20
4. UYGULAMA VE BULGULAR.....	24
4.1. Önerilen İş Rotasyonu Çizelgeleme Modeli	27
4.2. İş Rotasyonu Çizelgeleme Problemi için Geliştirilen Tavlama Benzetimi Sezgiseli.....	32
4.2.1. Çözüm gösterimi ve başlangıç çözümü.....	32
4.2.2. Komşuluk belirleme	33
4.2.3. Soğutma stratejisi ve sonlandırma kriteri.....	35
4.2.4. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasının sözde kodu.....	36
4.2.5. TB’de Parametrelerin En iyi Değerlerinin Belirlenmesi	39
4.3. Bulgular ve Performans Ölçütleri ile Karşılaştırma	41

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
-----------------------------------	-----------

KAYNAKLAR.....	50
-----------------------	-----------

EKLER

EK 1: Operatörlerin İstasyonlara Dağılımı ve İstasyonda Yapılan İşler

EK 2: İşlerin İşlem Süreleri, REBA, A ve B Skorlarının Değerleri

EK 3: Geliştirilen TB Varyantlarının Sonuçları



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2. 1. REBA puanına göre risk ve eylem seviyesi	8
Tablo 4. 1. Örnek çözüm gösterimi	32
Tablo 4. 2. Parametre belirlemek için yapılan denemelerin sonuçları	40
Tablo 4. 3. Geliştirilen matematiksel modelin ve TB sezgiselinin ilk problemin karar değişkenlerin değerleri.....	42
Tablo 4. 4. Birinci istasyon için geliştirilen matematiksel modelin ve TB sezgiselinin amaç fonksiyonlarının sonuçları	43
Tablo 4. 5. TB varyantlarının performans ölçütlerine göre sonuçları	46

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. REBA puanını oluşturmak için uygulanan aşamalar	9
Şekil 2. 2. Tavlama benzetim sezgiselinin sözde kodu	15
Şekil 4. 1. Operatörlerin yaptıkları işlerin süreleri	24
Şekil 4. 2. İstasyonların yerleşimi	26
Şekil 4. 3. Birinci hareket mekanizmasının sözde kodu.....	33
Şekil 4. 4. İkinci hareket mekanizmasının sözde kodu.....	34
Şekil 4. 5. Üçüncü hareket mekanizmasının sözde kodu	35
Şekil 4. 6. Geliştirilen TB sezgiselinin sözde kodu.....	36
Şekil 4. 7. Parametre belirlemek için yapılan denemelerin grafik gösterimi	41
Şekil 4. 8. RPOS performans ölçütünün grafik gösterimi	46
Şekil 4. 9. SM performans ölçütünün grafik gösterimi	46
Şekil 4. 10. NPF performans ölçütünün grafik gösterimi.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

i	Operatör sayısı
j	İş sayısı
t	Periyot sayısı
A_{ij}	Eğer i . operatör j . işe yeteneği varsa 1, değilse 0
d_e	e . problemin Pareto çözümler arasındaki Öklid mesafesi
$\bar{d}$	Mesafelerin ortalaması
f_i	i . amaç fonksiyonu
f_{i_min}	i . amaç fonksiyonunun minimum değeri
f_{i_max}	i . amaç fonksiyonunun maksimum değeri
k_j	j . işin işlem süresi
n	Pareto çözümlerin sayısı
P_e	e . problemin Pareto çözüm kümesi
p_{ij}	Eğer i . operatör j . işi tercih ederse 1, değilse 0
P	P_e 'deki Pareto-optimal çözüm kümelerinin birleşimi
Q_i	i . amaç fonksiyonunun normalizasyon hali
$REBA_j$	j . işin REBA skoru
s_e	Her Pareto çözümün diğer çözümler arasındaki minimum mesafesi
$\bar{s}$	s_e 'lerin ortalaması
S	Pareto çözüm kümesi
SA_j	j . iş için A duruş skoru
SB_j	j . iş için B duruş skoru
T	Sıcaklık değeri
T_i	i . iterasyondaki sıcaklık değeri
W_i	Gün bazında i . operatöre atanan işlerin işlem sürelerinin toplamı
w_i	i . amaç fonksiyonunun ağırlık katsayısı
x_{ijt}	Eğer t . Periyotta i . operatör j . işe atanmış ise 1, değilse 0
Y	Birinci amacı doğrusallaştırmak için eklenen terim
z_i^u	i . amaç fonksiyonunun ütopya değeri
z_i^N	i . amaç fonksiyonunun nadir değeri
Z_{it}	2. amaçtaki mutlak değeri doğrusallaştırmak için eklenen terim
Δ	Yeni çözümün değeri ile en iyi çözümün değerinin farkı
α	Soğutma katsayısı
ACO	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
DND	Günlük Gürültü Dozu Yöntemi
JSI	İş Yüğü İndeksi
ManTRA	El Görevleri İçin Risk Değerlendirme Aracı
NIOSH	Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü
NP	Non deterministic (Deterministik olmayan)
NPF	Pareto Çözümlerin Çeşitliliği
OCRA	Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi
OWAS	Duruş Analiz Sistemi
REBA	Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme Yöntemi
R_{POS}	Pareto-Optimal Çözümlerin Ortalama Oranın
RULA	Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirme Yöntemi
SM	Dağılım Metriği

TB	Tavlama Benzetimi
GA	Genetik Algoritma
TBS-1	Tavlama Benzetim Sezgiselin Birinci Varyantı
TBS-2	Tavlama Benzetim Sezgiseli İkinci Varyantı
TBS-3	Tavlama Benzetim Sezgiseli Üçüncü Varyantı



1. GİRİŞ

Son yıllarda, işyerlerinde insan sağlığı sorunu, üretim planlamasındaki kilit konulardan biridir. Özellikle imalat firmalarında insanların sağlığındaki kötüleşme verimlilikte azalışa, daha az üretkenliğe, daha fazla başarısızlığa ve genel olarak daha az işçi memnuniyetine ve daha fazla devamsızlığa neden olmaktadır. İş yükünün fazla olması nedeniyle çalışanlar en çok kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarından sorun yaşamaktadırlar. İşle ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, tıbbi tedavi için önemli finansal maliyetler yaratır ve üretkenlikte kayıplara ve daha yüksek işgücü devrine yol açar. Kas-iskelet rahatsızlıklarının şiddetli kuvvet, nötr olmayan duruş, tekrarlama ve titreşim gibi birçok nedeni vardır. Bu nedenle araştırmacılar, kas-iskelet rahatsızlıklarını azaltmak için çeşitli önleyici müdahalelerin belirlenmesi ve iş rotasyonunun çözelgelemesine odaklanmışlardır.

İş rotasyonu, çalışanların belirli periyotlarda farklı iş istasyonları veya işler arasında geçiş yapmasını gerektiren yapılandırılmış bir değişiklik anlamına gelmektedir. İş rotasyonundaki değişim, işin yapısal özelliklerinde değil, çalışanın gerçekleştirdiği faaliyetlerde meydana gelir. Rotasyon, monotonluğun ve can sıkıntısının azalmasına, devamsızlığın azalmasına, üretilen ürünün kalitesinin artmasına, stresin azalmasına ve üretkenlikte (uzun vadeli) iyileşmeyi sağlamaktadır. Ayrıca, iş değişikliği, kullanılan kas gruplarında etkili bir değişikliği içermesi nedeniyle yorgunluğu, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını ve kümülatif travma bozukluklarına maruz kalma riskini azaltır. İş rotasyonu, risk faktörü içeren işleri yeniden tasarlamamanın bir alternatifi olarak görülmemelidir. Rotasyon riskleri ortadan kaldırmaz, aksine riskleri çeşitli işçiler arasında dağıtır. Bir işi rotasyon sistemine dahil etmeden önce, işin doğru bir şekilde yeniden tasarlanması gerekir ve tasarlanması yapılırken çalışma pozisyonlarının analiz edilmesi için ergonomi konusu dikkate alınmalıdır. Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerini iş rotasyonu problemine entegre ederek üretim sistemlerinde verimliliği artırmak ve çalışanlar üzerindeki riskleri azaltmak mümkündür. Bu çalışmada, ergonomik risk değerlendirmesi yöntemlerinden tüm vücut kısımlarını değerlendirilmesini sağlayan yönü dikkate alınarak hızlı tüm vücut değerlendirme yöntemi (REBA) yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada, montaj hatlarındaki ergonomik unsurlarını göz önünde bulundurarak çalışanlar arasındaki iş yükünü dengeleyen çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çözelgeleme konusu ele alınmıştır. Çalışanların motivasyonunun artırılmasını, duruş pozisyonları nedeniyle maruz kaldıkları risklerin en aza indirilmesini ve işlem sürelerinin dengelenmesini

amaçlayarak montaj hattındaki işlere en uygun işçinin atanmasını sağlayan çok amaçlı ergonomik matematiksel model önerilmiştir. Ayrıca önerilen matematiksel modelde çalışanların yetenekleri dikkate alınmıştır. Bu çalışma otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiş ve firmanın mekanik montaj hattında çalışan operatörler için iş rotasyonu çizelgelemesi yapılmıştır. Firmada iş rotasyonu çizelgeleme problemine ihtiyaç duyulmasının asıl nedeni, günün farklı zamanlarında işler için ölçülen işlem sürelerinde büyük farklılıkların gözlemlenmesi ve bu farklılıkların işçilerin çalışma ortamlarında ve çalıştıkları işlerde yaşadıkları problemlerden kaynakladığının belirlenmesidir.

İş rotasyonu problemleri NP-Zor sınıfında yer almaktadır. Bu nedenle çalışmada problemin çözümü için meta-sezgisel yöntemlerden Tavlama Benzetimi (TB) sezgiseli önerilmiştir. Algoritmanın performansını değerlendirmek için önerilen TB'nin üç farklı varyantı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmaların performansı, dağılım metriği (SM), Pareto çözümlerin çeşitliliği (NPF) ve Pareto-optimal çözümlerin ortalama oranı (RPOS) ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışma geliştirilen matematiksel modelde ve sezgisel algoritmada çalışanların yeteneklerini, tercihlerini ve iş yüklerini aynı anda dikkate alması yönü ile literatürde yer alan çalışmalardan farklılık göstermektedir. Ayrıca literatürde, ergonomik risk değerlendirmesi yöntemlerinden REBA yöntemini TB sezgiselinde kullanan çalışma yer almamaktadır.

Tez çalışmasında, ilk olarak kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Sonrasında bu konudaki literatür çalışmalarından bahsedilmiş ve ilerleyen kısımlarda anlatılan yöntemlerin uygulaması yapılarak sezgisel yöntemlerin karşılaştırmaların sonuçları yer verilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımları ise şu şekilde oluşturulmuştur. İkinci bölümde, iş rotasyonu çizelgeleme, REBA ve TB yöntemleri hakkında detaylı olarak bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, iş rotasyonu çizelgeleme ve iş rotasyonu çizelgeleme probleminde kullanılan sezgisel yöntemler ile ilgili literatür çalışmalardan bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, otomotiv firması hakkında bilgi verilmiştir ve ele alınan probleme ilişkin matematiksel model ve TB algoritması önerilmiştir. Algoritmanın performansını değerlendirilmesi adına TB'nin varyantları anlatılmıştır ve performans ölçütlerini kullanarak geliştirilen TB varyantlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Beşinci bölümde, bu çalışma ile elde edilen sonuçlar özetlenerek gelecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. YÖNTEMLER

Çalışma kapsamında iş rotasyonu çizelgelemesi matematiksel modeli ve sezgisel yöntemlerden tavlama benzetim yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan yöntemlerin açıklamaları ve kullanma amaçları anlatılacaktır.

2.1. İş Rotasyonu Çizelgeleme

İş rotasyonu işçileri farklı beceri ve sorumluluklar gerektiren iki veya daha fazla iş istasyonları arasında planlı bir şekilde hareket ettirmek anlamına gelmektedir. İş rotasyonu, üretim ve hizmet işletmeleri arasında kullanımı giderek yaygınlaşan bir iş organizasyonu türüdür. İş rotasyonu sistemi kurarak elde edilebilecek faydalar hem şirketi hem de çalışanlarını etkilemektedir. Böyle bir sistemin getirilmesiyle ilgili maliyetler, çalışma koşullarını iyileştirmeye yönelik diğer olası yöntemlerle karşılaştırıldığında düşük olmaktadır. Çalışanların rotasyonu, operatörlerin farklı görevleri yerine getirmek için uygun şekilde eğitilmeleri anlamına gelmektedir, bu da şirkete işçileri farklı işlere atama konusunda daha fazla esneklik sağlar ve böylece yüksek düzeyde devamsızlığın etkisini azaltmış olur. Öte yandan, bir çalışanın daha fazla beceri, yetenek ve bilgi edinmelerini sağlamak amacıyla belirli bir işte, görevde, görevde veya departmanda bir süre geçirdikten sonra bir işten, departmandan veya görevden diğerine taşınmasıyla ortaya çıkar. Bir bakıma iş rotasyonu koordinasyondan etkilenir ve kişinin bakış açısını, bilgisini, becerisini ve temasını genişletmeyi amaçlar [1]. İş rotasyonu, yüksek fiziksel iş yüküne ve monotonluğa maruz kalmayı azaltmayı amaçlayan imalat sanayileri tarafından örgütsel bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır [2].

İş rotasyonunun işçilere ve firmalara sağladığı birçok avantajı ve dezavantajı vardır. İş rotasyonunun avantajları aşağıda açıklanmıştır.

- İş rotasyonu çalışanların becerilerini geliştirmelerine ve memnuniyetlerini artırmaya yardımcı olabilir. Örneğin, çalışanlar her iş rotasyonu yapıldığında farklı işlere atanacak ve bu da becerilerini geliştirmeye teşvik edecektir. Gelişimlerini teşvik eden bir şirketteki çalışanlar, iş değiştirme ihtiyacı hissetmeyeceklerdir.
- İşlerdeki yük sayılarını dengeleyerek işçilerin her zaman yorucu iş yapmasını engelleyebilir. Örneğin, teslimatlar için ağır paketleri kaldıran bir depo çalışanı ile nakliye için evrak işlerini yürüten çalışanın işlerini döndürerek, yorgunluk riskini dengelemeye yardımcı olunur.

- Çalışanların en iyi nerede çalıştığını belirlememize yardımcı olabilir. İş rotasyonu yaptıkça çalışanların hangi işlerde iyi yaptığını, hangi işlerde kötü yaptığını bulabiliriz ve böylece çalışanlar doğru pozisyona atanmış olur.

- İşyerlerinde aniden çalışanın ayrılması veya hastalandığı durumda yedek bir plan verebilir. Çünkü, bir iş rotasyon planına sahip olduğunda, her işi nasıl yapacağını bilen birden fazla çalışan olabilir.

İş rotasyonunun dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

- Maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Yeni bir iş istasyonunda öğrenme sırasındaki verimlilik kayıpları, çalışanların rotasyonu ile ilişkili maliyetlerden biridir. İşçinin yeni bir iş istasyonuna atanması çok uzunsa, tüm beceri setini kaybedebilir. Bu gibi durumlarda, eğitim veya yeniden eğitim maliyeti de dikkate alınabilir.

- İş rotasyonu çok sık yapılırsa, çalışan yeni görevlere uyum sağlamak için zamanının çoğunu harcamak zorunda kalabilir ve hiçbir zaman kapasitesini tam olarak kullanamayabilir.

- Bazı çalışanlar iş değiştirmek istemeyebilir. Mevcut pozisyonunda rahat ve başarılı olan bir çalışan, başka bir çalışanın sürecini bozacağından endişe edebilir ve işlerini değiştirme ihtimaline karşı stresli olan çalışanları görebilirsiniz.

Üretim ortamında iş rotasyonu problemlerinde çeşitli hedefler belirlenmiştir. Klasik işçi atama problemlerinde ekonomik hedefler genellikle dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir ama iş rotasyonu problemlerinde amaçlar genellikle farklıdır. Örneğin kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ve meslek hastalıklarının önemi göz önüne alındığında iş rotasyonunun amacı ergonomik açıdan iyileştirmeye yönelik olabilir. Ergonomik kriterlerin yanı sıra, plansız devamsızlık ve çalışanların bulunamama durumlarıyla baş edebilmek için işçi atamasında iş rotasyonu kullanılmaktadır [3]. İş rotasyonu, özellikle işçinin görev sırasında çeşitli kas yüklerine maruz kalması durumunda, işçinin yorgunluğunun yanı sıra, tekrarlayan görevlerin yerine getirilmesinden kaynaklanan yaralanmaların azaltılması gibi faydalar da sağlar [4].

Bu çalışmada operatörlerin kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını ve tekrarlanan işleri azaltan ve bunun sonucunda işlerin periyotlar arasındaki işlem sürelerini dengeleyerek üretkenliği artıran ergonomik iş rotasyonu problemi çalışılmaktadır. Ergonomi çalışanın refahını ve kuruluşun genel performansını eniyilemek amacıyla yeni çalışma ortamı yaratmanın en iyi yollarını bulmaya çalışılmaktadır. İşyeri ergonomisi, fiziksel faktörlere (örneğin işin tekrarlanması, taşınan yüklerin ağırlığı ve iş yükü), bilişsel faktörlere (örneğin

görevlerin değişkenliği ve karmaşıklığı) ve psikososyal faktörlere (örneğin ekip çalışması, eğitim seviyesi) bağlıdır. İşyerindeki bu ergonomik faktörler, operatörlerin sağlığının zarar görmesine ve işletmelerde işgücünün azalmasına ile hem maliyetin artmasına hem de verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Araştırmalarda en çok maruz kalınan mesleğin montaj hattında çalışan teknisyenlerin veya teknikerlerin olduğu belirlenmiştir [5].

Montaj hatlarında sıklıkla ayakta durma, eğilme, çömelme, uzanma hareketlerinin gerçekleştirilmesi ve bu hareketlerin uzun süre tekrar etmeleri, uygun olmayan vücut duruşları, uygun tasarlanmamış araç gereçler kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının oluşması riskini ortaya çıkarmaktadır. Çalışmalarda da montaj hattındaki fiziksel faktörlerden dolayı operatörlerin düzenli olarak sırt ve kas ağrılarından şikayetçi oldukları ve diğer mesleklere nazaran operatörlerin kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının yaygın olduğu doğrulanmaktadır [6], [7].

Montaj hattındaki fiziksel ergonomik riskler, ağır yüklerin kaldırılması, uygunsuz duruşlar, uzun süreli oturma veya ayakta durma, tekrarlayan hareketler gibi fiziksel iş yükü faktörlerinin yoğunluğuna, sıklığına ve süresine bağlıdır. Bu faktörlerin değerlendirilmesi ve kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının ortaya çıkmasını önleyebilmenin en önemli yolu ise ergonomik risk değerlendirmesi yapılmasıdır. Kişisel anket yöntemleri, sistematik gözlemlere dayalı yöntemler ve direkt ölçüm yöntemleri dahil olmak üzere ergonomik risk değerlendirmesi üç sınıfa ayrılmaktadır [8], [9]. Kişisel anket yöntemlerinin en önemli avantajı, maliyeti düşük ve imkân dahilinde geniş örnek büyüklüğünün olması iken, dezavantajı kas-iskelet rahatsızlık riskinin ölçülmesinin bu yöntemle şüpheli olmasıdır. Riskin fazla olduğu düşünülen durumlarda diğer yöntemlerin kullanılması daha detaylı ve güvenilir sonuçlar vermektedir [8]. Direkt ölçüm yöntemleri ise en doğru maruziyet seviyesini göstermektedir. Ancak diğer yöntemlerle kıyaslandığında maliyeti yüksektir. Sistematik gözlemlere dayalı yöntemler, işyerlerinde ve araştırmalarda kişisel anket yöntemleriyle direkt ölçüm yöntemleri arasında dengeleyici olarak kullanılmaktadır. Gözleme dayalı yöntemler, kullanım şekli ve kullanım amacı açısından farklılık göstermektedir [10]. Gözleme dayalı yöntemlerden bazıları;

- Kaldırma görevleri için NIOSH ve iş yükü İndeks yöntemleri kullanılmaktadır.

NIOSH (Ulusal İş Güvenliği ve Sağlık Enstitüsü), çalışma alanlarında gerçekleştirilen manuel indirme ve kaldırma görevlerinin risk seviyesini belirlemek için geliştirilmiştir [11].

JSI (İş yükü İndeksi), kaldırma işleriyle ilişkili fiziksel stres düzeyinin bir ölçüsüdür. Endeks, iş taleplerinin kişinin veya işi gerçekleştiren kişinin kaldırma kapasitelerine oranının

bir fonksiyonudur. İş talebi, kaldırma ağırlığı, kaldırma frekansı ve görev geometrisi gibi gözlemlenebilir nicelikleri içerir [12].

- Tüm vücut kısımlarının değerlendirilmesi için hızlı tüm vücut değerlendirme yöntemi ve el görevleri için risk değerlendirme aracı kullanılmaktadır.

REBA (hızlı tüm vücut değerlendirme yöntemi), elle yapılan kaldırma ve taşıma işlemlerindeki riskleri hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. REBA, statik ve dinamik duruşların risk seviyelerinin belirlenmesi için bir puanlama sistemi sağlayarak aynı zamanda insan-yük etkileşimini de dikkate almaktadır [13].

