

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK AMAÇLI ENERJİ VERİMLİ ATÖLYE ÇİZELGELEME
PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI: WASPAS
TABANLI NSGA-2

DOKTORA TEZİ

Mine Büşra GELEN MERT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

KASIM 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK AMAÇLI ENERJİ VERİMLİ ATÖLYE ÇİZELGELEME
PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI: WASPAS
TABANLI NSGA-2

DOKTORA TEZİ

Mine Büşra GELEN MERT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alparslan Serhat DEMİR

KASIM 2024

Mine Büşra GELEN MERT tarafından hazırlanan “ÇOK AMAÇLI ENERJİ VERİMLİ ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI: WASPAS TABANLI NSGA-2” adlı tez çalışması 26.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Unvan Adı SOYADI Kocaeli Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Unvan Adı SOYADI (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Unvan Adı SOYADI Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Unvan Adı SOYADI Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Unvan Adı SOYADI Kocaeli Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ÇOK AMAÇLI ENERJİ VERİMLİ ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI: WASPAS TABANLI NSGA-2” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(26/11/2024).

Mine Büşra GELEN MERT





Annem, babam, kardeşim ve eşime



TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca bu çalışmamda olduğu gibi tüm çalışmalarında yanımda olan, sevgisini, sabrını ve desteğini benden esirgemeyen annem Makbule GELEN, babam Mahmut GELEN ve kardeşim Merve Buse GELEN AKSU'ya teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince yanımda olan, beni destekleyen ve motive eden değerli eşim Osman MERT'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiç esirgemeyen, eşimin değerli annesi ve babasına teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince beni yönlendiren ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Alparslan Serhat DEMİR'e çok teşekkür ederim. Fikirleri ve yönlendirmeleri ile çalışmamın gelişmesinde büyük katkı sağlayan tez izleme komitesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Özer UYGUN ve Sayın Prof. Dr. Nilüfer YURTAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Mine Büşra GELEN MERT



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. ÇİZELGELEME.....	5
2.1. Akış Tipi Çizelgeleme.....	6
2.2. Atölye Tipi Çizelgeleme	8
2.3. Yeşil Çizelgeleme	10
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
4. METOTLAR	21
4.1. Genetik Algoritma.....	21
4.1.1. Seçim.....	22
4.1.1.1. Rulet tekerleği seçimi.....	23
4.1.1.2. Rank seçimi.....	23
4.1.1.3. Turnuva seçimi.....	24
4.1.2. Çaprazlama.....	24
4.1.2.1. Kısmi eşleşmiş çaprazlama	25
4.1.2.2. Çevrim çaprazlama.....	26
4.1.2.3. Sıralı çaprazlama	28
4.1.2.4. Doğrusal sıralı çaprazlama.....	30
4.1.3. Mutasyon.....	32
4.1.3.1. Ters dizi mutasyonu	32
4.1.3.2. Takas mutasyonu.....	33
4.1.3.3. Keyfi üç iş değişikliği	33
4.1.4. Eleme	33
4.2. Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-2: NSGA-2.....	34
4.2.1. Hızlı baskın olmayan sıralama	35
4.2.2. Kalabalık mesafe	36
4.3. Bütünleşik Ağırlıklı Toplam ve Çarpım Yöntemi: WASPAS	36
4.4. Önerilen Metot: WASPAS Tabanlı NSGA-2.....	38
4.5. Taguchi Deney Tasarımı	42
4.6. Performans Değerlendirme Metotları.....	42
4.6.1. Bağlı yüzdelik artış	42
4.6.2. Normalizasyon ile karşılaştırma.....	43
4.6.3. Bağımlı ve bağımsız örneklem testleri.....	43