ManTRA (el görevleri için risk değerlendirme aracı), çalışanın gerçekleştirdiği görevin normal bir iş günündeki toplam zamanı ve ara vermeden görevin yapıldığı normal zamanı değerlendirerek ve daha sonra farklı vücut bölümleri için beş görev özelliğinin (çevrim zamanı, kuvvet, hız, zorluk, titreşim) beş puanlı bir ölçek kullanarak yarı niceliksel olarak değerlendiren yöntemdir [14].

- Üst ekstremité risk değerlendirmesi için mesleki tekrarlamalı hareketler indeksi ve hızlı üst ekstremité değerlendirme yöntemleri kullanılmaktadır.

OCRA (mesleki tekrarlamalı hareketler indeksi), üst ekstremitenin tekrarlayan hareketlerine maruziyeti değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. OCRA yöntemi, otomasyona dayalı malzeme aktarma sistemlerinin kullanıldığı ve operatörlerin belirli bir hızla ilerleyen bir konveyör etrafında çalıştığı durumlarda kullanılmaktadır. OCRA yöntemi, kaldırma ve taşımaların yoğun olduğu üretim aşamaları için uygun değildir [15].

RULA (hızlı üst ekstremité değerlendirme yöntemi), hızlı Üst Ekstremité değerlendirme aracı kavramsal olarak bir görevle ilişkili üst ekstremité bozuklukları riskini değerlendirmektedir. Araç, farklı vücut bölgelerindeki duruşlar için değerlendirme yapılarak 1 ile 7 arasında nihai RULA skoru elde edilir. Araç nispeten basit olmasına ve duruş ve eforu birleştiren üst ekstremité riskinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlarken, diğer risk faktörlerinin (örn. tekrarlama, süre ve titreşim) dikkate alınmasını içermez [16].

- Gürültülü işyerleri için günlük gürültü dozu yöntemi (DND) kullanılmaktadır. DND, gürültü, insanların fizyolojik ve psikolojik dengelerini bozabilen, işitme sağlığını ve algılamasını olumsuz etkileyen, çalışma performansını azaltan, insanların memnuniyet ve samimiyet ile çalışmasını yok eden önemli bir faktördür. Günlük gürültü dozu yöntemiyle iş günü için, anlık darbeli gürültünün de dahil olduğu bütün gürültü maruziyet düzeylerini belirleyerek gürültü seviyelerini belirlemeye çalışılmaktadır [17].

Montaj hattında çalışan operatörler tüm vücutlarını kullanarak çalışmaktadırlar. Buna göre duruşsal risk düzeyi, bütün vücut bölümleri tarafından sergilenen hareketler dikkate

alınarak belirlenmelidir. Bu nedenden dolayı bu çalışmada sistematik gözlemlere dayalı yöntemlerden biri olan REBA yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte yöntem, dinamik hareketlerin yanı sıra statik duruşlar da göz önüne alındığı için çalışanın vücut duruşu ile ilgili riskler geniş bir şekilde değerlendirilmiş olmaktadır.

2.1.1. REBA yöntemi

REBA, 2000 yılında Hignett ve McAtamney tarafından geliştirilmiştir. Hignett ve McAtamney, özellikle sağlık hizmetlerinde ve diğer hizmet endüstrilerinde bulunan çalışma pozisyonlarının türüne göre postüral analiz araçları aralığında gözlemlenen bir gereklilik olarak önermişlerdir.

REBA, kas iskelet rahatsızlıkları riski için çeşitli çalışma duruşlarını değerlendirmede hızlı ve kolay bir yöntem sağlar. REBA yöntemi, vücudu hareket düzlemlerine göre bağımsız bir şekilde kodlayarak bölümlere ayırır. Bölümlere, yapılan hareketin durgun, dinamik, hızlı değişen veya dengesiz olduğunu değerlendiren aktivite puanı ve yük taşımamasını dikkate alan kavrama puanı ile REBA yönteminin sistemi oluşur [18].

REBA yöntemi vücut bölümlerinin duruşlarına ilişkin şemalarla, işçinin ilgili hareketini sergilerken vücut bölümlerinin duruşlarını eşleştiren, uygulanması pratik bir yöntemdir [19]. Bu ergonomik değerlendirme aracı, tüm vücut kısımları ve iş görevleriyle ilgili riskleri değerlendirmek için sistematik bir süreç kullanır. Gerekli veya seçilmiş gövde duruşunu, güçlü eforları, hareket veya eylem türünü, yinelemeyi ve kavramayı değerlendirmek için kullanılır. Ayrıca REBA, ergonomi veya pahalı ekipmanlarda ileri dereceye ihtiyaç duymadan kolay kullanım için tasarlanmıştır.

REBA yöntemini gerçekleştirmek için aşağıdaki 5 adım uygulanmaktadır [20].

Adım 1: Görevin gözlemlenmesi

Değerlendirici, çalışanın görevi gerçekleştirdiği sırada vücut duruşu ve ekipmanı nasıl kullandığını gözlemleyerek video veya fotoğraf ile kayıt altına almalıdır.

Adım 2: Değerlendirme için duruşların seçilmesi

Değerlendirici, görüşme ve gözlem sırasında toplanan verilerden, REBA yöntemini kullanarak hangi duruşların değerlendirileceğine karar verir.

Adım 3: Duruşların puanlanması

REBA yöntemine göre bir çalışma duruşu, Grup A ve Grup B olmak üzere vücut kısımları puanlanır. A Grubu, gövde, boyun ve bacaklar kısımlarının, B Grubu ise üst kollar, alt kollar ve bilekler kısımlarının açılma hareketleri ve opsiyonel duruşlarını içermektedir. A

Grubu gövde, boyun ve bacaklar için toplam 60 duruş kombinasyonuna sahiptir. Grup B'de üst kollar, alt kollar ve bilekler için toplam 36 duruş kombinasyonu bulunur [18].

Adım 4: Puanların işlenmesi

Gövde, boyun ve bacakların ayrı ayrı puanları belirlenerek, Tablo A yardımıyla bu puanların bir kombinasyonundan oluşan puan belirlenir. Bu puana Yük/Kuvvet skoru eklenerek A Puanı elde edilir. Üst kol, alt kol ve bileklerin ayrı ayrı puanları belirlenerek, Tablo B yardımıyla bu puanların kombinasyonundan oluşan bir puan belirlenir. Bu puana Kavrama skoru eklenerek B Puanı elde edilir. Daha sonra Tablo C kullanılarak, A ve B puanlarının kombinasyonundan oluşan C Puanı elde edilir.

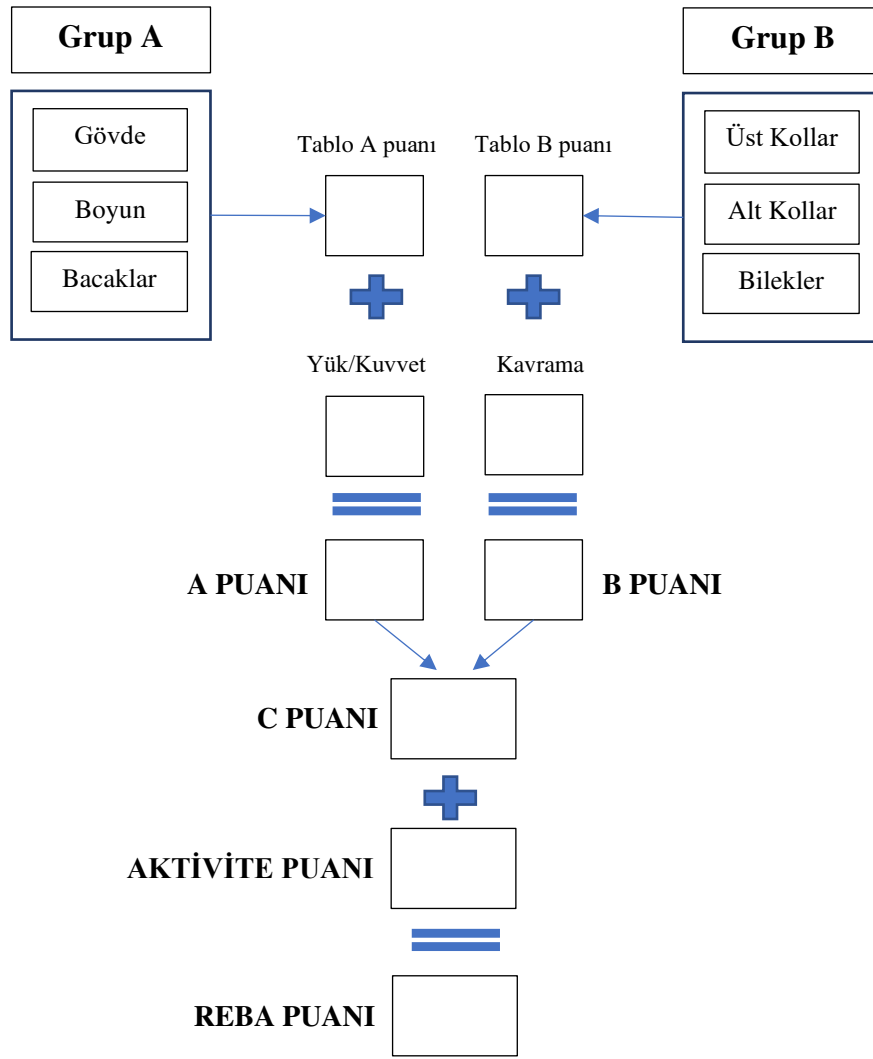
C Puanına, Aktivite puanının ilave edilmesiyle REBA Puanı elde edilmiş olur. Aktivite puanı, 1 dakikadan daha uzun süre tutulan statik duruşları ve dakikada 4 defadan fazla tekrarlamayı veya duruşlarda büyük hızlı değişiklikleri veya sabit olmayan bir zemini tanımlar. Tüm bu faktörler dikkate alınarak belirli bir süreç kullanılır ve 1 ile 15 arasında bir REBA puanı üretilir. REBA puanını üretirken gerçekleştirilen aşamalar Şekil 2.1.'de gösterilmiştir [18].

Adım 5: Eylem Seviyelerinin Belirlenmesi

REBA puanı, eylemin gerekli olup olmadığını ve aciliyetini tanımlayan REBA eylem seviyesini temsil eder REBA puanına göre belirlenecek risk düzeyi ve eylem seviyeleri Tablo 2.1'de verilmektedir [20].

Tablo 2. 1. REBA puanına göre risk ve eylem seviyesi

REBA Puanı	Risk Düzeyi	Eylem Seviyesi	Eylem (İleri Değerlendirmeyi İçeren)
1	İhmal Edilebilir Risk	0	Gerek yok
2-3	Düşük Risk	1	Değişim gerekebilir.
4-7	Orta Risk	2	Daha Fazla Araştırma ve Yakında Değişiklik Uygulama
8-10	Yüksek Risk	3	Değişikliği Araştırın ve Uygulayın
11+	Çok Yüksek Risk	4	Değişikliği Uygula.



Şekil 2. 1. REBA puanını oluşturmak için uygulanan aşamalar

2.2. Çok Amaçlı İş Rotasyonu Çizelgeleme

Çok amaçlı optimizasyon, modeldeki belirli bir kısıtlamalar aralığında birden fazla amacın sistematik ve eş zamanlı olarak optimize edilmesi olarak adlandırılır. Genel olarak, ele alınması gereken birçok çelişkili amaçlar vardır. Örneğin, belirli bir ürünü tasarlarlarken, maliyetini en aza indirmek, kalitesini (örneğin fizik, mekanik veya hizmet açısından) en üst düzeye çıkarmak ve çevresel etkisini en aza indirmek gerekir. Çoğu karar verme probleminde, çözümün kalitesini değerlendirmek için birden fazla kriter kullanılır. Bu kriterleri tek bir amaç fonksiyonunda toplamak her zaman mümkün olmayabilir. Birden fazla amaç içeren problemlerde, özellikle bu amaçlar çelişkili olduğunda, farklı çözümler arasından seçim yapılabilir [21].

Genel haliyle, çok amaçlı optimizasyon problemi aşağıdaki gibi sunulmuştur;

$$\min/\max F(x) = [F_1(x), F_2(x) \dots, F_k(x)] \quad (2.1)$$

kısıtlar altında

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.2)$$

$$h_l(x) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, e \quad (2.3)$$

$$x \in S \quad (2.4)$$

Bu modelde, k amaç fonksiyonlarının sayısı, m eşitsizlik kısıtlamalarının sayısı ve e eşitlik kısıtlamalarının sayısıdır. $F_i(x)$ i. amaç fonksiyonu, $F(x)$ ana amaç fonksiyonu, x karar değişkeni olarak tanımlanabilir. Çok amaçlı optimizasyon probleminde her bir amacı aynı anda eniyileyen tek bir çözüm olmadığını dikkate almak gerekir. Herhangi bir k amaç fonksiyonu için optimal olan çözüm genellikle diğer $k - 1$ amaç fonksiyonları için optimal olmayacaktır. Çok amaçlı optimizasyon probleminde optimum yaklaşımı olan Pareto baskınlık ilişkisi Edgeworth-Pareto optimumu olarak bilinmekte, yaygın olarak ise Pareto optimal olarak kullanılmaktadır.

2.2.1. Pareto optimal çözüm yöntemi

Çok amaçlı optimizasyon problemleri genellikle birçok optimal çözümü içerir. Bunlar Pareto-optimal çözümlerdir. Çok amaçlı bir optimizasyon probleminin Pareto-optimal çözümleri seti, karşılık gelen amaç fonksiyonlarının belirli bir boyutta diğerini kötüleştirmeden iyileştirilemeyeceği tüm karar değişkenlerinden oluşur [22]. Bu çözüm seti, farklı çatışan hedefler arasındaki uzlaşma çözümlerini temsil eder. Çok amaçlı bir problemin çözümünün temel amacı, Pareto optimal kümesini elde etmektir. Optimal bir noktanın belirlenmesi için, Pareto optimalde baskın ve baskın olmayan kavramlarının ortaya konulması gerekir [23].

Baskınlık: Çok amaçlı fonksiyonun bir vektörü $F(x^*) \in E$, eğer; $F(x) \leq F(x^*)$ iken en az bir amaç için $F_i(x) < F_i(x^*)$ şartını sağlayan bir diğer $F(x) \in E$ vektörü yok ise $F(x^*)$ vektörü baskındır.

Baskın Olmayan: Çok amaçlı fonksiyonun bir vektörü $F(x^*) \in E$, eğer; $F(x) \leq F(x^*)$ iken en az bir amaç için $F_i(x) < F_i(x^*)$ şartını sağlayan bir diğer $F(x) \in E$ vektörü var ise $F(x)$ vektörü baskın olmayandır.

Eğer E çözüm alanında diğer noktalar bir çözüm noktasına baskın değilse bu çözüm noktası baskın olmayan çözüm olarak adlandırılır. Diğer çözümler tarafından baskılanmamış olan tüm çözümler Pareto optimal çözümlerdir. Dolayısıyla, bir $x^* \in S$ noktası, ancak ve ancak $F(x) \leq F(x^*)$ ve $F_i(x) < F_i(x^*)$ durumunu sağlayan en az bir fonksiyon için herhangi bir $x \in S$ noktası olmaması durumunda Pareto optimal çözümdür. Başka bir deyişle x^* aynı anda en az bir diğer koşulu artırmadan bazı koşulları azaltan kendisinden daha iyi bir karar değişkeni x vektörü olmaması halinde Pareto optimal çözümdür [21]. Çok amaçlı bir problemin çözümünün temel amacı, Pareto optimal kümesini elde etmektir. Pareto optimal çözümlerinin sayısı, problemin boyutuna göre ve dikkate alınan hedef sayısı ile birlikte artar. Verilen çok amaçlı optimizasyon problemi $F(x)$ için Pareto optimal küme P^* Eşitlik 2.5'teki gibi tanımlanır [24]:

$$P^* := \{x \in S \mid \nexists x^* \in S: F(x^*) \leq F(x)\} \quad (2.5)$$

Pareto optimal seti (veya bir kısmı) oluşturulduktan sonra, alternatifler arasından en çok tercih edileni seçmek için karar vericiye sunulur. Buradaki sakıncalar, üretim sürecinin genellikle hesaplama açısından pahalı ve bazen de en azından kısmen zor olmasıdır. Öte yandan, karar vericinin çok sayıda alternatif arasından seçim yapması zordur. Bir diğer önemli soru da alternatiflerin karar vericiye nasıl etkili bir şekilde sunulacağı veya gösterileceğidir. Daha fazla hedef olduğunda, problem daha karmaşık hale gelir. Çok amaçlı doğrusal problemlerinin çözümünde yöntemlerin iki alt sınıfa ayrılmaktadır. İlkinde, tüm Pareto optimal çözümlerini bulabilen yöntemler ve ikincisinde ise sadece tüm Pareto optimal ekstrem çözümlerini bulabilen yöntemlerdir. İkinci durumda, Pareto optimal uç noktalarını birleştiren kenarlar Pareto optimal olabilir veya olmayabilir [25]. Bundan kaynaklı bu çalışmada, Pareto optimal çözüm yerine problemlerde sıklıkla kullanılan ve daha gelişmiş yöntemlerde uygulanan temel yöntemlerden ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır.

2.2.2. Ağırlıklı toplam yöntemi

1955 yılında Gass ve Saaty ve 1963 yılında Zadeh, her bir amaç fonksiyonunu bir ağırlık katsayısı ile ilişkilendirmek ve amaçların ağırlıklı toplamını minimize etmek için ağırlık toplam yöntemini sunmuştur. Bu şekilde, çok amaçlı optimizasyon probleminin tek amaçlı bir matematiksel optimizasyon problemine dönüşmektedir. Tek amaç fonksiyonu, amaç fonksiyonlarıyla w_i ağırlık katsayılarının çarpılarak toplanmasıyla oluşur.

Çok amaçlı optimizasyon problemi, ağırlıklı toplam yöntem ile aşağıdaki forma dönüştürülür:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i F_i(x) \quad (2.6)$$

kısıtlar altında

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad i = 1, \dots, k \quad (2.7)$$

$$w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, k \quad (2.8)$$

$$x \in S \quad (2.9)$$

İdeal olarak, her bir amaç fonksiyonunun ağırlıkları, problemin sezgisel karar verici tarafından atanır. Bununla birlikte, farklı amaç fonksiyonları farklı büyüklüklere sahip olabileceğinden, karar vericiler tarafından atanan ağırlıklarla tutarlı bir Pareto optimal çözümü elde etmek için hedeflerin normleştirilmesi gerekir. Bu normleştirme, formüle edilen hedefler arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmak ve farklı ölçek hedeflerinden kaynaklanan hesaplama karışıklığını önlemek içinde kullanılmaktadır.

Amaç fonksiyonlarının Pareto optimal kümesi içinde değiştiği aralıkların uzunluğunu veren Nadir ve Ütopya noktalarının optimal fonksiyon değerlerinin farklılıklarıyla normalize edilebilir ve 2.10 eşitliğe göre ifade edilir.

$$Q_i = \frac{F_i(x) - z_i^u}{z_i^N - z_i^u} \quad (2.10)$$

Normalizasyon yöntemi, amaç fonksiyonlarını Pareto optimal kümesi üzerindeki varyasyonlarının gerçek aralıklarıyla normleştirdiğimiz için en iyi normleştirme sonuçlarını sağlar. Ütopya noktası olarak adlandırılan ideal amaç vektörü z^u olarak simgelenir. Ütopya noktası, amaç fonksiyonu minimum ise Pareto optimal kümesinin alt sınırlarını sağlar. Nadir noktası olarak adlandırılan vektör z^N olarak simgelenir. Ütopya noktası, amaç fonksiyonu minimum ise Pareto optimal kümesinin üst sınırlarını sağlar [26].

2.3. Tavlama Benzetimi

Çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme problemleri NP-Zor olan bir yapıdadır. Küçük veya orta derecede ergonomik modellere, işçiler, iş istasyonları ve periyotlarda katlandığında hesaplama süresinde artış olmaktadır. Ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme problemini, 2013 yılında Otto ve Scholl tarafından 3 kademeli problem çözüm yaklaşımıyla ve 2019 yılında Kovalev, Chalamon ve Collignon tarafından tek-çift kademeli çözüm yaklaşımıyla NP-Zor olduğu kanıtlanmıştır [27], [28].

Bu problemler NP-Zor türden bir problem olduğundan bu tür problemlerin çözümü için meta-sezgisel teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerin başlıca ve en yaygın olanları yasaklı arama, TB ve genetik algoritmadır. Metasezgisel teknikler, karmaşık problemlere çözüm bulabilme yeteneklerinden dolayı çok yaygın kullanılmaktadır. Metasezgisel, arama uzayında yüksek kaliteli çözümlere ulaşmak için probleme özgü sezgisellere rehberlik eden yüksek-seviye stratejileridir. Amacı, yerel eniyi tuzaklara yakalanmayı engellemesidir. Bu amaca, arama sırasında kötü hareketlere izin vererek ya da rassal başlangıç çözümleri yerine çok daha zeki bir yolla üretilen çözümleri kullanarak ulaşmaktadır [29]. Metasezgisellerin en önemli özelliği, çeşitlendirme ve yoğunlaşma arasındaki dinamik dengeyi oluşturmalarıdır.

Metasezgisel yöntemlerden biri olan TB, Kirkpatrick, Gerlatt ve Vecchi (1983) ve Cerny (1985) tarafından ortaya konmuştur ve çıkardıkları zamandan beri çok sayıda soruna etkili bir yaklaşım olarak kendini kanıtlamış bir tekniktir.

Bu yaklaşım ile fizikteki termodinamik tavlama süreci arasında yakın bir benzerlik vardır. TB temelini oluşturan fikirler ilk olarak 1953'te Metropolis ve diğerleri tarafından tavlama olarak bilinen bir ısı banyosu işleminde malzemenin soğumasını simüle eden bir algorithmada yayınlandı [30]. Katı malzeme erime noktasından sonra ısıtılır ve ardından tekrar katı hale soğutulursa, soğutulan katının yapısal özellikleri soğuma hızına bağlıdır. Örneğin, büyük kristaller çok yavaş soğutma ile büyütülebilir, ancak hızlı soğutma veya söndürme kullanılırsa kristal bir dizi kusur içerecektir. Tavlama işlemi, malzemeyi bir parçacık sistemi olarak ele alıp simüle edilebilir. Metropolis'in algoritması, sabit bir "donmuş" duruma yakınsayana kadar bir soğutma işlemine tabi tutulduğunda sistemin enerjisindeki değişimi simüle eder. Otuz yıl sonra, Kirkpatrick ve diğerleri, bu tip simülasyonun, optimal bir çözüme yakınsama amacıyla bir optimizasyon probleminin uygun çözümlerini araştırmak için kullanılabileceğini öne sürmüşler.

TB, tüm olası çözümler kümesini arayarak çalışır, daha düşük çözümlere geçişe izin vererek zayıf bir yerel optimumda takılıp kalma şansını azaltır TB algoritması bir başlangıç

çözümle ve yerel en küçükten kaçınmak için yüksek bir sıcaklık değeriyle başlamaktadır. Başlangıç çözümünden, TB birkaç yinelemede ilerler. Her yinelemede rastgele bir komşu oluşturarak yeni çözüm bulur ve sıcaklık bir soğutma programına göre kademeli olarak azalmaktadır. Algoritmada, modeldeki amaç fonksiyonunu geliştiren iyi çözüm her zaman kabul edilmektedir. Öte yandan, kötü çözümü ise modelin sıcaklığını arttırmaya izin veren ya da amaç fonksiyonundan bozulma miktarına (ΔE) bağlı olan belirli bir olasılıkla seçilir. ΔE , mevcut çözüm ile oluşturulan komşu çözüm arasındaki amaç değerindeki farkı temsil eder. Algoritma ilerledikçe sıcaklık değeri arttığından daha iyi olmayan bir komşu çözümün kabul edilme olasılığı azalır. Yeni çözüm kabul edilmiş ise yeni çözümle, yeni çözüm reddedilmişse bir mevcut çözümle tekrar çalışmaktadır. Algoritmanın durdurma kriteri olan iterasyon sayısı veya sıcaklığın en küçük değeri gerçekleşene kadar işlemler devam etmektedir [31].

Mevcut çözüme ek olarak, aramanın başlangıcından bu yana bulunan en iyi çözüm saklanır. Sıcaklık değeri sıfıra yaklaştıkça çözümlerin çoğu reddedilmektedir. Böylece, amaç fonksiyonunda zaman zaman bozulmalar olsa bile sürecin yerel eniyilerde takılıp kalması önlenmekte ve sürecin genel eniyiye ulaşılmasına olanak sağlanmaktadır. Basit TB algoritması Şekil 2.2.'de gösterilmiştir [32].

```

Bir başlangıç çözümü seç:  $s=s_0$  ve amaç fonksiyonu  $f(s_0)$  hesapla;
Bir başlangıç sıcaklığını belirle:  $T = T_{\max}$ ;
 $s \leftarrow s_0$ ;  $f(s) \leftarrow f(s_0)$ ;
 $s_{iyi} \leftarrow s_0$ ;  $f(s_{iyi}) \leftarrow f(s_0)$ ;
Repeat
     $n \leftarrow 0$ ;
    Repeat
         $s'$ 'nin bir komşusu olan  $s'$  çözümünü üret;
         $\Delta E \rightarrow f(s') - f(s)$ ;
        If  $\Delta E \leq 0$  then  $s \leftarrow s'$ ;
        Else (0,1) aralığında düzgün dağılımdan bir rassal sayı
        üret ( $u$ ) and
             $u < \exp(-\Delta E / T)$  ise  $s \leftarrow s'$  ;
             $f(s') < f(s_{iyi})$  ise  $s_{iyi} \leftarrow s'$  ;
         $n \leftarrow n+1$ ;
    Until  $n > M$ 
 $T = T(i)$ ;
Until  $T < T_{\min}$ 

```

Şekil 2. 2. Tavlama benzetim sezgiselinin sözde kodu

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışma, iş rotasyonu çizelgeleme problemine dayandığından, literatür incelememiz bu alanlara odaklanmaktadır. Aşağıdaki alt bölümlerde, önce genel olarak iş rotasyonu çizelgeleme konusunda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir ve ardından ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme ve çok amaçlı iş rotasyonu çizelgeleme literatürü ile devam edilmektedir. En son bölümde iş rotasyonu çizelgeleme probleminde sezgisel yöntemleri kullanan çalışmalar anlatılmaktadır.

3.1. İş Rotasyonu Çizelgeleme Problemi

İş rotasyonu çizelgeleme problemlerinde her işçi veya ekipman belirli bir zaman aralığında her periyotta bir görevden başka bir göreve atanır ve işlemlerini gerçekleştirir [33]. Saravani et al., [34] yaptıkları çalışmada iş rotasyonu, çalışanları güçlendirmenin, ufuklarını geliştirmenin, iş tatmini ve beceri çeşitliliğinin artırmanın en önemli etkili unsur olarak kabul etmişlerdir.

İş rotasyonu monotonluğu azaltmak, iş yükünü dengelemek ve çoklu yetenekleri artırmak için alternatif bir yöntem haline gelmiştir [35]. Bununla birlikte, Azizi et al., [36] çalışanların can sıkıntısını hafifletmeyi ve rotasyon aralıklarının, çalışanların öğrenme ve unutma üzerindeki etkisinden yararlanmayı amaçlayan iş rotasyonu için bir metodoloji sunmuştur. İş rotasyonunda eğitim, öğretim ve kapasite gibi faktörlerin yanı sıra sektörün özelliklerini de dikkate aldığını belirtmiştir.

Birçok çalışma, genellikle otomotiv montaj hatlarında iş rotasyonu çizelgesini önermiştir. Freiboth et al., [37] 1997 yılında yaptıkları çalışmada, iş rotasyonunun, otomotiv firmasında çalışanların süreç bilgilerini geliştirdiğini ve sürekli bir iyileştirme sürecini mümkün kıldığını bulmuşlardır. İş sayısının ve çevrim süresinin görev özelliklerine göre belirlenmesini ve rotasyondaki işlerin benzer iş içeriğine sahip olmasını önermişlerdir. Ardından, iş rotasyonunun Huang and Pan, [38] çalışan için ve Anzanello and Fogliatto, [43] ise şirket için olumlu sonuçlar aldıklarını vurgulamaktadırlar. Weichel et al., [40] iki ay boyunca örnek bir çalışma grubuna iş rotasyonu uygulamış ve çalışanların belirli iş istasyonlarını tercih ettikleri ve iş rotasyonunu anlamadıkları için planlanandan daha az iş istasyonu arasında rotasyon yaptıklarını tespit etmiştir. Michalos et al.,[41] ağır araç üreticisinin vaka çalışması için çeşitli iş rotasyonu senaryolarını değerlendirmektedir. Bulguları, iş rotasyonu tekniklerinin benimsenmesinin, toplam montaj hatası sayısını önemli

ölçüde azaltarak ürün kalitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca işle ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının riskini azaltmada etkinlik göstermiş, diğer uygulama türlerine göre ekonomik ve etkili bir strateji haline getirmiştir.

3.1.1. Ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme

Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını hem montaj hattı dengeleme yöntemi ile hem de iş rotasyonu yöntemiyle azaltmaya çalışan çalışmalar bulunmaktadır. İncelenen çalışmalarda, montaj hattı dengeleme probleminin, yüksek ergonomik riskleri olan istasyonları ortadan kaldırmadığını bu nedenle iş rotasyonunun çalışanların vardiyalardaki yüksek görevleri engellediğini, risklerin bireysel iş atamaları arasında dengeli bir şekilde dağılımını sağladığını belirtmişlerdir. Daha yüksek ergonomik riskler, yalnızca kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları için değil, aynı zamanda daha ciddi hastalıklar için daha yüksek riskleri ifade eder, bu nedenle ergonomik riskleri bireysel iş görevleri arasında dengelemek önemlidir [42].

İş rotasyonu verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, her bir görevin iş yükü seviyelerine ve özelliklerine göre uygun bir çizelge geliştirilmelidir. İş yükü seviyesini değerlendirmek amacıyla Jonsson, [43] bir iş rotasyon çizelgesi oluşturmak için elektromiyografi kullanarak işçilerin fiziksel iş yükünü ölçmüş ve iş rotasyonunun etkisini değerlendirmiştir. Carnahan et al., [44] ergonomik hedeflerle iş rotasyonu zamanlamasında yöneylem araştırması tekniklerinin uygulanmasına öncülük etmişlerdir. Yapılan çalışmada, bel yaralanmaları için en yüksek riski en aza indirmek amacıyla iş rotasyonu çizelgeleme problemi için bir tamsayı programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Triggs and King, [45] NIOSH kaldırma denklemi, iş zorlanma indeksi (JSI) ve RULA gibi bir iş rotasyon çizelgesi geliştirmek için nicel tekniklerin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Möller et al, [46] elektronik montaj işi yapan kişiler için risk faktörlerinin maruziyet benzerliğini ölçmüş ve farklı maruziyet profilinin kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının yaygınlığını azaltmada olumlu bir etki sağlayabileceğini kaydetmişlerdir. Horton et al., [47] iş rotasyonu, rotasyon sıklığı, sırası ve cinsiyetin etkilerini araştırmışlardır ve farklı efor seviyelerini içeren görevler arasında rotasyon yapıldığında kas yorgunluğunun azaldığını göstermişlerdir. Schneider et al., [48] çalışanların düşük ve yüksek talepli işlerde dönerek makul bir iş yükünü yerine getirebilmeleri için iş rotasyonundan sonra aynı vücut bölgesinin kullanılmamasını tavsiye etmişlerdir. Rodrigo and Okimorto, [49] laktik asit seviyelerini ölçerek çalışanların yorgunluğunu hesaplamış ve kas yorgunluğunu önlemek için 1-2 saat aralıklarla bir iş rotasyonu çizelgesi önermişlerdir. Leider et al., [50] önceki çalışmaları sistematik olarak

araştırmışlar ve iş rotasyonu sırasında fiziksel iş yükünü ve kas-iskelet şikayetlerini azaltmak için görev özelliklerinin ve ilgili vücut bölümlerinin dikkate alınması gerektiğini öne sürmüşlerdir.

Yöneylem araştırması alanındaki optimizasyon teknikleri, insan kriterleri göz önünde bulundurularak iş rotasyonu geliştirmek için kullanılmıştır. Xu et al., [51] üretkenliği ve üst ekstremité iş yükünü dikkate alan karma tamsayılı programlama modelini kullanarak montaj hattı tasarımı gerçekleştirmişler ve hat verimliliğini korurken ergonomik tehlikeye maruz kalmayı etkili bir şekilde azaltmışlardır. Diğer çalışmaların aksine, Yoon, et al., [52] iş rotasyonu planlama modellerindeki bireysel iş yükünü en aza indirmişlerdir. REBA ile iş yükünü değerlendirerek tamsayı programlama modeli ile çözümlenmişlerdir. Mossa et al., [53] verimlilik oranlarının işçilerin beceri profillerine bağlı olduğu bir iş rotasyonu çizelgeleme problemini tanımlamışlardır. Yapılan çalışmada, OCRA yöntemini kullanarak iki karma-tamsayılı doğrusal olmayan model formüle edilmiştir. İlk model, üretilen ürün birimlerinin sayısını enbüyüklemeyi amaçlamaktadır, böylece OCRA ile ölçülen maksimum bireysel iş yüklerinin önerilen maruz kalma sınırlarını aşmamaktadır. İkinci model, çıktının hedef seviyesi için ortalama ergonomik riskleri enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Sonuçlar, verimliliği arttırmanın yanı sıra, uygun bir işçi rotasyonu ile ergonomik riskleri aynı anda azaltmanın ve dengelemenin mümkün olduğunu göstermektedir. Moussavi et al., [54] her işin fiziksel iş yükünü belirlemek için şirket içi risk değerlendirme yöntemi ile iş rotasyonunu zamanlamak ve kümülatif iş yükünü optimize etmek veya dengelemek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Model, işçilerin günlük iş yükünün dengeli olacağı şekilde her işçi için en uygun iş sırasını belirlemiştir. Önerilen iş rotasyonu stratejisi ile rotasyonu belirli gruplar içinde gerçekleştirilmiştir ve günlük iş kümülatif iş yükünün dağılımını ve sapmasını azaltmıştır.

Bottia et al., [55] çalışanların fiziksel kapasitelerini, yeterliliklerini zihinsel ve fiziksel becerilerini dikkate alan ve her bir iş istasyonunun gereksinimleriyle yetenekler ve ergonomik yük açısından analiz eden işçi-iş uyumu yaklaşımını öneren matematiksel model önermişlerdir.

Son yıllardaki çalışmalarda da iş rotasyonuna önem verilmiştir. Örneğin; Finco et al., [56] ergonomik olarak yorgunluğu dikkate alan yaş odaklı yeni bir iş rotasyonu çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Günlük üretkenliği en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan matematiksel modelde hem fiziksel kapasite hem de deneyim düzeyi yönleri dahil edilmiştir. Ayrıca modelde enerji harcama oranı ve kabul edilebilir maksimum enerji harcaması kullanılarak fiziksel yorgunluk ölçülmüştür. Comper et al., [57] otonom iş rotasyonunun, kas-iskelet

sistemi semptomlarına, mesleki zorlanma ve çalışma yeteneği üzerindeki etkisini incelemişler fakat iş rotasyonuna yüksek uyumun, kas-iskelet sistemi semptomları, mesleki zorlanma ve çalışanların çalışma yeteneği üzerinde hiçbir olumlu etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır.

3.2. Çok Amaçlı İş Rotasyonunu Çizelgelemesinde Yapılan Çalışmalar

Birkaç çalışmada, üretim alanındaki iş rotasyonu çizelgeleme problemine, ergonomik unsurları, çalışanların tercihlerini veya yeteneklerini ekleyerek çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirmişlerdir.

3.2.1. Çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme

Aryanezhad et al., [58] DND ile ölçülen maksimum mesleki gürültü maruziyetini aynı anda en aza indirmek ve JSI ile ölçülen bel yaralanmalarında için maksimum riskleri en aza indirmek için çok amaçlı bir tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Farklı seviyelerde becerilere ve bireysel maruz kalma sınırlarına sahip çalışanları dikkate almışlardır. Modelin kısıtları, bireysel iş yüklerinin bireysel maruz kalma sınırlarını aşmasını engellemektedir. Yapılan çalışmada, normalize edilmiş amaç fonksiyonları ağırlıklı bir toplam olarak tek bir amaç fonksiyonda birleştirilmiş ve farklı ağırlık seviyeleri için hesaplama çizelgelerini hesaplanmıştır.

Bazı çalışmalarda, bir iş rotasyonu çizelgesinde çalışanların iş gereksinimleri ve kapasiteleri arasında en iyi uyumu bulmak için modeller geliştirilmiştir. Örneğin, Diego-Mas et al., [59] işçilerin işlere göre yeteneklerinin ve tercihlerinin yanı sıra kuvvetlerin, tırmanmaların veya araçların sürülmesi gibi genel gerekliliklerin ilgili genel kapasitesini dikkate almışlardır. Amaç fonksiyonunda, iş gereksinimleri ile işçilerin kapasiteleri arasındaki uyumsuzlukları ve işçilerin sevmedikleri işlere atanması cezalandırılmaktadır. Yapılan çalışmada, aynı iş aynı işçi tarafından birkaç rotasyon döneminde yapılmışsa modele cezalar konulmuştur ve problemin matematiksel model ile çözülemediğini belirtilerek genetik algoritması (GA) önerilmiştir. Sgarbossa et al., [60] hat dengelemede ergonomik kriterleri dikkate almışlardır. Ergonomi kriterlerini ve montaj hattı dengeleme problemini birleştirmek için çok amaçlı bir programlama yaklaşımı sunulmuştur. Ergonomik kriterlerin yanı sıra, çalışmalarında enerji harcamasını da incelemişlerdir. Battini et al., [61] montaj hattında iş istasyonlarının temel özelliklerine dayalı olarak, enerji harcama değerlerini hızlı bir şekilde tahmin etmeye yardımcı olan Yeniden Belirlenmiş Hareket Süresi Sistemleri adlı yeni bir teknik sayesinde ergonomi düzeyini tahmin etmek için enerji harcaması kavramı kullanılmış

ve optimal çözümlerin etkin sınırlarını tanımlamak için dört farklı amaç fonksiyonuna dayalı çok amaçlı bir yaklaşım tanıtılmıştır.

Botti et al., [62] iş rotasyonu modelinde işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluklarını göz önünde bulundurmuşlardır. Ergonomik risklerin azaltılması ve her işe kalifiyeli işçi atanması hedeflenen çok amaçlı matematiksel model önermişlerdir. Moussavi et al., [3] hem verimlilik hem de ergonomik kriterleri göz önünde bulundurarak, bir üretim sisteminde ergonomik iş rotasyonu uygulamak için çok amaçlı bir karma-tamsayılı matematiksel model önermişlerdir. Modelinde, çalışılan sistemdeki üretim çevrim süresini azaltmakla birlikte işçilerin maruz kaldıkları günlük iş yükünü dengelemeyi amaçlamışlardır. Sana et al., [63] değişkenliği yüksek üretim ortamlarında tekrarlayan işlerde, kaldırma görevlerinde ve garip duruşlarda ergonomik yönleri dikkate alarak iş rotasyonu probleminin matematiksel bir modelini önermişlerdir. Matematiksel model, ergonomik kısıtlamaları entegre eden çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir ve geliştirilmiş baskın olmayan sıralama GA'sı kullanılarak çözülmüştür.

3.3. İş Rotasyonun Çizelgeleme Probleminde Sezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntem, bir soruna uygun bir çözüm getirmesi görünen, ancak matematiksel olarak eniyi çözümü üretmesi garanti edilemeyen bir yöntem anlamına gelmektedir. Sezgisel yöntemler, uygulamayı kolaylaştırdığı, hızlı sonuçlar elde ettiği ve problem özellikleri ve veri kalitesindeki değişikliklere karşı daha az hassas olduğu için matematiksel model yerine tercih edilmektedir.

İş rotasyonunda toplam işçi sayısı veya iş sayısı fazla olduğundan ve uzun hesaplama süreleri için tüm olası çözümlerin değerlendirilmesi zor olmaktadır, bu nedenden dolayı iş rotasyonu çizelgelemesi için sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır. Literatürde, hesaplama sürelerini azaltmak ve insan kriterlerini aynı anda dikkate almak için TB, karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), GA ve bulanık algoritma gibi çeşitli sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır.

Sezgisel yöntemlerden GA ile yapılan çalışmalar diğer sezgisel yöntemlere göre fazladır. İlk başta, ergonomik amaçlarla iş rotasyonuna öncülük eden Carnahan et al., [44] stokastik ergonomik parametrelerini dikkate alan ve iş rotasyonu aralıkları olan GA tasarlamıştır. Diego-Mas et al., [59] rotasyon sırasında maksimum iş çeşitliliğini korurken iş rotasyonu çizelgeleri oluşturmak için GA'yı kullanmışlardır. Asawarungsaengkul and Nanthavanij, [64] işyeri değişimlerini en aza indirmek amacıyla iş rotasyonu problemi için bir

genetik algoritma önermişlerdir. Asensio-Cuesta et al., [65] çalışanları kabul edilebilir bir risk düzeyine maruz bırakmak için mesleki tekrarlayan eylem aracını (OCRA) kullanarak iş rotasyonu programları için GA'yı kullanmışlardır. Dalle Mura and Dini, [66] çalışanların ergonomisini geliştirmek için iş rotasyonu ve insan-robot iş birliğini dikkate alarak montaj hattı dengeleme problemini çözmek için bir GA önermişlerdir. Cheshmehgaz et al., [67] maksimum kümülatif riski en aza indirmek için bir bulanık GA kullanarak bir iş rotasyonu çizelgesi geliştirmiş ve çalışmasında iş yükünü ölçmek için duruş analiz sistemini (OWAS) kullanmışlardır.