5. UYGULAMA	45
5.1. Problemin Tanımı.....	45
5.2. Yöntemlerin Python’da Kodlanması	47
5.3. Taguchi Deney Tasarımı İle Parametre Optimizasyonu	47
5.4. ANOVA Testi ile Parametrelerin Sonuca Katkısının Hesaplanması	51
5.5. Test Problemleri Üzerinde Çok Tekrarlı Uygulamaların Yapılması.....	63
5.6. Taguchi Yönteminin Parametre Belirleme Etkinliğinin Değerlendirilmesi	63
5.7. Çok tekrarlı uygulama sonuçlarının analizi ve değerlendirilmesi	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ	95



KISALTMALAR

AMGA	: Adaptive Multi-Objective Genetic Algorithm
ANOVA	: ANalysis Of VAriance
BDABC	: Bi-Population Differential Artificial Bee Colony
CMOA	: Collaborative Multi-Objective Optimization Algorithm
ÇAGA	: Çok Amaçlı Genetik Algoritma
DMGWO	: Grey Wolf Optimization Algorithm With Double-Searching Mode
DWOA	: Discrete Whale Optimization Algorithm
DWWO	: Discrete Water Wave Optimization
EAGA	: Efficient Adaptive Genetic Algorithm
EDFJSP	: Energy-Efficient Distributed Flexible Job Shop Scheduling Problem
EGA	: Enhanced Genetic Algorithm
GA	: Genetik Algoritma
GGA	: Green Genetic Algorithm
GRASP	: Greedy Randomised Adaptive Search Procedure
GSAA	: Genetic Simulated Annealing Algorithm
HCSA	: Hybrid Cuckoo Search Algorithm
ICA	: Imperialist Competitive Algorithm
IGA	: Improved Genetic Algorithm
IMHGA	: Improved Multi-Objective Hierarchical Genetic Algorithm
ITLBO	: Improved Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm
IWOA	: Improved Whale Optimization Algorithm
MBO	: Migrating Birds Optimization Algorithm
MCEDA	: Matrix-Cube-Based Estimation of Distribution Algorithm
MDABC	: Multiobjective Discrete Artificial Bee Colony Algorithm
MDGWO	: Modified Discrete Grey Wolf Optimization
MGA	: Modified Genetic Algorithm
MHGA	: Multi-Objective Hierarchical Genetic Algorithm
MMOIG	: Modified Multi-Objective Iterated Greedy Algorithm
MODBH	: Multi-Objective Decomposition-Based Heuristic
MOGA	: Multi-Objective Genetic Algorithm

MOGWO	: Multi-Objective Grey Wolf Optimization Algorithm
MOIG	: Multi-Objective Iterated Greedy Algorithm
MONEH	: Multi-Objective NEH Algorithm
MRWLP	: Multi-Row Workshop Layout Problem
MTLBO	: Modified Teaching-Learning Based Optimization
NEH	: Nawaz, Enscore and Ham Algorithm
NHGA	: Newly Proposed Hybrid Genetic Algorithm
NNIA	: Non-dominated Neighbor Immune Algorithm
NSGA-2	: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
NSGA-3	: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III
PSO	: Particle Swarm Optimization
RPI	: Relative Percentage Increase
SA	: Simulating Annealing
SPAMA	: Surprisingly Popular-Based Adaptive Memetic Algorithm
SPEA-2	: Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
TLBO	: Teaching-Learning Based Optimization
TOPSIS	: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TPM	: Two-Phase Meta-Heuristic
VEGA	: Vector Evaluated Genetic Algorithms
VNS	: Variable Neighborhood Search
WASPAS	: Weighted Aggregated Sum Product Assessment
WPM	: Weighted Product Model
WSBNSGA-2	: WASPAS Based NSGA-2 (WASPAS Tabanlı NSGA-2)
WSM	: Weighted Sum Model