GA'nın yanı sıra çeşitli sezgisel yöntemlerde kullanılmıştır. Nanthavanij ortak yazarlarla birlikte iş rotasyonu çizelgeleme problemlerini araştırmış ve Yaoyuenyong [68] ile birlikte iş rotasyonu çizelgeleme problemi için çok amaçlı açgözlü, basit bir yerel arama, bütünleşik bir yerel arama ve numaralandırma tabanlı sezgisel yöntemler dahil olmak üzere birkaç algoritmalar tasarlamışlardır. Daha sonra Nanthavanij et al., [69] 2010 yılında yayınladıkları makale ile önceki makalelerinin üstüne işçilerin değişen becerilerini hesaba katmışlardır. Seçkiner ve Kurt [70], her bir çalışanın iş yükünü ve işçiler arasındaki iş yükü sapmasını en aza indirmek için ACO algoritmasını kullanmışlardır. Azizi et al., [36] çalışanların sıkıntısını hafifletmeyi ve rotasyon aralıklarının çalışanın beceri öğrenmesi ve unutması üzerindeki etkisinden yararlanmayı amaçlayan iş rotasyonu için bir arama algoritması gerçekleştirmişlerdir. Otto and Scholl, [71] iş yükünü NIOSH, OCRA, JSI ve Avrupa montaj çalışma sayfası (EAWS) ile ölçmüş ve TB'ni kullanarak ergonomik kriterlere sahip bir hat dengeleme modeli geliştirmişlerdir. Ergonomik kriterlere sahip model, ek finansal ve mühendislik maliyetleri olmaksızın iş istasyonları arasında iş yükünü dengelemek için bir çözüm oluşturulmuştur. İlaveten, Otto and Scholl, [28] sorunun yapısal özelliklerini araştırmışlar ve formüle edilen sorunun güçlü anlamda NP-zor olduğunu kanıtlamışlardır. Sorun yapısından faydalanan hızlı ve etkili bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Song et al., [72] tek anatomik segmentlerin iş yükleri ve manuel malzeme elleçleme faaliyetlerindeki iş yükü gibi çok çeşitli risk faktörleriyle bir iş rotasyonu problemi formüle ederek sezgisel bir algoritma tasarlamışlar ve hesaplanan iş rotasyonu çizelgelerinin şirkette kullanılan statik iş rotasyonu çizelgesinden daha iyi performans gösterdiği bir vaka çalışması sunmuşlardır. Hochdörffer et al., [73] işçilerin niteliklerini, işyerinin ergonomik maruziyetini dikkate alan iş rotasyonu problemini doğrusal bir programlama tabanlı sezgisel yöntemi kullanılarak personel planlama sistemi oluşturmuşlardır.

Maleki, [74] çalışmasında çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemi kullanmıştır. İlk olarak, kimyasal maruziyeti en aza indirmek için iş rotasyonu problemlerini

özen yeni çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu algoritması önermiş ve son olarak geliştirdiği algoritmayı, baskın olmayan sıralama GA ile karşılaştırmış ve bu algoritma, işçi sağlığını sağlayan döküm, kaynak, köpük enjeksiyon, plastik enjeksiyon gibi üretim süreçlerinde kimyasal maruziyeti azalttığını öne sürmüştür. Ayougha et al., [75] dinamik performans metriklerine sahip heterojen operatörleri ele almış ve iş rotasyonu çizelgeleme problemlerini U-şekilli bir yalın üretim hücresinde dengeleme ve üretim sıralama ile bütünleştirmişlerdir. Operatör sayısından sapmaları en aza indirmek için yeni birçok dönemli doğrusal olmayan karma tamsayı modeli sunmuş ve problemi çözmek için değişken komşu arama algoritma yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Diego-Mas, [76] evrimsel bir algoritma geliştirmiştir. Algoritma, görevleri rotasyon gruplarına ayırarak, her grup için işçileri seçerek ve yorgunluğun etkilerini en aza indirmek için işçilerin rotasyon sırasını belirleyerek çoklu ergonomi kriterlerini optimize eden rotasyon programları oluşturmıştır. Algoritma, kas-iskelet yaralanmaları ile ilgili uzun süreli risklere maruz kalmayı azaltmış ve çalışanların her rotasyonda farklı görevlere atanmasını basitleştirmiştir.

Metasezgisel yöntemlerden biri olan TB, 1983 yılında Kirkpatrick, Gerlatt ve 1985 yılında Vecchi ve Cerny tarafından ortaya konmuştur ve çıkardıkları zamandan beri çok sayıda problemlere etkili bir yaklaşım olarak kendini kanıtlamış bir tekniktir [77].

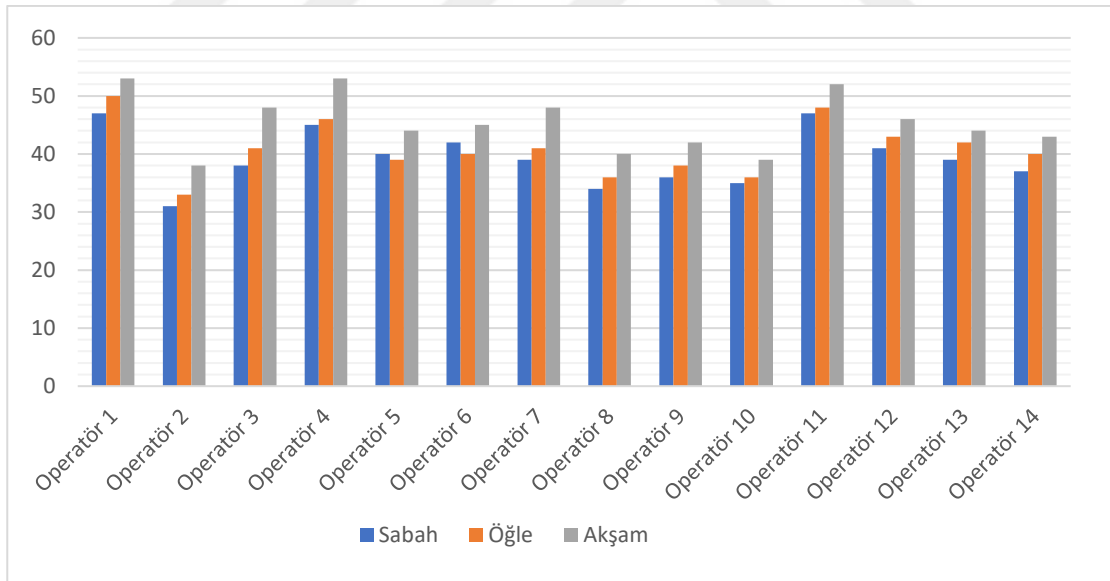
Seçkiner ve Kurt, [78] her bir çalışanın iş yükünü ve işçiler arasındaki iş yükü sapmasını en aza indirmek için matematiksel model ve daha sonra etkili rotasyon programları geliştirmek, orta ölçekli hizmet sistemlerinde bile karmaşık olduğunu öne sürerek tavlama benzetim algoritmasını kullanmışlardır. TB, müşteri talebinin bir çalışma günü boyunca ve bir çalışma haftası boyunca değişen hizmet kuruluşlarına uygulanabilir şekilde tasarlanılmıştır. Daha sonra, Malekahmadi et al., [79] üretim sistemlerinde farklı becerilere sahip personelin iş rotasyonu probleminin NP_Zor olduğundan dolayı çalışmasındaki modelini çözmek için meta-sezgisel tavlama benzetim algoritması kullanılmışlardır. Önerilen çözümünün etkinliğini değerlendirmek için, rastgele bir dizi örnek problem oluşturulmuş ve daha sonra sonuçları, optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Önerilen meta-sezgisel algoritmanın yüksek verimliliğini ve zaman çözünürlüğü dikkate alındığından sonuçları daha iyi performansı verdiğini ispatlamışlardır.

Yukarıdaki bölümlerde verilen literatür çalışmaları ışığında, gerçekleştirilen bu tez çalışmasının, doğrusal olmayan matematiksel model, bu modelde yer alan farklı ergonomik amaçlar, çalışmada geliştirilen ve literatürde çok az çalışmanın bulunduğu TB sezgiseli ile literatürdeki boşluğu doldurması hedeflenmiştir. Belirtilen tüm bu özellikler aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.



4. UYGULAMA VE BULGULAR

Bu çalışma otomotiv sektöründe yer alan bir firmanın mekanik montaj hattında gerçekleştirilmiştir. Firmanın mekanik montaj hattında çalışan operatörlerin günün farklı zamanlarında yaptıkları işler için gerçekleştirilen ölçümlerinde farklılıkların olduğu saptanmıştır. Bunu belirlemek amacıyla firmada farklı günlerde ve farklı zamanlarda operatörlerin yaptıkları işler üzerinde ölçümler alınmıştır. Örnek olması nedeniyle ilk iki istasyonda çalışan operatörlerinin ölçülen işlem sürelerine ait grafik, Şekil 4.1’de verilmektedir. Şekil 4.1’deki grafik incelendiğinde her bir operatör için günün son periyodundaki sürelerinin diğer periyotlardaki sürelerle göre daha fazla çıktığı görülmektedir. Bu doğrultuda periyotlar arasındaki süre farklılıklarını en küçüklemek için iş rotasyonu çizelgeleme yöntemi ile problemin çözülmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tez kapsamında, mekanik montaj hattında çalışan operatörlerinin iş motivasyonlarını arttırmak, toplam günlük iş yüklerini en aza indirmek ve iş yüklerini dengelemek amacıyla çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme modeli geliştirilmiştir.

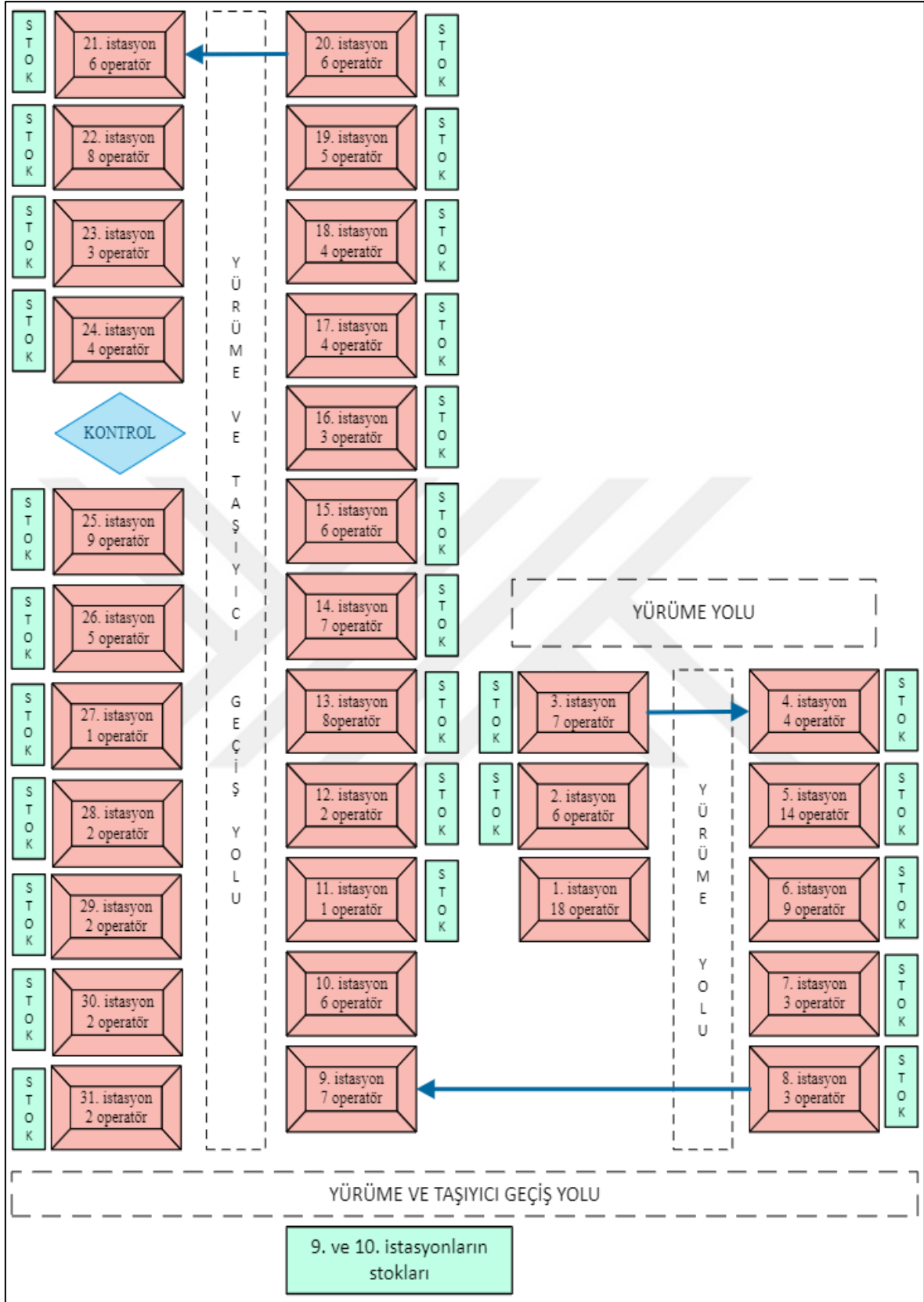


Şekil 4. 1. Operatörlerin yaptıkları işlerin süreleri

Otomotiv firmasında 21 günde 1 tane araç üretilmektedir. Firmada üretilen araç türleri üç grupta incelenir. Birinci grupta 13 çeşit, ikinci grupta 7 çeşit ve üçüncü grupta 12 çeşit araç modeli bulunmaktadır. Her araç türüne göre uygulanan işlemler farklıdır. Üçüncü gruptaki araçların üretimi diğer gruptaki araçlara göre daha fazla yapıldığından dolayı bu çalışmada sadece üçüncü gruptaki araçlar ele alınmıştır. Üretimde kullanılan temel hammaddeler ise sızdırmazlık malzemeleri, paslanmaya karşı kullanılan malzemeler, saclar, profiller, boyalar, lastik, tahta levhalar, borular, koltuklar, halılar ve tüm parçaların sökölüp başka bir yerde tekrar monte edilmesini sağlayan setlerdir.

Mekanik montaj hattı 31 istasyondan ve 1 adet rework kontrol yerinden oluşmaktadır. Ayrıca istasyonların yan veya ön taraflarında aracın iskeletine montaj edilen ürünler için hazırlık bölümleri bulunmaktadır. Mekanik montaj hatlarında çalışan operatörler manuel olarak montaj yapmaktadırlar ve operatörler montajı yapılan araçla işini bitirdikten sonra kas gücüyle bir sonraki istasyona itmektedirler. İstasyonların çevrim süresi 70 dakikadır. Her istasyonda birbirinden farklı işlemler yapılmaktadır. Mekanik montaj hattındaki istasyonlarda toplam 157 operatör çalışmaktadır. Mekanik montaj hattındaki istasyonların yerleşimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Operatörlerin istasyonlara dağılımı ve istasyonda yapılan işler, EK-2’de yer almaktadır.

Mekanik montaj hattında yapılan gözlemler sonucunda aksamalara neden olan en önemli faktör, operatörlerin kas-iskelet rahatsızlıklarını sıklıkla yaşamasıdır. Kas-iskelet rahatsızlıkları montaj hattında tekrarlı ve zorlayıcı hareketlerden, uygun olmayan vücut duruşlarından ve uygun tasarlanmamış araç gereçlerden kaynaklanmaktadır. Kas-iskelet rahatsızlıklarını engellemek için Ergonomik Risk Değerlendirme yöntemlerinden REBA yöntemi kullanılmıştır. REBA yöntemi, firmanın montaj işlemleri uzun, kaldırma ve taşımaların yoğun olan üretim aşamalarından oluşmasından ve vücudun tüm kısımlarının analiz etmesinden dolayı tercih edilmiştir.



Şekil 4. 2. İstasyonların yerleşimi

REBA yönteminin uygulanmasında ilk olarak gövde, boyun ve bacakların duruşu puanlanarak A tablosunun skoru, diğer yandan üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu puanlanarak B tablosunun skoru elde edilir. A tablosunun skoruna, duruş sırasında uygulanan kuvvet veya taşınan yüke ilişkin puan eklenerek A skoru ve B tablosunun skoruna, kavrama puanı eklenerek B skoru hesaplanmaktadır. C skoru, A skoru ile B skoru birleştirilerek elde edilmektedir. Daha sonra C skoruna, operatörlerin aktivite skorları eklenerek REBA skoru bulunmaktadır. REBA yöntemi kullanılarak mekanik montaj hattındaki tüm işlerin A, B ve REBA skorları hesaplanmıştır. Ardından, firmadan elde edilen standart süreler ve REBA yönteminden elde edilen skorlar önerilen matematiksel modelde parametre olarak kullanılmıştır. Standart süreler ve A, B ve REBA skorlarının değerleri Ek 2’de sunulmuştur.

Bu çalışmada incelenen mekanik montaj hattına ait varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Montaj hattındaki operatörlerin her işi yapamadığı, bazı işleri yapmaya yetkin oldukları varsayılmaktadır
- Bir operatör, bir iş istasyonunda bir periyotta yalnızca bir iş yapabildiği varsayılmaktadır.
- Her periyotta her işe yalnızca bir operatörün atanabildiği varsayılmaktadır.

4.1. Önerilen İş Rotasyonu Çizelgeleme Modeli

Bu çalışmada tanımlanan problemin çözülmesi amacıyla yukarıda verilen parametreler ve varsayımlar göz önüne alınarak ergonomik çok amaçlı matematiksel modelin indisleri, parametreleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıda sunulmuştur.

İndisler

i operatör sayısı	$i = \{1, 2, \dots, I\}$
j iş sayısı	$j = \{1, 2, \dots, J\}$
t periyot sayısı	$t = \{1, 2, \dots, T\}$

Parametreler

SA_j : j . iş için A duruş skoru

SB_j : j . iş için B duruş skoru

k_j : j . işin işlem süresi

$REBA_j$: j . işin REBA skoru

W_i : Gün bazında i . operatöre atanan işlerin işlem sürelerinin toplamı

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer i. operatör j. işte kalifiye ise,} \\ 0, & \text{değilse} \end{cases}$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer i. operatör j. işi tercih ederse,} \\ 0, & \text{değilse} \end{cases}$$

Karar değişkeni

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer i. operatör j. işe t. periyotta atanmış ise,} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Geliştirilen iş rotasyonu çizelgeleme modelinde üç farklı amaç belirlenmiştir. Birinci amaç, montaj hattında çalışan her bir operatörün diğer operatörler ile gün içerisinde, çalıştıkları toplam işlem süreleri arasındaki farkın en büyük değerini en küçüklemeektir. Böylece operatörler arasındaki işlem süreleri bakımından dengesiz dağılım ve oluşan büyük farkların azaltılması hedeflenmiştir. Buna göre birinci amaç fonksiyonu Eşitlik 4.1’de verilmektedir:

$$f_1(x) = \text{Min } \text{Max}_{i,j \in I} (W_i - W_j) \quad (4.1)$$

Modeldeki ikinci amaç ise tekrarlayan işler yapan operatörlerin her periyottaki iş yükünü dengelemeyi sağlamaktadır. İş yükünü dengelemek için ergonomik değerlendirme yöntemlerinden REBA skorundan yararlanılmaktadır. Operatörlerin birbirini izleyen periyotlar arasındaki REBA skor farklarının en büyüklenmesi hedeflenmiştir. Bu amaca ilişkin gösterim ise Eşitlik 4.2’de verilmektedir.

$$f_2(x) = \text{Max} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T-1} \left| \sum_{j=1}^J x_{ijt} * REBA_j - \sum_{j=1}^J x_{ijt+1} * REBA_j \right| \quad (4.2)$$

Modelde yer alan üçüncü amaç operatörlerin tercihlerine yönelik işlere atanmalarını sağlamaktadır. Bu amaç fonksiyonu ile operatörlerin verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaç fonksiyonu ise Eşitlik 4.3’te verilmektedir.

$$f_3(x) = \text{Max} \sum_i^I \sum_j^J p_{ij} * \left(\sum_t^T x_{ijt} \right) \quad (4.3)$$

Modelde yer alan amaç fonksiyonlarından birinci ve ikinci amaç fonksiyonlarının doğrusal olmayan fonksiyonlar olduğu görülmektedir. Modelin çözümü için bu fonksiyonların doğrusal fonksiyonlara dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun için modele ek kısıtlar eklenmiş ve amaç fonksiyonları doğrusal yapıya uygun hale getirilmiştir.

İlk olarak birinci amaç fonksiyonu için Eşitlik 4.4 kullanılmış ve kısıtlara eklenmiştir. Buna göre modelde yer alan amaç fonksiyonu Eşitlik 4.6’da verildiği gibi değişmiştir.

$$Y = \text{Max}_{i,j \in I} (W_i - W_j) \quad (4.4)$$

İkinci amaç fonksiyonu ise mutlak değer ifade içermektedir ve bunun için kısıtlarda Eşitlik 4.5’te verilen parametre kullanılarak eşitsizlikler oluşturulmuştur. İkinci amaç fonksiyonu ise Eşitlik 4.7’de verildiği gibidir.

$$Z_{it} = \left| \sum_{j=1}^J x_{ijt} * REBA_j - \sum_{j=1}^J x_{ijt+1} * REBA_j \right| \quad (4.5)$$

Tez kapsamında problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model aşağıdaki gibidir.

İş Rotasyonu Çizelgeleme Matematiksel modeli;

$$f_1(x) = \text{Min } Y \quad (4.6)$$

$$f_2(x) = \text{Max} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T-1} Z_{it} \quad (4.7)$$

$$f_3(x) = \text{Max} \sum_i^I \sum_j^J p_{ij} * \left(\sum_t^T x_{ijt} \right) \quad (4.8)$$

kısıtları altında

$$\sum_{j=1}^J x_{ijt} = 1 \quad , \forall i, \forall t \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} = 1 \quad , \forall j, \forall t \quad (4.10)$$

$$\sum_{j=1}^J (SA_j x_{ijt} + SA_j x_{ij,t+1}) \leq 1 \quad , \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.11)$$

$$\sum_{j=1}^J (SB_j x_{ijt} + SB_j x_{ij,t+1}) \leq 1 \quad , \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.12)$$

$$\sum_{j=1}^J (x_{ijt} * REBA_j) - \sum_{j=1}^J (x_{ijt+1} * REBA_j) + M * y_{it} \geq Z_{it}, \quad \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.13)$$

$$\sum_{j=1}^J (x_{ijt+1} * REBA_j) - \sum_{j=1}^J (x_{ijt} * REBA_j) - M * y_{it} \geq Z_{it} - M, \quad \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.14)$$

$$\sum_{j=1}^J (x_{ijt} * REBA_j) - \sum_{j=1}^J (x_{ijt+1} * REBA_j) \leq Z_{it} \quad , \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.15)$$

$$\sum_{j=1}^J (x_{ijt+1} * REBA_j) - \sum_{j=1}^J (x_{ijt} * REBA_j) \leq Z_{it} \quad , \forall i, t = 1, \dots, T-1 \quad (4.16)$$

$$\sum_t^T \sum_j^J k_j * x_{ijt} = W_i \quad (4.17)$$

$$Y \geq W_i - W_j \quad , \forall j, \forall i \in I \quad (4.18)$$

$$x_{ijt} \leq A_{ij} \quad , \forall i, \forall j, \forall t \quad (4.19)$$

$$Y_{it}, X_{ijt} \in \{0,1\} \text{ ve } a, b \text{ tamsayı} \quad (4.20)$$

$$Z_{it} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.9 her periyotta her işe yalnızca bir operatörün atanmasını garanti etmektedir. Eşitlik 4.10 bir operatörün her periyotta yalnızca bir işe atanmasını sağlamaktadır. Eşitlik 4.11 ve 4.12, operatörlerin aynı vücut bölgesinde yüksek iş yükü oluşturan ardışık işlere atanmasını önlemektedir. Eşitlik 4.13,4.14, 4.15 ve 4.16, 2. amaç fonksiyonunu doğrusal fonksiyona dönüştürmek için eklenen kısıtlardır. Eşitlik 4.17, her bir operatöre atanan işlerin toplam işlem süresini temsil etmektedir. Eşitlik 4.18, 1. amaç fonksiyonunun doğrusal fonksiyona dönüştürülmesi için eklenen kısıttır. Eşitlik 4.19, operatörlerin kalifiye oldukları işlere atanabilmesini garanti eder. Bir işçi bir iş istasyonunda çalışabiliyorsa, bu iş istasyonundaki tüm işleri yapabileceği varsayımı altında bu kısıt oluşturulmuştur.

Önerilen çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde amaç fonksiyonu için Pareto optimal çözüm yerine daha gelişmiş yöntemlerin unsurları olarak da uygulanan temel yöntemlerden ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, amaç fonksiyonları farklı büyüklüklere sahip olması nedeni ile verilen ağırlıklarla tutarlı bir Pareto optimal çözümü elde etmek için hedeflerin normalleştirilmesi gerekmektedir.

Amaç fonksiyonlarını Pareto optimal kümesi üzerindeki değişen aralıkların uzunluğunu veren Nadir ve Ütopya noktalarındaki optimal fonksiyon değerlerinin farklılıklarının bulunmasıyla normalleştirilmiştir. Bu çalışmada maksimum ve minimum amaçlar olduğu için amaç fonksiyonlarını Eşitlik 4.22 ve 4.23'te verilen denklilere dönüştürerek Eşitlik 4.24'teki tek amaç fonksiyonu elde edilmiştir.

$$\min f_i(x) \longrightarrow \min f_i^*(x) = \frac{f_i(x) - f_{i_min}(x)}{f_{i_max}(x) - f_{i_min}(x)} \quad (4.22)$$

$$\max f_j(x) \longrightarrow \min f_j^*(x) = \frac{f_{j_max}(x) - f_j(x)}{f_{j_max}(x) - f_{j_min}(x)} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \min F(x) = & w_1 * \frac{f_1(x) - f_{1_min}(x)}{f_{1_max}(x) - f_{1_min}(x)} + w_2 * \frac{f_{2_max}(x) - f_2(x)}{f_{2_max}(x) - f_{2_min}(x)} \\ & + w_3 * \frac{f_{3_max}(x) - f_3(x)}{f_{3_max}(x) - f_{3_min}(x)} \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.2. İş Rotasyonu Çizelgeleme Problemi için Geliştirilen Tavlama Benzetimi Sezgiseli

Çalışmanın gerçekleştirildiği mekanik montaj hattında 157 operatör çalışmaktadır. Geliştirilen matematiksel model ile problemin boyutu nedeniyle kısa sürelerde en iyi çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle problemin çözümü için meta-sezgisel yöntemlerden Tavlama Benzetimi sezgiseli geliştirilmiştir.

Çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu problemini çözmek için DEV-C programında Tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen Tavlama Benzetimi algoritmasında kullanılmak üzere probleme ait çözüm gösterimi, başlangıç çözümü oluşturma, komşuluk yapısı, tavlama benzetimi algoritması ve parametre değerleri izleyen bölümlerde açıklanmıştır.

4.2.1. Çözüm gösterimi ve başlangıç çözümü

Problemin çözümlerinin nasıl ifade edileceği konusu algoritmanın oluşturulmasında ele alınması gereken ilk konudur. Belirli bir gösterim şeması oluşturulmalıdır ve çözümler standart biçimde ifade edilmelidir. Tavlama benzetiminde potansiyel çözümlerin gösterimi, $x \times y$ matris biçiminde, operatör sayısı ile periyot boyutlarından oluşmaktadır. Çözüm gösteriminin örneği Tablo 4.1.'de gösterilmektedir. Burada satırlar operatörleri, sütunlar ise periyotları temsil etmektedir. Operatörlerin ve periyotların kesiştiği hücreler atanan işleri göstermektedir.

Tablo 4. 1. Örnek çözüm gösterimi

Operatör	Periyot			
	1	2	3	4
1	1	2	4	6
2	4	3	2	4
3	7	1	7	5
4	2	7	6	2
5	6	6	5	7
6	5	4	1	3
7	3	5	3	1

Bu çalışmada, başlangıç çözümünü bulmak için iki yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntem, kısıtları göz önüne alınarak rasgele atamalarla bir başlangıç çözümü oluşturulmasıdır. İkinci yöntem ise matematiksel modelin 2 saat çalıştırılması sonucu elde edilen uygun çözümün, algoritmanın başlangıç çözümü olarak kullanılmasıdır.

4.2.2 Komşuluk belirleme

TB algoritmasında başlangıç çözümü elde edildikten sonraki kısım bir sonraki çözümün nasıl elde edileceği aşamasıdır. Bu aşamada bir sonraki çözüm, daha önce belirlenmiş olan bir komşuluk yapısına göre üretilecektir.

Komşuluk yapılarını belirlenmesi, başarılı olan hareket mekanizmalarının seçilme şansını arttıracak şekilde çalışır. Hareket mekanizmalarının seçilme olasılıkları şu şekildedir: 1. hareket mekanizmasına olasılığı %0 ile %33,50 arasında, 2. hareket mekanizmasının olasılığı %33,50 ile %67 arasında ve 3. hareket mekanizmasının olasılığı %67 ile %100 arasındadır. Her iterasyonda üretilen rassal sayı hangi aralığa denk geliyorsa, ona karşılık gelen hareket mekanizması seçilir ve uygulanır. Eğer bir hareket mekanizması ile daha iyi bir çözüm ($\Delta < 0$) bulduysa hareket mekanizmasının olasılığını %0,5 oranında artırılır. Hareket mekanizmaları aşağıda tanımlanmış ve sözde kodları verilmiştir.

1. Hareket mekanizması: Toplam işlem sürelerin en büyük ve en küçük süreye sahip olan işçiler belirlenir. Toplam en büyük süreye sahip olan operatörün en yüksek süreli işi ile aynı periyottaki toplam en küçük süreye sahip işçinin işi yer değiştirir. 1. hareket mekanizmasının sözde kodu Şekil 4.3.'de yer almaktadır. Bu hareket mekanizmasını operatörlere atanan işlerin işlem sürelerini dengelemek amacıyla yapılmaktadır.

Input: Mevcut Çözüm (S), İşlem Süreleri (X)

Begin

Red=0;

For (Red<1)

Mevcut çözümdeki işçilerin toplam işlem sürelerini bul;

Maksimum süreye sahip olan işçiyi bul ve işçi1 değişkenine ata;

Minimum süreye sahip olan işçiyi bul ve işçi2 değişkenine ata;

İşçi1'deki en yüksek süreye sahip olan işi bul ve iş1 değişkenine ata;

İş1'in periyodunu bul ve periyodu T'ye ata;

İşçi2'nin T periyottaki işi bul ve iş2 değişkenine ata;

If İşlerinin yerlerinin değişmesi mümkün ise **Then**

İş2 ve İş1 yer değiştir;

Red=1;

Else Red=0 and İş1 $\leftarrow$ 0;

End For

End

Şekil 4. 3. Birinci hareket mekanizmasının sözde kodu

2. Hareket mekanizması: Rassal olarak belirlenen bir periyotta REBA değerlerinin farklarının toplamı en küçük olan işçinin işi ile eğer belirlenen iş 7'den (REBA değerlerinin ortalaması) küçük ise aynı periyottaki işçiler arasından en büyük REBA değerine sahip olan işin yeri değiştirilir. Ancak belirlenen iş 7'den büyük ise aynı periyottaki işçiler arasından en küçük REBA değerine sahip olan işin yeri değiştirilir. 2. hareket mekanizmasının sözde kodu Şekil 4.4.'de yer almaktadır. Bu hareket mekanizmasını operatörlere atanan işlerin REBA değerlerini dengelemek amacıyla yapılmaktadır.

Input: Mevcut Çözüm (S), REBA değerleri (REBA)

Begin

Red=0;

(1,4) arasında bir rassal x sayısı üret ve periyot T'ye ata;

For (Red<1)

Mevcut çözümdeki işçilerin REBA değerlerinin farklarının toplamını bul;

Minimum REBA farklarının toplamına sahip olan işçiyi bul ve işçi1 değişkenine ata;

İşçi1'in T periyottaki işi bul ve iş1 değişkenine ata;

If (İş1_Reba değeri < 7) **Then**

T periyottaki en büyük REBA değerine sahip olan işi bul ve İş2 değişkenine ata.

Else (İş1_Reba değeri > 7) **Then**

T periyottaki en küçük REBA değerine sahip olan işi bul ve İş2 değişkenine ata.

İş2 ve İş1 yer değiştir.

If İşlerinin yerlerinin değişmesi mümkün ise **Then**

İş2 ve İş1 yer değiştir;

Red=1;

Else Red=0 **and** İş1 ← 0;

End For

End

Şekil 4. 4. İkinci hareket mekanizmasının sözde kodu

3. Hareket mekanizması: Uygun çözümdeki işçilerin tercih değerlerinin toplamı bulunur ve toplam tercih değerlerinden en aza sahip olan işçinin tercih etmediği iş ile aynı periyota bakılarak tercih ettiği işin yeri değiştirilir. 3. hareket mekanizmasının sözde kodu Şekil 4.5.'de yer almaktadır. Bu hareket mekanizması operatörlere tercih ettikleri işlerinin atanmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır.

```

Input: Mevcut Çözüm (S), Tercih değerleri (Tercih)
Begin
    Red=0;
    For (Red<1)
        Mevcut çözümdeki işçilerin toplam tercih değerlerini bul;
        Minimum tercihe sahip olan işçiyi bul ve işçi1 değişkenine ata;
        İşçi1'in tercih etmediği işi bul ve İş1 değişkenine ata;
        İş1'in periyodunu bul ve periyodu T'ye ata;
        T periyottaki işlerden İşçi1'in tercih ettiği işi bul ve İş2 değişkenine ata;
        İş2'nin T periyottaki işçiyi bul ve İşçi2 değişkenine ata;
        If İşlerinin yerlerinin değişmesi mümkün ise Then
            İş2 ve İş1 yer değiştir;
            Red=1;
        Else Red=0 and İş1← 0;
        Else Red=0 and İş1← 100;
        If İşçi2, İş1 tercih etmiyorsa Then Red=0 and İş2←100;
    End For
End

```

Şekil 4. 5. Üçüncü hareket mekanizmasının sözde kodu

4.2.3. Soğutma stratejisi ve sonlandırma kriteri

Bu çalışmada, 1983 yılında Kirkpatrick tarafından bulunan geometrik soğutma stratejisi kullanılmıştır. Geometrik soğutma stratejisi sabit soğutma oranı (α) ile bir önceki iterasyondaki sıcaklık değeri çarpılarak yeni sıcaklık değeri bulunur. Geometrik soğutma stratejisi formülasyonu, Eşitlik 4.25'te ifade edilmektedir. Eşitlikteki T_i , i. iterasyondaki sıcaklık değeridir.

$$T_i = \alpha * T_{i-1} \quad (4.25)$$

Bu çalışmada geliştirilen TB algoritmasının sonlandırma kriteri $T_{\min}$ parametresine bağlıdır. Belirlenen başlangıç sıcaklığı ile algoritma çalışmaya başlar ve geometrik soğutma stratejisi ile soğutma işlemi yapılarak sıcaklık düşürülür. Sıcaklık değeri $T_{\min}$ altına düştüğü anda algoritma sonlandırılır.

4.2.4. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritmasının sözde kodu

Algoritmanın sözde kodu Şekil 4.6.'da yer almaktadır.

M=Yeni komşu üretimi için yapılan hareket

Input: Başlangıç sıcaklık (T_{MAX}), Son sıcaklık (T_{MIN}), Sıcaklık azaltma faktörü (α), iterasyon sayısı (iter), Pareto_List= $\emptyset$

Begin

Başlangıç çözümü üret (S_0);

Mevcut çözüm (S)

$S \leftarrow S_0$

$X_best \leftarrow S_0$

F_best (ağırlık)

$Pareto_List \leftarrow S_0$

For($T_i > T_{min}$)

 iter=1;

 olasılık1=33,50;

 olasılık2=67;

For(iter<N)

 (0,100) arasında bir rassal x sayısı üret;

If ($x < olasılık1$) **then**

 S mevcut çözümüne ait 1. hareket mekanizmasına göre komşu çözümü (S') üret;

 Weighted sum (F') hesapla;

 Weighted fonksiyonuna göre değişimi hesapla ($\Delta = f(F') - f(F_best)$)

If ($\Delta < 0$) **then** olasılık1 sayısını 0,5 artır

End If

If ($x > olasılık1$) **and** ($x < olasılık2$) **then**

 S mevcut çözümüne ait 2. hareket mekanizmasına göre komşu çözümü (S') üret;

 Weighted sum (F') hesapla;

 Weighted fonksiyonuna göre değişimi hesapla ($\Delta = f(F') - f(F_best)$)

If ($\Delta < 0$) **then**

 olasılık2 sayısını 0,25 artır

 olasılık1 sayısını 0,25 azalt

End If

End If

Şekil 4. 6. Geliştirilen TB sezgiselinin sözde kodu

```

If (x > olasılık2) then
    S mevcut çözümüne ait 2. hareket mekanizmasına göre komşu
    çözümü (S') üret;
    Weighted sum (F') hesapla;
    Weighted fonksiyonuna göre değişimi hesapla ( $\Delta = f(F') - f(F\_best)$ )
    If ( $\Delta < 0$ ) then olasılık2 sayısını 0,5 azalt.
End If
If ( $\Delta < 0$ ) then
    For (her Y  $\in$  Pareto_List)
        If S' > Y then
            F_best = F(S')
            X_best = S'
            S  $\leftarrow$  S'
            Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List - {Y} (bastırdıkları sil)
            Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List  $\cup$  {S'}
        End If
        If S' < Y then
            F_best = F(S')
            X_best = S'
            S  $\leftarrow$  S'
        End If
    End For
End If
If ( $\Delta > 0$ ) then
    For (her Y  $\in$  Pareto_List)
        If S' > Y then
            (0,1) arasında bir rassal u sayısını üret;
            If (ras[0,1] < exp(- $\Delta / T$ )) then
                S  $\leftarrow$  S';
                Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List - {Y}
                (bastırdıkları sil)
                Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List  $\cup$  {S'}
            End If
            Else
                Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List - {Y}
                (bastırdıkları sil)
                Pareto_List  $\leftarrow$  Pareto_List  $\cup$  {S'}
            End If
        End If
    End For
End If

```

Şekil 4. 6. devam ediyor

```

If S' < Y then
    (0,1) arasında bir rassal u sayısı üret;
    If (ras[0,1] < exp (-Δ/ T)) then
        S ← S';
    End If
End If
End For
End If
    iter = iter + 1;
End For
    Ti+1 = Ti * α;
End For
    Pareto_List yaz.
END

```

Şekil 4. 6. devam ediyor

Algoritmada, bulunan yeni çözümün önceki çözüm ile karşılaştırılmasında aşağıdaki durumlar gerçekleşir.

➤ Eğer yeni çözümün uygunluk değeri, eski çözümden daha iyi ve Pareto optimal kümesindeki hiçbir çözüm tarafından basılmıyorsa, yeni çözüm kabul edilir ve Pareto optimal kümesine dahil edilip kümedeki bu çözüm tarafından basılan çözümler kümeden kaldırmaktadır.

➤ Eğer yeni çözümün uygunluk değeri, eski çözümden daha iyi ise yeni çözüm olarak kabul edilir fakat Pareto optimal kümesindeki çözümler tarafından basılıyorsa, Pareto optimal kümesine dahil edilmez.

➤ Yeni çözümün uygunluk değeri, Pareto optimal kümesindeki hiçbir çözüm tarafından basılmıyorsa, Pareto optimal kümesine dahil edilip basılan çözümler kümeden kaldırmaktadır fakat yeni çözümün uygunluk değeri eski çözüme göre daha kötüyse Eşitlik 4.25'i kullanılarak bir olasılık hesabı yapılır ve hesaplanan olasılık rasgele üretilen sayıdan küçük ise kabul edilir, büyük ise reddedilir.

➤ Yeni çözümün uygunluk değeri eski çözüme göre daha kötü ve Pareto optimal kümesindeki çözümler tarafından basılıyorsa, hem Pareto optimal kümesine dahil edilmez hem de Eşitlik 4.26’i kullanılarak bir olasılık hesabı yapılarak olasılık değeri rasgele üretilen sayıdan küçük ise kabul edilir, büyük ise reddedilir.

$$rastgele_{sayi}[0,1] < \exp\left(\frac{-\Delta}{T}\right) \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.25’teki Δ , yeni çözümün değeri ile en iyi çözümün değerinin farkını ve T , o andaki sıcaklık değerini ifade etmektedir.

4.2.5. TB’de Parametrelerin En iyi Değerlerinin Belirlenmesi

Herhangi bir problemin çözümünde TB algoritmasının kullanılması için bazı parametrelerin en iyi değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler, başlangıç sıcaklığı, her sıcaklıktaki iterasyon uzunluğu, minimum sıcaklık ve soğutma katsayısından oluşmaktadır.

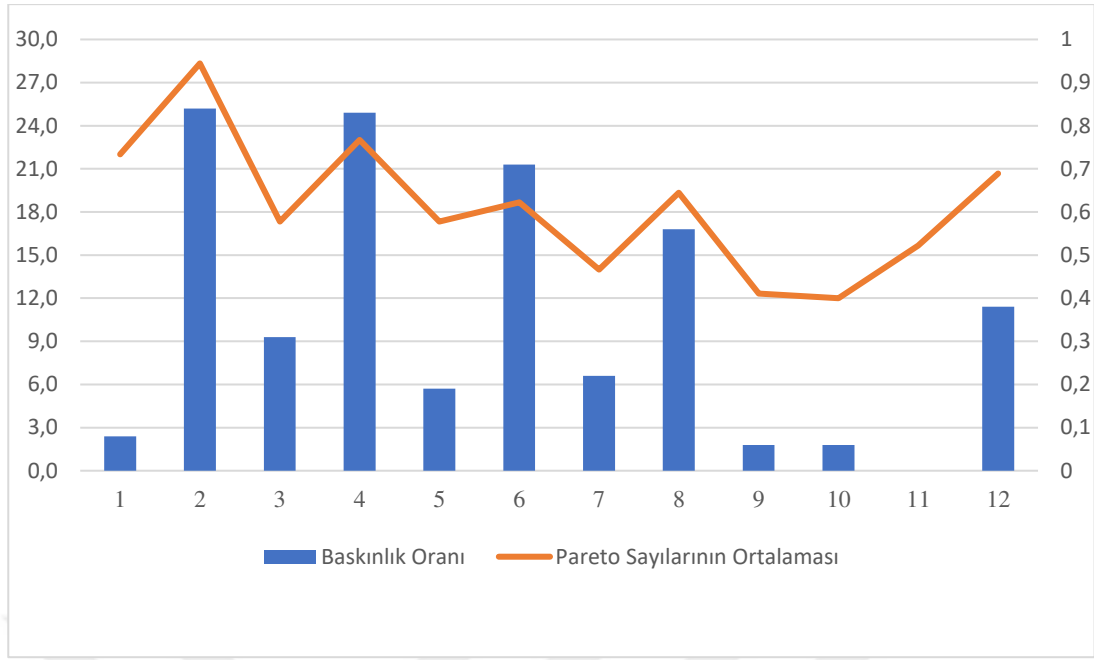
Sezgiselin en iyi sonucu veren parametrelerinin değerlerini belirlemek için literatür araştırmasından faydalanılmıştır. Önceki yapılan çalışmaların çoğunda, her sıcaklıktaki iterasyon uzunluğunu belirlemek için periyot*operatör sayısını hesaplamasından çıkan sonucu dikkate aldıklarını belirtmişlerdir. Bu nedenden dolayı bu çalışmada iterasyon uzunluğunun değerini, periyot ile operatör çarpımından elde edilen değere karar verilmiştir. Sezgiselin boyutu büyüdükçe iterasyon uzunluğu da büyüyecektir.

Başlangıç sıcaklığı, minimum sıcaklığı ve soğutma katsayısı parametrelerin değerleri, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir. Literatürdeki veriler kullanılarak başlangıç sıcaklığı için 2000, 100 ve 2 parametreleri, minimum sıcaklık için 1 ve 0,001 parametreleri ve soğutma katsayısı için 0,90 ve 0,99 parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerle 12 adet kombinasyon oluşturulmuştur. Geliştirilen TB algoritmasında, doğru bir karar verebilmek için operatör sayısını sabit tutup oluşturulan kombinasyonlarla 5 kere çalıştırılmıştır. Her kombinasyonu, 5 kere çalıştırdığımızdaki çıkan sonuçlarının Pareto-optimal çözümleri dikkate alınarak diğer denemelerle baskınlık oranları ve Pareto sonuçların ortalama sayısı karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2.’de literatürde belirlenen parametrelerin kombinasyonlarının sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Baskınlık oranları ve Pareto sonuçlarının ortalama sayısını gösteren grafik Şekil 4.7.’de verilmiştir. Baskınlık oranı, algoritmanın Pareto çözüm kümesi ile yapılan tüm denemelerdeki Pareto çözümlerinin kıyaslanmasıyla

elde edilen orandır. Baskınlık oranının yüksek bir değer olması beklenilir. Çünkü baskınlık oranı ne kadar yüksekse, algoritmanın Pareto çözümleri diğer çözümlere daha baskındır. Ayrıca çeşitliliğin fazla olmasının istenmesi nedeniyle Pareto çözüm sayılarının ortalaması da yüksek değer çıkması beklenir. Bu sonuçlara göre baskınlık oranının en büyük değeri 0,84'e ve Pareto çözüm sayılarının ortalamasının en büyük değeri 28,3'e sahip olması nedeniyle başlangıç sıcaklığı 2000, soğutma katsayısı 0,99 ve minimum sıcaklık 1 olan parametre seti seçilmiştir. Tavlama benzetimi bu veriler doğrultusunda çalıştırılmasına karar verilmiştir.

Tablo 4. 2. Parametre belirlemek için yapılan denemelerin sonuçları

Başlangıç Sıcaklık	Minimum Sıcaklık	İterasyon Uzunluğu	Soğutma Katsayısı	Baskınlık oranı	Pareto Çözüm Sayılarının Ortalaması
2000	1	32	0,90	0,08	22,0
2000	1	32	0,99	0,84	28,3
2000	0,001	32	0,90	0,31	17,3
2000	0,001	32	0,99	0,84	23,0
100	1	32	0,90	0,19	17,3
100	1	32	0,99	0,71	18,7
100	0,001	32	0,90	0,22	14,0
100	0,001	32	0,99	0,56	19,3
2	1	32	0,90	0,06	12,3
2	1	32	0,99	0,06	12,0
2	0,001	32	0,90	0	15,7
2	0,001	32	0,99	0,38	20,7



Şekil 4. 7. Parametre belirlemek için yapılan deneylerin grafik gösterimi

4.3. Bulgular ve Performans Ölçütleri ile Karşılaştırma

İş Rotasyonu Çizelgeleme problemi için geliştirilen çok amaçlı matematiksel model ve tavlama benzetim sezgiseli sonuçları belirlenen performans ölçütleri ışığında bu bölümde sunulmaktadır.

Çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde CPLEX Interactive Optimizer 20.1.0.0 programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Modelin büyük boyutlu olması ve kısa sürelerde çözümlerinin elde edilememesi nedeni ile sadece 1. istasyon için (8 operatör) çözümler elde edilmiştir. Normalize edilmiş amaç fonksiyonu ile matematiksel model ve TB sezgiseli, toplamaları bir olacak şekilde farklı ağırlıklar belirlenerek 21 problem çalıştırılmıştır. Çalıştırılan problemlerden örnek olması amacıyla birinci problemin karar değişkenlerin değerleri Tablo 4.3.'te sunulmuştur. Matematiksel model ve sezgisel yöntem sonuçları incelendiğinde, 1. amaç ve 2. amaç fonksiyonlarının ağırlık katsayılarının yüksek olması nedeniyle operatörlerin yetenekleri göz önünde bulundurularak 1. amaç fonksiyonuna göre operatörlere atanan işlerin işlem süreleri ve 2. amaç fonksiyonuna göre iş yükü puanlarının dengelenmesi yapılmıştır. Fakat birinci problemdeki 3. amaç fonksiyonunun ağırlık katsayısı düşük olmasından dolayı operatörleri bazıları, tercih ettikleri işlere atanmışlardır.

Hesaplanan REBA değerlerine göre örneğin 1. ve 7. işler yüksek riskli çıkmıştır. Yüksek riskli oldukları için 1. ve 7. işler arka arkaya periyotlarda yapılamaz. Tablo 4.3.'e göre, matematiksel model 1. işçiye 1. periyotta düşük risk atanmışken 2. periyotta yüksek risk, 3. periyotta düşük risk ve 4. periyotta yüksek risk atamıştır. Aynı şekilde TB'de, 1. işçiye 1. periyotta yüksek risk atanmışken 2. periyotta düşük risk, 3. periyotta yüksek risk ve 4. periyotta düşük risk atamıştır.

Tablo 4. 3. Geliştirilen matematiksel modelin ve TB sezgiselinin ilk problemin karar değişkenlerin değerleri

İŞÇİ	Matematiksel Model				Tavlama Benzetimi			
	İş Rotasyon Periyotları				İş Rotasyon Periyotları			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	2	7	6	1	1	2	7	6
2	4	5	3	8	5	3	8	4
3	1	2	7	6	7	5	4	5
4	5	3	8	4	6	7	2	1
5	7	6	1	2	3	8	3	8
6	6	1	2	7	2	1	6	7
7	8	4	5	3	8	4	5	3
8	3	8	4	5	4	6	1	2

1. istasyonun amaç fonksiyonlarının sonuçları da Tablo 4.4.'te sunulmuştur. Tablo 4.4'te, birinci, ikinci ve üçüncü sütunlarda ağırlık değerleri ve sonraki sütunlarda matematiksel modelden ve TB sezgiselinden elde edilen amaç fonksiyonun değerleri yer almaktadır. Tablo 4.4. incelendiğinde, $w_1=0$, $w_2=1$, $w_3=0$ ağırlık değerleri ile tavlama benzetimi çalıştırıldığında tek bir amaç fonksiyonunu dikkate alındığı için Tavlama Benzetimi, matematiksel modelin bulduğu optimal sonucu bulmuştur. Aynı şekilde $w_1=1$, $w_2=0$, $w_3=0$ ağırlık değerleri ile tavlama benzetimi çalıştırıldığında tek bir amaç fonksiyonunu dikkate alındığı için Tavlama Benzetimi, matematiksel modelin bulduğu optimal sonucu bulmuştur. Bu.nunla beraber Tavlama Benzetimi, 21 problemin 2 probleminde aynı amaç fonksiyonun değerini, farklı 2 probleminde matematiksel modelden daha iyi sonuçlar ve diğerlerinde ise matematiksel modele yakın sonuçlar bulmuştur

Tablo 4. 4. Birinci istasyon için geliştirilen matematiksel modelin ve TB sezgiselinin amaç fonksiyonlarının sonuçları

			Matematiksel Model				Tavlama Benzetimi			
w_1	w_2	w_3	f_1	f_2	f_3	Min F	f_1	f_2	f_3	Min F
0,4	0,4	0,2	1	150	19	0,064	1	146	13	0,137
0,2	0,8	0,0	1	150	16	0,000	9	148	12	0,064
0,0	1,0	0,0	76	150	12	0,000	3	150	14	0,000
0,2	0,6	0,2	5	150	23	0,071	1	146	15	0,137
0,2	0,4	0,4	5	150	23	0,155	4	148	18	0,170
0,6	0,0	0,4	5	126	23	0,130	5	94	21	0,158
0,6	0,2	0,2	1	150	19	0,023	4	144	21	0,111
0,4	0,0	0,6	5	122	23	0,153	7	132	22	0,180
0,0	0,2	0,8	78	142	26	0,034	84	142	25	0,115
0,8	0,2	0,0	1	150	14	0,000	1	134	15	0,059
0,2	0,0	0,8	13	114	25	0,123	8	134	23	0,173
0,0	0,8	0,2	96	150	24	0,029	42	150	21	0,050
0,8	0,0	0,2	1	142	19	0,067	1	118	14	0,100
0,0	0,0	1,0	80	114	28	0,000	87	104	26	0,071
0,4	0,2	0,4	5	150	23	0,070	11	142	23	0,186
0,6	0,4	0,0	1	150	19	0,000	1	136	15	0,104
0,0	0,4	0,6	54	150	24	0,157	11	146	25	0,094
1,0	0,0	0,0	1	132	15	0,000	1	116	13	0,000
0,2	0,2	0,6	5	150	23	0,088	6	142	22	0,179
0,4	0,6	0,0	1	150	16	0,000	4	150	17	0,026
0,0	0,6	0,4	47	150	24	0,081	30	150	24	0,057

Büyük boyutlu problemler için istasyonlarda yer alan görev sayıları dikkate alınarak tavlama benzetimi ile çözümler elde edilmiştir. Problem 4 farklı boyutta ele alınmıştır ve boyut 1 için ilk 5 istasyonda çalışan operatörlerin sayısı (39 operatör), boyut 2 için ilk 10 istasyonda çalışan operatörlerin sayısı (67 operatör), boyut 3 için ilk 20 istasyonda çalışan operatörlerin sayısı (113 operatör), boyut 4 için mekanik montaj hattındaki tüm istasyonlarda çalışan operatörlerin sayısı (157 operatör) belirlenmiştir.

Her boyuttaki problem için üç farklı TB'nin varyantı ile çözümler elde edilmiştir. Tavlama Benzetimi birinci varyantı (TBS-1)'de başlangıç çözümünün rasgele atamalarla elde edildiği ve amaç fonksiyonunun normalize edilmiş ağırlıklı toplam yöntemi ile elde edildiği sezgisel yaklaşımdır. Burada her amaca eşit ağırlık verilmiştir. Tavlama Benzetimi ikinci varyantı (TBS-2) başlangıç çözümü matematiksel model tabanlı elde edilmiştir. Matematiksel modelin belirli bir süre çalıştırılması sonucunda elde edilen uygun bir çözüm başlangıç çözümü olarak alınmış ve amaç fonksiyonu normalize edilmiş ağırlıklı toplam yöntemi ile elde edilmiştir. Tavlama Benzetimi üçüncü varyantı (TBS-3) ise başlangıç çözümü rasgele atamalarla elde edilmiş ancak amaç fonksiyonu olarak her sıcaklık değişiminde 3 amaç fonksiyonu içerisinde rasgele seçilen amaç dikkate alınmıştır. İterasyon boyunca sadece belirlenen amaca göre seçim yapılmıştır.

Bu çalışmada 4 farklı boyut ve 3 varyant olmak üzere toplam 12 senaryo yapılmıştır. Yapılan senaryoların sonuçları EK-3'te verilmektedir. Senaryoların çözüm sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile üç farklı performans ölçütü kullanılmıştır. Bunlar; dağılım metriği, Pareto çözümlerin çeşitliliği ve Pareto-optimal çözümlerin ortalama oranıdır. Performans ölçütünü, çok amaçlı bir optimizasyon yöntemiyle elde edilen Pareto çözüm kümesinin kalitesini ölçmek veya farklı çok amaçlı optimizasyon yöntemleri tarafından Pareto çözüm kümelerinin kalitesini karşılaştırmak için kullanılır [80].

- Dağılım metriği, çözüm uzayında Pareto çözümlerinin düzgün bir dağılımını göstermektedir. Bu performans ölçütü, Eşitlik 4.28'teki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.27 ile hesaplanan d_i , çözüm uzayında iki marjinal Pareto çözümler arasındaki Öklid mesafesini, $\bar{d}$, bulunan d_e 'lerin ortalama mesafeyi, n ise Pareto çözümlerin sayısını temsil eder. SM değeri ne kadar küçükse, algoritma o kadar iyi performans göstermektedir [81].

$$d_e = \sqrt{(f_{3,e+1} - f_{3,e})^2 + (f_{2,e+1} - f_{2,e})^2 + (f_{1,e+1} - f_{1,e})^2} \quad (4.27)$$

$$SM = \frac{\sum_{e=1}^{n-1} |\bar{d} - d_e|}{(n - 1) * \bar{d}} \quad (4.28)$$

- Pareto çözümlerin çeşitliliği (NPF), algoritmada elde edilen Pareto çözümlerin düzgün olup olmama durumunu incelemek için kullanılır. Pareto çözümlerin çeşitliliği ne kadar düşükse, benzerlik o kadar büyük olacak ve bu nedenle çözüm yönteminin daha fazla istenilmesini sağlayacaktır. Bu performans ölçütü, Eşitlik 4.30'daki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.29 ile hesaplanan s_e , her Pareto çözümün diğer çözümler arasındaki minimum mesafeyi, $\bar{s}$, bulunan s_e 'lerin ortalamasını, n ise Pareto çözümlerin sayısını temsil eder [82].

$$s_e = \min_{k \in Q \cap k \neq 1} \sqrt{\sum_{m=1}^3 (f_m^e - f_m^k)} \quad (4.29)$$

$$NPF = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{s_e}{\bar{s}} - 1 \right)^2}{n - 1}} \quad (4.30)$$

- Pareto-optimal çözümlerin ortalama oranı (R_{POS}), her problem modelinden çıkan Pareto çözümlerinin, birleştirilmiş tüm problemlerin Pareto çözümlerine göre baskın olmama oranını vermektedir. R_{POS} oranının formülasyonu Eşitlik 4.31'deki gibi hesaplanmaktadır. R_{POS} oranı ne kadar yüksekse, çözüm seti de o kadar iyidir.

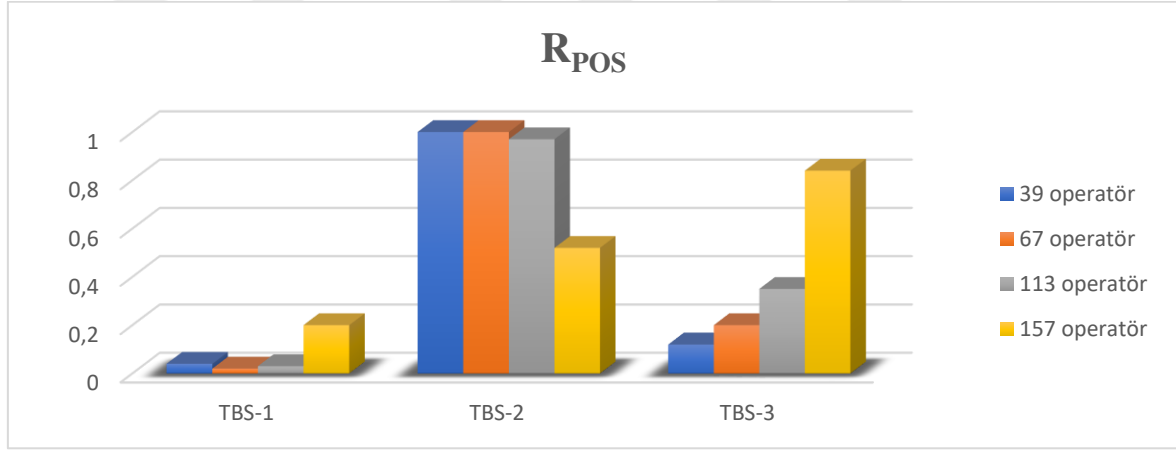
$$R_{POS}(P_i) = \frac{|P_e - \{X \in P_i | \exists Y \in P: Y < X\}|}{|P_e|} \quad (4.31)$$

P_e , e. problemde elde edilen Pareto-optimal çözüm kümesidir. P , yalnızca baskın olmayan çözümleri içerecek şekilde tüm P_e çözümlerin Pareto-optimal çözüm kümelerinin birleştiren kümedir ($P = P_1 \cup P_2 \cup P_3$). $Y < X$, X çözümünün Y çözümüne baskın olduğu anlamına gelmektedir. P içindeki Y çözümlerinin baskın olduğu X çözümleri, P_e çözüm kümesinden çıkarılır [83].

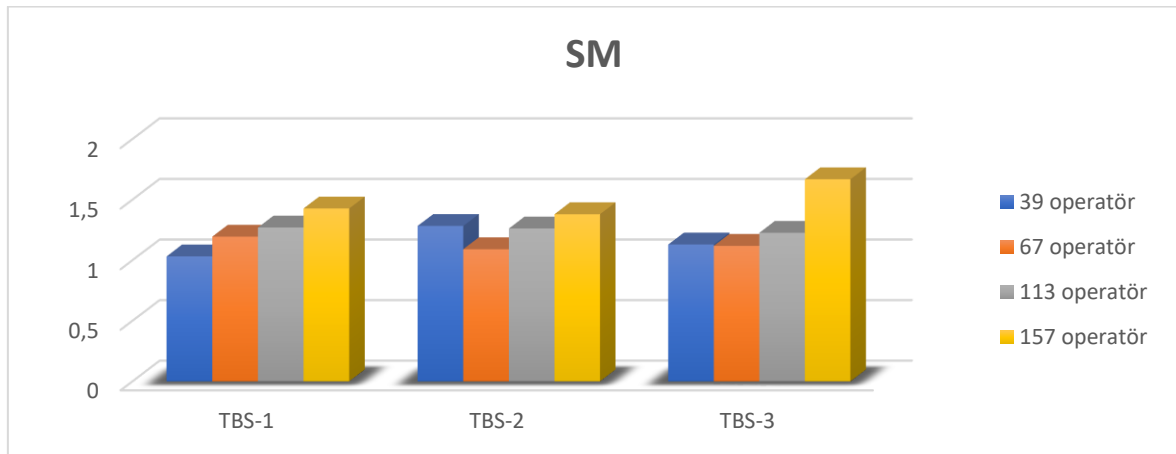
Tablo 4.5.'de TB varyantlarının Performans ölçütlerine göre değerleri sunulmaktadır. Ayrıca, her bir metriğin sonuçlarını daha iyi görebilmek adına grafik yöntemi kullanılmıştır. R_{POS} grafiği Şekil 4.8.'de, SM grafiği Şekil 4.9.'da ve NPF grafiği Şekil 4.10.'da sunulmaktadır.

Tablo 4. 5. TB varyantlarının performans ölçütlerine göre sonuçları

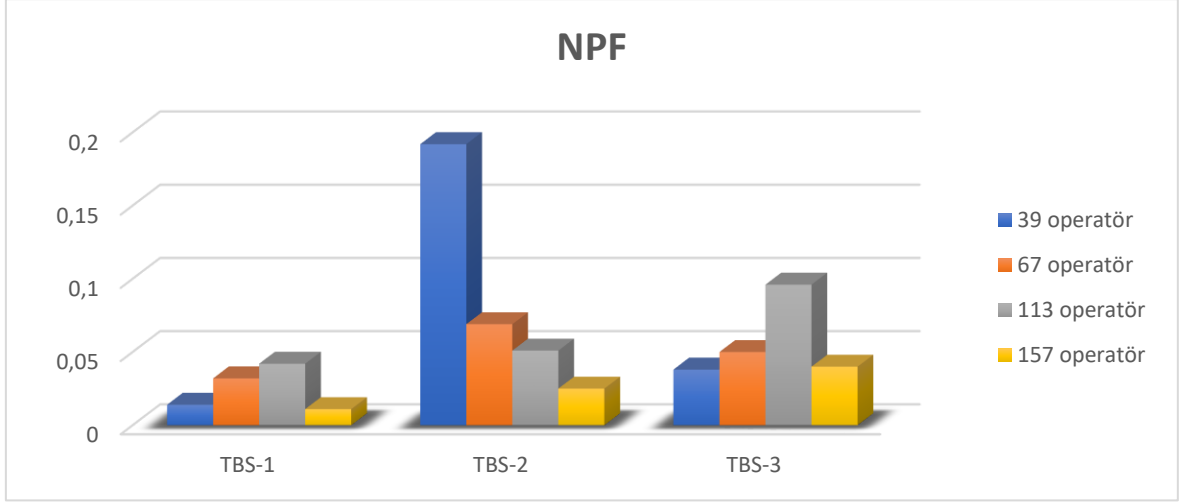
	Operatör Sayısı	R _{POS}	SM	NPF
TBS-1	39	0,04	1,032	0,014
TBS-2	39	1,00	1,283	0,192
TBS-3	39	0,12	1,13	0,038
TBS-1	67	0,02	1,1946	0,032
TBS-2	67	1,00	1,0912	0,069
TBS-3	67	0,20	1,1188	0,05
TBS-1	113	0,03	1,2701	0,042
TBS-2	113	0,97	1,2622	0,051
TBS-3	113	0,35	1,2266	0,096
TBS-1	157	0,20	1,4271	0,011
TBS-2	157	0,52	1,3799	0,025
TBS-3	157	0,84	1,6684	0,04



Şekil 4. 8. R_{POS} performans ölçütünün grafik gösterimi



Şekil 4. 9. SM performans ölçütünün grafik gösterimi



Şekil 4. 10. NPF performans ölçütünün grafik gösterimi

R_{POS} performans ölçütünün grafiğinden yola çıkarak TB'nin ikinci varyantının performansı diğer diğer varyantlara göre daha iyidir. Sadece dördüncü boyut için ikinci varyantının sonucu üçüncü varyantına göre oranı düşüktür. Bu sonuçlara göre, matematiksel modelden elde edilen başlangıç çözümü, rasgele atamalarla bulunan başlangıç çözümüne göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak varyantların boyutları arttıkça bunun bir önemi olmamaktadır.

SM, çözümlerin ne kadar homojen bir şekilde bir araya getirildiğini göstermektedir. SM oranı ne kadar düşükse, çözümler o kadar iyidir. Şekil 4.8.'e bakıldığında SM performans ölçütünün oranları, her bir TB'nin varyantlarının değeri düşük çıkmıştır ve varyantların iyi performans verdiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı Pareto çözümlerinin düzgün bir dağılımda olduğu sonucuna varılmaktadır.

NPF, ne kadar düşükse benzerlik o kadar büyük olacaktır ve bu nedenle çözüm yönteminin istenilmesi gereken performans sergilediğini göstermektedir. Sonuçları kontrol ederken, NPF performans kriterinin değeri 0,2'den düşük olduğu için TB'NİN tüm varyantları iyi performans göstermişlerdir. TB'nin varyantlarına ayrı ayrı incelendiğinde birinci varyant diğer varyantlara göre daha iyi sonuç vermiştir. Varyantların farklı boyutlardaki sonuçlarına bakıldığında dördüncü boyut TB'nin tüm varyantlarında en iyi performansı sağlamıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında çalışanların tercihlerini ve yeteneklerini dikkate alan çok amaçlı ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme modeli önerilmiştir. Ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme yönteminin kullanılmasındaki temel amaç operatörlerin günün farklı zamanlarında ölçülen işlem süreleri arasında farklılıkların gözlemlenmesidir. Periyotlardaki işlem süreleri arasındaki farklılıklar, işlerin zorluk derecelerinin ve işlerin sürelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu farklılıklar nedeniyle operatörlerde motivasyonlarının azalması ve yorulmalar gerçekleşmektedir. Tüm bu nedenlerden ötürü işçilerin motivasyonlarını artırmak ve dinlenmelerini sağlamak için operatörlerin farklı periyotlarda farklı işlere atanmaları sağlanabilir. Böylelikle periyotlar arasındaki süre farklılıkları da azaltılabilir. Bunu da iş rotasyonu çizelgeleme yöntemi ile sağlayabiliriz. Tez kapsamında önerilen ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme modelinde, aynı vücut bölgesinin art arda kullanımından kaynaklı operatörlerin iş yüklerini azaltarak iskelet kas rahatsızlıklarının önlenmesi ve gün boyunca yapılacak işlerin içeriğini çeşitlendirilmesi amaçlanmıştır. Modelin uygulaması otomotiv bir firmasında gerçekleştirilmiş ve otomotiv mekanik montaj hattındaki işlerin iş yükleri REBA ile değerlendirilmiştir. Önerilen model ile operatörlerin riske maruz kalma süresinin, yoğunluğunun ve sıklığının azaltılarak üretken ortamda çalışanların refahının desteklenmesi ve çalışanların isteklerinin göz önünde bulundurularak motivasyonlarının artırılması hedeflenmektedir.

Önerilen modelin büyük boyutlu olması nedeniyle, çok amaçlı bir TB sezgiseli tasarlanmıştır. Matematiksel model ve sezgisel yöntem sonuçları incelendiğinde, ergonomik riskleri, çalışanların yeteneklerini ve tercihlerini göz önünde bulundurarak iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir ve iş yükü puanlarının operatörler arasında dengelendiği gösterilmiştir. Sezgisel yöntemin başarısını ölçmek için farklı varyantlar, farklı boyutlarla denemeler yapılmış ve üç performans ölçütü için sonuçlar karşılaştırılmıştır. TB varyantları karşılaştırıldığında R_{POS} performans ölçütüne göre ilk üç boyutta TB'nin 2 varyantı iyi sonuç vermiştir ama 4. Boyutta ise TB'nin 1 varyantı diğer varyantlara göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. SM performans ölçütünde TB'nin tüm varyantları için iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. NPF performans ölçütünde TB'nin 1. varyantı tüm boyutlarda diğer varyantlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Böylelikle TB sezgiseli, daha kısa zamanda büyük boyutlu çözümler yaparak problemlere en iyi yanıtlarının verebildiği söylenebilir.

Önerilen iş rotasyonu çizelgeleme, çeşitli üretim sistemlerine uygulanabilir. Benzer görevlere sahip montaj hatlarında, iş rotasyonu çizelgeleme zorlukları olan uygulayıcılar için özellikle yararlı olacaktır.

Montaj hattındaki ergonomik risklerin oluşma nedenleri farklıdır. Otomotiv firmasında çalışanlar tüm vücut ekstremelerini kullandıkları için bu çalışmada REBA yöntemi kullanılmıştır. Ancak bazı montaj hatlarında ergonomik bakımdan farklı risklere maruz kalılabilmektedir. Bu alandaki gelecekteki çalışmalar, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden diğer metodolojiler veya çevresel faktörler modellere entegre edilebilir. Yanı sıra, ergonomik risk değerlendirme metodolojileri birleştirilerek bileşke skoru yapılabilir ve bileşke skoru ile iş yükleri dengelenebilir. Buna ek olarak, gelecekteki çalışmalarda iş rotasyonu çizelgeleme problemi için farklı sezgisel yöntemleri dikkate alınabilir.



KAYNAKLAR

- [1] A. O. Oparanma, L. I. Nwaeke, and C. Zhan-Ming, "Impact of Job Rotation on Organizational Performance," *Journal of Economics, Management and Trade*, vol. 7, no. 3, pp. 183–187, Mar. 2015, doi: 10.9734/BJEMT/2015/12051.
- [2] M. Bakhshi, S. E. Hashemi, and H. Dezhdar, "Applying Mathematical Modeling to Create Job Rotation for Improve Workforce Performance in Semi-Automatic Systems," *International Journal of Research in Industrial Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 318–327, Aug. 2020, doi: 10.22105/riej.2020.243223.1140.
- [3] S. E. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 850–855, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.445.
- [4] U. Hinnen, T. Laubli, U. Guggenbuhl, and H. Krueger, "Design of check-out systems including laser scanners for sitting work posture," *Scandinavian journal of work, environment & health*, vol. 18, no. 3, pp. 186–194, Jun. 1992, doi: 10.5271/SJWEH.1589.
- [5] S. Copsey, "OSH in figures: Work-related musculoskeletal disorders in the EU — Facts and figures," Luxembourg, 2010. [Online]. Available: <http://bookshop.europa.eu>
- [6] S. Pullopdisakul, C. Ekpanyaskul, S. Taptagaporn, A. Bundhukul, and A. Thepchatri, "Upper extremities musculoskeletal disorders: Prevalence and associated ergonomic factors in an electronic assembly factory," *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, vol. 26, no. 5, Jun. 2013, doi: 10.2478/s13382-013-0150-y.
- [7] S. Bao, J. Winkel, and H. Shahnavaaz, "Prevalence of musculoskeletal disorders at workplaces in the people's republic of china," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 6, no. 4, Jan. 2000, doi: 10.1080/10803548.2000.11076472.

- [8] E. Özel and O. Çetik, "Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği," *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 22, pp. 41–56, Apr. 2010.
- [9] E. Atasoy Mert, "Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bir Çanta İmalat Atölyesinde Uygulanması," İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, 2014.
- [10] D. Roman-Liu, "Comparison of concepts in easy-to-use methods for MSD risk assessment," *Applied Ergonomics*, vol. 45, no. 3, pp. 420–427, May 2014, doi: 10.1016/j.apergo.2013.05.010.
- [11] T. R. Waters, V. Putz-Anderson, A. Garg, and L. J. Fine, "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks," *Ergonomics*, vol. 36, no. 7, pp. 749–776, May 1993, doi: 10.1080/00140139308967940.
- [12] D. H. Liles, S. Deivanayagam, M. M. Ayoub, and P. Mahajan, "A job severity index for the evaluation and control of lifting injury," *Human Factors*, vol. 26, no. 6, pp. 683–693, Dec. 1984, doi: 10.1177/001872088402600608.
- [13] S. Hignett and L. McAtamney, "Rapid Entire Body Assessment (REBA)," *Applied Ergonomics*, vol. 31, no. 2, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0003-6870(99)00039-3.
- [14] R. Burgess Limeric, "Issues associated with force and weight limits and associated threshold limit values in the physical handling work environment," Feb. 2003. [Online]. Available: <http://ergonomics.uq.edu.au/download/threshold.pdf>
- [15] E. Occhipinti, "OCRA: A concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs," *Ergonomics*, vol. 41, no. 9, Nov. 1998, doi: 10.1080/001401398186315.
- [16] L. McAtamney and E. Nigel Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders," *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, Feb. 1993, doi: 10.1016/0003-6870(93)90080-S.

- [17] Osha, "Occupational Noise Exposure: Hearing Conservation Amendment. In 29 Code of Federal Regulations, US Government Printing Office," Washington, Sep. 1993. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/noise>
- [18] D. al Madani and A. Dababneh, "Rapid entire body assessment: A literature review," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 107–118, Feb. 2016, doi: 10.3844/AJEASSP.2016.107.118.
- [19] Y. Yener, G. F. Cab, and P. Toktaş, "Fiziksel Zorlanma Ve Algılanan İş Yüğü Düzeylerini Dikkate Alan İş Rotasyonu Önerisi," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 27, no. 1, pp. 9–20, Apr. 2019, doi: 10.31796/OGUMMF.498317.
- [20] N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas, and H. Hendrick, *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*. London: CRC Press, 2005.
- [21] R. T. Marler and J. S. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369–395, Apr. 2004, doi: 10.1007/S00158-003-0368-6.
- [22] F. Altıparmak, M. Gen, L. Lin, and T. Paksoy, "A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 196–215, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.cie.2006.07.011.
- [23] S. Kaya and N. Fiğlali, "Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinde Pareto Optimal Kullanımı," *Social Sciences Research Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 9–18, Jun. 2016.
- [24] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, and D. A. van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. USA: Springer US, 2007.
- [25] K. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, vol. 12. Boston, MA: Springer US, 1998. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-5563-6>
- [26] O. Grodzevich and O. Romanko, "Normalization and Other Topics in Multi Objective Optimization," in *Proceedings of the Fields–MITACS Industrial Problems Workshop*, Feb. 2006, pp. 89–101.

- [27] S. Kovalev, I. Chalamon, and S. E. Collignon, “Minimizing maximum job dependent ergonomic risk,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 1, pp. 95–101, Nov. 2019, doi: 10.1080/00207543.2019.1694720.
- [28] A. Otto and A. Scholl, “Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling,” *OR Spectrum*, vol. 35, no. 3, pp. 711–733, Apr. 2013, doi: 10.1007/s00291-012-0291-6.
- [29] T. Stützle and M. Dorigo, “ACO Algorithms for the Traveling Salesman Problem christopher jide”.
- [30] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, “Equation of state calculations by fast computing machines,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 21, no. 6, pp. 1087–1092, Mar. 1953, doi: 10.1063/1.1699114.
- [31] V. J. Rayward-Smith, I. H. Osman, C. R. Reeves, and G. D. Smith, *Modern Heuristic Search Methods*. UK, 1996. Accessed: Nov. 24, 2021. [Online]. Available: <https://tr1lib.org/book/920637/ea7c16>
- [32] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [33] G. Michalos, S. Makris, L. Rentzos, and G. Chrysosolouris, “Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 153–160, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.cirpj.2010.03.009.
- [34] S. R. Saravani and B. Abbasi, “Investigating the influence of job rotation on performance by considering skill variation and job satisfaction of bank employees,” *Tehnički vjesnik*, vol. 20, no. 3, pp. 473–478, Jan. 2013.
- [35] G. Michalos, S. Makris, and D. Mourtzis, “A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 453–456, 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.037.

- [36] N. Azizi, S. Zolfaghari, and M. Liang, "Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations," *International Journal of Production Economics*, vol. 123, no. 1, pp. 69–85, 2010, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.07.010.
- [37] M. Freiboth, E. Frieling, D. Henniges, and C. Saager, "Comparison of different organisations of assembly work in the European automotive industry," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 20, no. 5, pp. 357–370, Nov. 1997, doi: 10.1016/S0169-8141(96)00088-1.
- [38] S. H. Huang and Y. C. Pan, "Ergonomic job rotation strategy based on an automated RGB-D anthropometric measuring system," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 4, 2014, doi: 10.1016/j.jmsy.2014.02.005.
- [39] M. J. Anzanello and F. S. Fogliatto, "Learning curve models and applications: Literature review and research directions," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, no. 5, May 2011, doi: 10.1016/j.ergon.2011.05.001.
- [40] J. Weichel, S. Stanic, J. A. Enriquez Diaz, and E. Frieling, "Job rotation – Implications for old and impaired assembly line workers," *Occupational Ergonomics*, vol. 9, no. 2, pp. 67–74, Jan. 2010, doi: 10.3233/OER-2010-0172.
- [41] G. Michalos, S. Makris, and G. Chrysosolouris, "The effect of job rotation during assembly on the quality of final product," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 187–197, May 2013, doi: 10.1016/j.cirpj.2013.03.001.
- [42] A. Otto and O. Battaia, "Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 111, pp. 467–480, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CIE.2017.04.011.
- [43] B. G. Jonsson, J. Persson, and Å. Kilbom, "Disorders of the cervicobrachial region among female workers in the electronics industry: A two-year follow up," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, Nov. 1988, doi: 10.1016/0169-8141(88)90002-9.

- [44] B. J. Carnahan, M. S. Redfern, and B. Norman, "Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search," *Ergonomics*, vol. 43, no. 4, pp. 543–560, Nov. 2000, doi: 10.1080/001401300184404.
- [45] D. D. Triggs and P. M. King, "Job rotation," *Professional Safety*, vol. 45, no. 2, pp. 32–34, Feb. 2000.
- [46] T. Möller, S. E. Mathiassen, H. Franzon, and S. Kihlberg, "Job enlargement and mechanical exposure variability in cyclic assembly work," *Ergonomics*, vol. 47, no. 1, pp. 19–40, Jan. 2004, doi: 10.1080/0014013032000121651.
- [47] L. M. Horton, M. A. Nussbaum, and M. J. Agnew, "Effects of rotation frequency and task order on localised muscle fatigue and performance during repetitive static shoulder exertions," *Ergonomics*, vol. 55, no. 10, pp. 1205–1217, Oct. 2012, doi: 10.1080/00140139.2012.704406.
- [48] S. Schneider and P. Vi, "Ergonomics: Promoting early return to pre-injury job using a rebar-tying machine," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 2, no. 5, May 2005, doi: 10.1080/15459620590932190.
- [49] R. Filus and M. L. Okimorto, "The effect of job rotation intervals on muscle fatigue – lactic acid," *Work*, vol. 15, no. 12, pp. 1572–1581, Jan. 2012, doi: 10.3233/WOR-2012-0355-1572.
- [50] J. P. Leider, G. H. Shah, B. C. Castrucci, C. J. Leep, K. Sellers, and J. B. Sprague, "Changes in Public Health Workforce Composition: Proportion of Part-Time Workforce and Its Correlates, 2008–2013," *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 47, no. 5, pp. 331–336, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.AMEPRE.2014.07.017.
- [51] Z. Xu, J. Ko, D. J. Cochran, and M. C. Jung, "Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 431–441, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.CIE.2011.10.008.

- [52] S. Y. Yoon, J. Ko, and M. C. Jung, "A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines," *Applied Ergonomics*, vol. 55, no. 1, pp. 8–15, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.apergo.2016.01.011.
- [53] G. Mossa, F. Boenzi, S. Digiesi, G. Mummolo, and V. A. Romano, "Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model," *International Journal of Production Economics*, vol. 171, no. 1, pp. 471–477, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.017.
- [54] S. E. Moussavi, M. Zare, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 71, no. 3, pp. 136–144, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.03.003.
- [55] L. Botti, M. Calzavara, and C. Mora, "Modelling job rotation in manufacturing systems with aged workers," *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 8, pp. 2522–2536, Mar. 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1735659.
- [56] S. Finco, I. Zennaro, D. Battini, and A. Persona, "Considering workers' features in manufacturing systems: A new job-rotation scheduling model," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, pp. 10621–10626, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.12.2819.
- [57] M. L. C. Comper, P. R. da Silva, A. W. de Negreiros, C. C. Villas Bôas, and R. S. Padula, "Influence of adherence to autonomous job rotation on musculoskeletal symptoms, occupational exposure, and work ability," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 84, p. 103165, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ERGON.2021.103165.
- [58] M. B. Aryanezhad, A. S. Kheirkhah, V. Deljoo, and S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem, "Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1–2, pp. 193–199, Mar. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1446-0.

- [59] J. A. Diego-Mas, S. Asensio-Cuesta, M. A. Sanchez-Romero, and M. A. Artacho-Ramirez, "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, no. 1, pp. 23–33, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.ergon.2008.07.009.
- [60] F. Sgarbossa, D. Battini, A. Persona, and V. Visentin, "Including ergonomics aspects into mixed-model assembly line balancing problem," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 489, pp. 991–1001, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-41694-6_94.
- [61] D. Battini, X. Delorme, A. Dolgui, A. Persona, and F. Sgarbossa, "Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective model," *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 3, pp. 824–845, Feb. 2016, doi: 10.1080/00207543.2015.1074299.
- [62] L. Botti, C. Mora, and M. Calzavara, "Design of job rotation schedules managing the exposure to age-related risk factors," vol. 50, no. 1, pp. 13993–13997, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.IFACOL.2017.08.2420.
- [63] S. S. Sana, H. Ospina-Mateus, F. G. Arrieta, and J. A. Chedid, "Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 10, no. 5, pp. 2063–2090, May 2019, doi: 10.1007/S12652-018-0814-3.
- [64] K. Asawarungsaengkul and S. Nanthavanij, "Heuristic Genetic Algorithm for Workforce Scheduling with Minimum Total Worker-Location Changeover," *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 373–385, Jul. 2008.
- [65] S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Mas, L. Canós-Darós, and C. Andrés-Romano, "A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 9–12, pp. 1161–1174, Oct. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3672-0.
- [66] M. Dalle Mura and G. Dini, "Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Sep. 2021, doi: 10.1007/S00170-021-08068-1.

- [67] H. Rajabalipour Cheshmehgaz, H. Haron, F. Kazemipour, and M. I. Desa, "Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 503–512, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.CIE.2012.03.017.
- [68] S. Yaoyuenyong and S. Nanthavanij, "Heuristic job rotation procedures for reducing daily exposure to occupational hazards," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 14, no. 2, pp. 195–206, Jan. 2008, doi: 10.1080/10803548.2008.11076762.
- [69] S. Nanthavanij, S. Yaoyuenyong, and C. Jeenanunta, "Heuristic approach to workforce scheduling with combined safety and productivity objective," *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, vol. 17, no. 4, pp. 319–333, Sep. 2010.
- [70] S. U. Seçkiner and M. Kurt, "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 201, no. 1–2, pp. 149–160, 2008, doi: 10.1016/j.amc.2007.12.006.
- [71] A. Otto and A. Scholl, "Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing," *European Journal of Operational Research*, vol. 212, no. 2, pp. 277–286, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.ejor.2011.01.056.
- [72] J. B. Song, C. Lee, W. J. Lee, S. Bahn, C. J. Jung, and M. H. Yun, "Development of a job rotation scheduling algorithm for minimizing accumulated work load per body parts," *Work*, vol. 53, no. 3, pp. 511–521, Jan. 2016, doi: 10.3233/WOR-152232.
- [73] J. Hochdörffer, M. Hedler, and G. Lanza, "Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 103–114, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2017.11.005.
- [74] M. Maleki, "Solving a multi-objective model of job rotation minimizing the chemical exposure and cost by particle swarm optimization," *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 11, Aug. 2019, doi: 10.1177/1847979019867830.

- [75] A. Ayough, M. Zandieh, and F. Farhadi, "Balancing, sequencing, and job rotation scheduling of a U-shaped lean cell with dynamic operator performance," *undefined*, vol. 143, May 2020, doi: 10.1016/J.CIE.2020.106363.
- [76] J. A. Diego-Mas, "Designing cyclic job rotations to reduce the exposure to ergonomics risk factors," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/IJERPH17031073.
- [77] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, May 1983.
- [78] S. U. Seçkiner and M. Kurt, "A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 188, no. 1, pp. 31–45, May 2007, doi: 10.1016/j.amc.2006.09.082.
- [79] A. Malekahmadi and M. Soleymani, "Job Rotation model in manufacturing systems to reduce ergonomic risks due to work Somaye tianimoghadam," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Toronto*, Oct. 2019, pp. 1769–1777.
- [80] J. Wu and S. Azarm, "Metrics for quality assessment of a multiobjective design optimization solution set," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 123, no. 1, pp. 18–25, Mar. 2001, doi: 10.1115/1.1329875.
- [81] E. B. Tirkolaee, A. Goli, A. Faridnia, M. Soltani, and G. W. Weber, "Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms," *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122927.
- [82] R. Alinezhad, R. Ansari, M. Mahdikhani, and S. A. Banihashemi, "Multi-phase Projects Selection and Scheduling Problem: A Multi-objective Optimization Approach," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, Aug. 2021, doi: 10.1007/s40996-021-00721-9.
- [83] F. Altıparmak, M. Gen, L. Lin, and T. Paksoy, "A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 196–215, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.cie.2006.07.011.

EKLER

EK-1: Operatörlerin İstasyonlara Dağılımı ve İstasyonda Yapılan İşler

İstasyon	İstasyonda Yapılan İş	Operatör Sayısı
D01	Motor odası izolasyon montajı	8
	Fren ventil Montajı	
D02	Kalorifer Boru Montajı	6
D03	Fren Polyamid Bağlantıları	7
D04	Bagaj Kapakları Elçek Montajı	4
D05	Elektrik 1: Ana Tesisat Montajı	14
D06	Elektrik 2: Santral Montajı	9
D07	Elektrik 2: Santral Montajı	3
D08	Motor Odası Borulama Montajı	3
	İlave Isıtıcı Montajı	
D09	Taban Tahtası Yapıştırma	7
	Üre Tankı Montajı	
	Motor Odası Yakın Boruları Montajı	
D10	Aks Hazırlık	6
	Yakıt Deposu Montajı	
D11	Arka Aks Montajı	1
	Ön Aks Montajı	
	Tekerlek Montajı	
D12	Motor Montajı	2
	Radyatör Montajı	
D13	Motor Sonrası Borulama Montajı	8
	Hava Emiş Sistemi Montajı	
D14	Klima Montajı	7
	WC Montajı	
D15	Yan Duvar Ray Montajı	6
	Şaft Montajı	
	Gaz Boruları Montajı	
D16	Taban Tahtası Zımparalama	3
D17	Muşamba Montajı 1	4
D18	Muşamba Montajı 2	4
D19	Muşamba Montajı 2	5
D20	Cam Montajı 1	6
D21	Cam Montajı 2	6
D22	Cam Montajı 2	2
	Taban Rayı –Konvektör Montajı 1	6
D23	Taban Rayı –Konvektör Montajı 2	3
D24	Araç Çalıştırma	4

GP3	Rework-Kontrol	6
D25	Hava Kanalı Montajı	9
D26	Yan Duvar Montajı	5
D27	Taban Çıtası Montajı	1
	Kapı Piston Montajı	
	Cam Altı Kapama	
D28	Kapı Askılama ve Ayarı	2
D29	Kapı Ayarı	2
D30	Ön-Arka Kaş Montajı	2
D31	Ön-Arka Kaş Montajı 2	2



EK-2: İşlerin İşlem Süreleri, REBA, A ve B Skorlarının Değerleri

İşin Numarası	İşlem Süresi	REBA Skoru	A skor	B skor	İşin Numarası	İşlem Süresi	REBA Skoru	A skor	B skor
1	25	12	1	1	51	53	13	1	0
2	59	3	0	0	52	25	2	0	0
3	70	4	0	0	53	18	2	0	0
4	63	5	0	0	54	37	2	0	0
5	40	14	1	1	55	16	6	0	0
6	57	2	0	0	56	16	8	0	0
7	62	7	0	0	57	62	2	0	0
8	31	6	0	1	58	53	1	0	0
9	29	9	1	0	59	43	1	0	0
10	38	10	0	1	60	37	8	1	0
11	46	11	0	1	61	33	4	0	0
12	25	6	0	0	62	4	2	0	0
13	18	13	1	0	63	55	4	0	0
14	30	2	0	0	64	26	7	0	0
15	52	5	0	0	65	6	13	0	1
16	17	8	1	0	66	70	6	0	0
17	53	12	1	0	67	46	12	1	0
18	39	4	0	1	68	15	12	0	1
19	33	6	0	0	69	23	3	0	0
20	35	7	0	0	70	9	3	0	0
21	31	1	0	0	71	26	10	1	0
22	31	4	0	0	72	63	1	0	0
23	19	7	1	0	73	69	3	0	0
24	32	13	0	1	74	37	9	0	1
25	58	6	0	0	75	64	2	0	0
26	54	5	0	0	76	30	6	0	0
27	51	8	0	1	77	18	14	1	1
28	38	9	0	0	78	43	1	0	0
29	64	5	0	0	79	9	3	0	0
30	60	14	1	1	80	52	5	0	0
31	24	2	0	0	81	12	4	0	0
32	43	10	1	0	82	34	2	0	0
33	59	5	0	0	83	21	2	0	0
34	22	3	0	0	84	7	6	0	0
35	47	6	0	0	85	26	8	1	0
36	54	13	1	1	86	36	1	0	0
37	55	4	0	0	87	68	12	0	1
38	56	7	1	0	88	29	1	0	0
39	44	12	0	1	89	51	4	0	0
40	37	6	0	0	90	44	11	1	0
41	40	5	0	0	91	35	3	0	0
42	46	11	0	1	92	35	4	0	0
43	33	4	0	0	93	20	6	0	0
44	17	5	0	0	94	33	5	0	0
45	26	12	1	0	95	49	9	0	1
46	16	4	0	0	96	62	8	1	0
47	30	1	0	0	97	15	4	0	0
48	40	12	1	0	98	56	5	0	0
49	66	14	0	1	99	1	14	1	1
50	34	2	0	0	100	14	7	0	0

İşin Numarası	İşlem Süresi	REBA Skoru	A skor	B skor	İşin Numarası	İşlem Süresi	REBA Skoru	A skor	B skor
101	11	1	0	0	130	38	4	0	0
102	22	3	0	0	131	44	13	0	1
103	32	4	0	0	132	3	11	0	0
104	70	5	0	0	133	14	7	0	0
105	22	3	0	0	134	28	13	0	1
106	10	1	0	0	135	29	8	1	0
107	52	2	0	0	136	28	6	0	0
108	66	10	0	1	137	37	3	0	0
109	40	6	0	0	138	45	10	1	0
110	59	1	0	0	139	35	1	0	0
111	37	9	1	0	140	68	2	0	0
112	23	5	0	0	141	43	3	0	0
113	21	14	1	1	142	7	7	0	0
114	51	8	0	0	143	14	8	1	0
115	11	2	0	0	144	27	11	0	1
116	24	9	1	0	145	7	6	0	0
117	39	5	0	0	146	21	7	0	0
118	28	1	0	0	147	49	1	0	0
119	39	14	1	1	148	65	3	0	0
120	7	12	0	0	149	15	11	0	1
121	40	9	0	1	150	20	5	0	0
122	40	1	0	0	151	33	4	0	0
123	52	2	0	0	152	65	1	0	0
124	46	7	0	0	153	63	5	0	0
125	61	9	0	1	154	8	10	0	1
126	66	12	1	0	155	38	1	0	0
127	16	6	0	0	156	10	2	0	0
128	50	7	0	0	157	50	6	0	0
129	7	5	0	0					

EK-3: Geliştirilen TB Varyantlarının Sonuçları

TB'nin 1. Varyantı-Boyut 1		
F1	F2	F3
86	612	135
91	604	137
120	624	133
98	614	135
120	622	134
101	620	132
76	630	130
74	628	131
88	636	130
64	616	130
112	638	125
111	638	121
109	638	119
60	628	116
61	598	117
62	604	117
59	606	113
51	604	112
49	590	114
57	594	113
59	608	108
118	626	132
98	606	136
104	608	137
87	598	137

TB'nin 2. Varyantı-Boyut 2		
F1	F2	F3
63	634	151
66	640	152
64	648	150
57	650	143
53	592	138
54	598	132
50	580	132
49	576	130
61	636	149
59	632	147
59	642	145
75	656	149
75	648	151
56	602	138
55	596	138
63	638	148
59	628	149
85	612	154
84	576	155
78	574	155
58	626	144
113	608	155

TB'nin 3. Varyantı-Boyut 1		
F1	F2	F3
70	578	140
49	590	132
60	624	118
51	604	126
48	602	113
87	590	139
67	578	138
85	611	125
85	621	123
85	636	121
63	626	117
59	624	117
64	626	118
60	636	116
59	636	115
69	646	115
64	632	117
68	646	114
90	576	141
132	570	149
101	546	144
126	555	148
78	570	141
102	566	145
88	536	143
91	542	142
69	531	139
64	520	137
64	518	139
61	518	137
55	564	136
132	576	147
132	552	150
134	581	143
127	579	141
97	572	143
77	584	134
74	590	133
48	590	130
85	602	127
76	608	119
49	606	113
57	610	113
77	596	131
125	576	142
130	572	144
76	580	137
67	580	136
65	578	133
85	596	133
83	582	136
113	578	141
113	590	140

TB'nin 1. Varyantı-Boyut 2		
F1	F2	F3
70	1084	212
65	1116	190
73	1098	193
89	1116	192
61	1116	189
55	1082	188
50	1078	187
50	1082	183
80	1124	189
48	1060	185
46	1066	183
44	1076	182
55	1086	187
65	1122	186
65	1126	184
80	1120	191
75	1122	189
64	1100	190
63	1086	190
54	1080	189
98	1082	215
110	1082	216
121	1096	215
89	1084	214
77	1086	213
121	1098	214
64	1040	209
64	1034	210
58	1034	209
58	1038	207
54	1038	206
58	1044	206
63	1066	207
48	1040	194
60	1060	203
51	1000	203
51	1002	202
51	1010	200
53	1018	197
51	1044	191
46	1040	193
54	1046	199
56	1024	210
116	994	219
131	996	220
131	994	221
107	994	218
104	994	216
63	1058	208
66	1024	211

TB'nin 2. Varyantı-Boyut 2		
F1	F2	F3
54	1146	250
55	1142	252
69	1146	253
71	1146	254
116	1156	257
110	1142	258
84	1144	255
137	1142	259
109	1142	257
67	1144	252
67	1162	251
58	1162	249
69	1164	251
71	1164	253
90	1164	254
137	1164	255
137	1162	257
153	1156	258
86	1158	255
46	1148	242
54	1140	252
54	1126	253
52	1144	247
49	1148	244
52	1146	246
52	1148	245
49	1146	245
44	1106	238
45	1106	239
43	1112	236
159	1128	260
143	1148	258
69	1184	234
94	1184	235
94	1186	233
89	1186	232
118	1188	232
87	1186	229
95	1188	229
81	1168	235
117	1168	236
87	1174	235
63	1166	231
55	1164	223
58	1168	223
54	1156	214
73	1148	254
77	1086	257
76	1092	255
110	1088	260
75	1088	256
69	1086	254
137	1088	261
109	1088	259
131	1082	261
109	1082	260
82	1082	258
51	1106	248
42	1098	248
47	1090	249
45	1100	246
166	1108	261
171	1100	262
158	1100	261
131	1100	260

TB'nin 3. Varyantı-Boyut 2		
F1	F2	F3
78	1074	220
57	1054	220
52	1046	223
66	1034	231
66	1032	232
62	1028	233
73	1026	237
62	1024	234
77	1034	236
73	1030	236
80	994	239
86	980	242
86	962	243
104	954	244
104	936	245
112	930	246
119	932	247
142	930	250
142	950	248
142	932	249
80	960	242
80	984	240
75	1016	238
83	1016	239
95	1018	240
83	1026	238
72	1028	236
82	1018	238
82	1028	237
92	1018	239
109	1012	241
73	1012	238
90	1036	237
90	1032	238
69	1022	236
89	1038	236
60	1024	233
70	1036	228
79	1044	225
51	1026	223
66	1052	224
46	1040	215
49	1024	223
47	1020	223
38	1032	211
37	1030	209
36	976	182
76	1068	186
55	1064	218
76	1060	220
156	1040	233
173	1040	234
93	1046	226
61	1046	224
62	1048	221
94	1056	222
113	1056	223
95	1060	221
56	1064	219
52	1064	215
46	1020	221
38	1042	210
39	1020	212
39	1034	211

TB'nin 1. Varyantı-Boyut 3		
F1	F2	F3
94	1776	427
97	1780	431
94	1764	428
89	1758	432
92	1754	433
87	1760	429
92	1750	435
102	1744	439
92	1748	437
102	1746	438
90	1752	434
83	1736	413
81	1730	408
80	1728	409
87	1762	428
85	1792	414
85	1768	426
103	1832	410
83	1792	409
90	1808	405
114	1784	433
126	1802	426
120	1782	439
126	1788	431
126	1786	432
127	1802	439
114	1780	434
126	1768	440
130	1780	440
132	1772	442
163	1810	442
138	1810	440
132	1810	439
152	1802	441
111	1834	409
111	1836	407
102	1820	404
96	1810	413
86	1760	427
86	1752	428
96	1796	416
90	1774	416
94	1800	408
93	1808	406
89	1798	378
82	1756	375
73	1762	370
73	1770	369
82	1772	368
83	1800	367
92	1810	369
83	1798	368
84	1808	366
92	1812	368
97	1816	367
94	1818	365
95	1820	362
86	1812	367
80	1808	365
102	1776	433
117	1752	435
94	1760	431
89	1760	430
85	1752	427
96	1784	419
99	1798	415
85	1796	413
101	1812	384
97	1812	382

TB'nin 2. Varyantı-Boyut 3		
F1	F2	F3
74	1778	394
95	1782	397
96	1788	396
79	1788	344
80	1794	393
89	1800	344
85	1796	344
84	1790	394
96	1776	398
85	1824	339
87	1816	340
96	1812	342
88	1838	340
106	1846	339
109	1840	341
96	1828	341
72	1772	327
75	1730	402
84	1738	424
67	1722	400
86	1746	422
88	1738	426
78	1714	405
93	1750	398
90	1716	427
141	1722	430
146	1720	431
139	1722	429
159	1694	434
165	1682	437
165	1694	436
159	1638	435
165	1658	438
227	1650	440
182	1678	438
146	1716	433
159	1724	433
182	1654	439
161	1702	434
175	1716	434
227	1708	435
197	1702	435
131	1716	428
89	1710	427
130	1710	428
130	1730	427
83	1736	423
127	1746	423
82	1728	421
77	1716	403
95	1794	395
73	1784	393
86	1788	395
81	1776	395
80	1782	394
81	1788	394
92	1800	384
117	1804	366
119	1806	365
154	1806	366

TB'nin 3. Varyantı-Boyut 3		
F1	F2	F3
91	1702	361
96	1688	363
83	1734	336
89	1660	355
89	1672	354
99	1678	364
86	1652	359
132	1690	365
132	1686	366
137	1650	367
132	1642	367
121	1688	365
121	1690	363
105	1678	365
77	1710	335
87	1744	338
73	1726	308
103	1750	341
74	1730	308
105	1758	298
89	1748	296
98	1750	295
105	1760	297
108	1764	298
102	1764	296
113	1766	295
99	1756	295
72	1718	307
70	1718	304
70	1708	305
69	1700	305
67	1698	303
67	1694	305
117	1736	346
111	1732	355
126	1756	349
111	1762	344
103	1746	342
130	1756	351
87	1746	337
86	1738	337
86	1740	336
77	1712	334
98	1726	346
93	1720	344
98	1730	344
96	1744	340
108	1732	354
93	1706	345
93	1726	342
94	1704	346
94	1714	345
94	1728	344
137	1726	356
99	1724	354
134	1710	359
126	1710	358
134	1708	360
126	1708	359
148	1710	361
144	1714	359
143	1728	358
135	1712	356
137	1722	357
144	1760	352
148	1758	353
114	1762	345
125	1766	344
143	1764	345

TB'nin 1. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
84	2464	467
110	2430	524
117	2422	528
110	2418	532
109	2452	520
96	2472	456
97	2478	453
97	2482	452
104	2404	530
104	2394	533
94	2466	482
105	2398	532
110	2376	535
109	2366	536
104	2388	534
104	2352	539
103	2348	539
103	2342	540
102	2348	537
109	2318	541
110	2304	561
110	2302	562
99	2278	564
106	2264	574
100	2260	575
171	2252	577
111	2256	576
121	2242	579
180	2244	591
130	2242	592
128	2240	593
170	2244	588
191	2242	596
128	2236	594
126	2230	585
124	2226	585
123	2232	583
169	2212	597
166	2224	596
166	2210	598
169	2206	599
172	2208	600
218	2210	602
215	2222	598
218	2224	600
212	2214	599
215	2210	600
191	2214	597
212	2230	597
216	2238	599
215	2238	597
191	2248	595
215	2244	596
130	2226	595
126	2226	586
123	2228	584
123	2242	581
121	2236	580
121	2232	581
121	2246	578
99	2254	574
98	2254	573
98	2258	572
98	2238	574
97	2250	569
97	2254	568
172	2298	565
86	2470	449
99	2498	445
98	2494	444

TB'nin 2. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
120	2376	542
121	2436	539
116	2458	520
120	2468	522
117	2362	527
111	2378	522
115	2380	520
110	2422	516
102	2368	523
120	2460	523
110	2420	517
106	2410	510
100	2404	509
107	2422	509
107	2426	508
110	2414	518
121	2456	538
139	2412	542
121	2424	540
139	2390	546
122	2390	545
153	2378	547
165	2388	547
165	2378	548
122	2396	544
139	2404	545
122	2410	543
139	2410	544
120	2382	536
132	2424	541
120	2420	535
132	2436	540
132	2444	539
120	2444	529
120	2488	520
126	2494	518
115	2464	494
136	2498	495
137	2496	497
140	2508	496
118	2356	529
115	2360	524
101	2364	521
101	2354	522
107	2354	524
104	2382	517
105	2382	518
109	2370	521
96	2374	512
90	2400	505
99	2358	516
87	2380	503
88	2386	504
88	2398	503
87	2398	502
102	2408	503
102	2410	502
89	2400	501
90	2402	503
86	2372	491
95	2420	501
93	2486	473
95	2484	477
104	2476	478
99	2340	517
115	2302	526
116	2288	528
84	2470	460
84	2466	461
83	2462	459

TB'nin 3. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
93	2458	552
117	2334	589
100	2450	553
116	2322	593
116	2354	575
116	2340	587
129	2342	583
127	2310	597
123	2316	594
126	2316	596
128	2298	598
130	2278	599
151	2280	599
116	2342	582
116	2350	577
133	2354	577
168	2350	579
118	2348	579
168	2356	577
133	2356	576
118	2362	575
121	2368	572
118	2372	571
130	2374	571
118	2376	570
121	2378	570
121	2382	569
123	2400	566
132	2406	566
123	2406	565
132	2402	567
123	2426	555
104	2450	554
100	2474	545
104	2454	553
93	2448	553
92	2450	552
91	2446	550
90	2434	549
87	2436	548
86	2430	547
85	2454	545
85	2470	541
85	2472	540
83	2476	539
83	2480	536
104	2482	539
99	2476	540
93	2500	538
97	2506	527
96	2502	516
107	2518	514
109	2520	515
105	2518	512
105	2510	513
116	2530	508
97	2518	508
97	2520	507
99	2524	507
105	2520	508
110	2528	507
116	2532	507
99	2528	501
86	2520	500
88	2524	500
86	2518	501
89	2516	502
79	2510	488
79	2514	479
79	2520	475

TB'nin 1. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
97	2274	565
113	2274	566
97	2276	563
97	2286	561
96	2304	558
172	2300	564
110	2298	563
172	2278	566
104	2306	549
104	2310	542
118	2340	541
113	2354	538
104	2362	535
109	2362	537
126	2372	536
105	2404	531
105	2408	529
105	2410	528
104	2406	529
110	2406	533
110	2420	526
110	2436	523
109	2426	522
109	2454	518
109	2464	513
91	2434	496
93	2416	497
97	2446	485
89	2458	470
74	2436	490
96	2474	455
95	2472	451
94	2468	475
120	2484	451
91	2480	449
119	2486	450
103	2488	446
103	2486	448
91	2482	446
99	2502	444
119	2502	445
87	2444	489
73	2430	491
78	2408	502
89	2456	471
84	2454	469
120	2474	472
114	2468	481
88	2410	501
96	2434	497
94	2448	483
96	2448	484
103	2452	484
117	2470	471
88	2438	491
88	2444	490
76	2444	488
73	2434	489
87	2438	490
76	2438	489
102	2414	499
88	2420	494
88	2424	493
78	2418	492
82	2418	493
84	2420	492

TB'nin 2. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
99	2380	512
92	2366	507
88	2350	506
96	2350	514
99	2374	513
95	2328	514
99	2362	515
95	2346	513
92	2362	508
91	2358	509
90	2358	507
86	2354	503
87	2354	504
83	2360	502
104	2418	502
117	2358	528
115	2350	525
115	2440	509
115	2444	505
115	2456	500
115	2446	501
115	2470	492
112	2452	494
114	2458	492
113	2476	484
113	2472	485
116	2482	481
108	2482	480
95	2486	476
99	2490	475
99	2488	476
95	2488	473
92	2482	467
92	2480	468
90	2438	471
90	2466	470
85	2458	465
84	2458	463
84	2462	462

TB'nin 3. Varyantı-Boyut 4		
F1	F2	F3
89	2522	501
100	2536	497
82	2528	498
89	2532	497
82	2532	496
82	2530	497
102	2308	561
103	2296	574
100	2288	578
102	2284	580
100	2236	581
98	2216	582
98	2224	581
100	2208	583
164	2188	601
164	2190	600
100	2232	582
114	2190	584
105	2212	583
110	2286	581
96	2288	565
101	2296	565
92	2290	563
89	2286	561
89	2288	559
90	2284	562
92	2288	564
92	2294	561
88	2282	559
91	2292	561
100	2290	569
110	2294	575
103	2276	581
110	2278	582
98	2262	576
97	2236	574
82	2360	520
82	2362	518
78	2506	489
75	2516	471
83	2540	468
75	2528	465
75	2534	462
82	2542	461
75	2536	461
75	2550	455
87	2552	454