SİMGELER

TEC	: Toplam Enerji Tüketimi
C_{maks}	: Maksimum Tamamlanma Zamanı
C_{max}	: Maximum Completion Time
is	: İş sayısı
ms	: Makine sayısı
os	: Operasyon sayısı
m	: Alternatif sayısı
n	: Kriter sayısı
f	: Bir algoritma tarafından hesaplanan bir amaç fonksiyonu değeri
f^*	: En iyi amaç fonksiyonu değeri
F	: İki Varyansın Oranı
p	: Olasılık
w_i	: i. kriterin önem ağırlığı
α	: İstatistiksel anlam düzeyi
λ	: Alternatiflerin Görelî Önemi
f_N	: Normalizasyon yapılmış amaç fonksiyonu değeri
N	: Popülasyon büyüklüğü
y_i	: i. gözlem değerinin performans kriteri
ds	: Bir denemede yapılan deneyin sayısı
u^2	: Gözlem sayısı
σ^2	: Gözlem değerlerinin varyansı
$\bar{x}_{ij}$	: j. alternatifin i. kriter açısından normalizasyon yapılmış değeri
K	: Kriter
A	: Alternatif
n_p	: Bir p çözümünü bastıran çözümlerin sayısı
S_p	: Bir p çözümünün bastırdığı çözümlerin kümesi
Q_i^1	: i. alternatifin WSM yöntemi görelî önemi
Q_i^2	: i. alternatifin WPM yöntemi görelî önemi
$Minf(x)$	: Hedeflerin f_N değerlerini önem ağırlıkları ile birleştiren fonksiyon
S/N	: Signal/Noise (Sinyal/Gürültü)

x_{ij}	: j. alternatifin i. kriter açısından performans değerleri
v_1	: Parametrenin serbestlik derecesi
v_2	: Hatanın serbestlik derecesi
F_{α, v_1, v_2}	: F değerleri α tablosunda v_1 ve v_2 değerlerinin kesişimindeki değer
P	: Polinom zaman sınırlı bir metot ile çözülebilen
NP	: Polinom zamanda çözümü doğrulanabilen
NP-Zor	: Polinom zaman sınırlı bir metot ile çözilemeyen
h	: Saat
kWh	: Kilowatt saat
X	: Veri setindeki bir değer
X'	: Veri setindeki normalizasyon yapılmış bir değer
is x ms	: is adet işin ms adet makinede yapıldığı problem

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Maksimum tamamlanma zamanı ve enerji tüketimi odaklı çalışmalar....	19
Tablo 5.1. Operasyonların yapıldığı makineler.....	45
Tablo 5.2. Operasyonların yapılma süresi.....	46
Tablo 5.3. Makinelerin enerji tüketimi.....	46
Tablo 5.4. Faktörler ve seviyeleri.....	48
Tablo 5.5. Taguchi deney kombinasyonları.....	48
Tablo 5.6. Tüm problem büyüklükleri için Taguchi yöntemi sonuçları.....	50
Tablo 5.7. p değerlerinin açıklanması [119].....	52
Tablo 5.8. 10 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.....	52
Tablo 5.9. 20 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.....	55
Tablo 5.10. 30 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.....	57
Tablo 5.11. 40 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.....	59
Tablo 5.12. 50 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.....	61
Tablo 5.13. 10 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.....	63
Tablo 5.14. 20 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.....	65
Tablo 5.15. 30 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.....	66
Tablo 5.16. 40 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.....	68
Tablo 5.17. 50 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.....	69
Tablo 5.18. 35 deneme minimum <i>TEC</i> ve <i>C_{maks}</i> sonuçları.....	71
Tablo 5.19. Ortalama RPI değerleri ile yöntemlerin karşılaştırılması.....	73
Tablo 5.20. 35 deneme istatistiksel test sonuçları.....	76



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Üretimde Sürdürülebilirliğin Unsurları [3].....	2
Şekil 2.1. Akış tipi çizelgeleme.	7
Şekil 2.2. Atölye tipi çizelgeleme.	9
Şekil 2.3. Proses zinciri analizi girdi ve çıktıları [22].....	12
Şekil 4.1. 9 işin çizelgelendiği bir kromozom örneği.	21
Şekil 4.2. Bir maksimizasyon probleminde Rulet Tekerleği Seçimi [82].	23
Şekil 4.3. Turnuva seçimi örneği [82].	24
Şekil 4.4. Kromozomlara tek noktalı ve iki noktalı çaprazlama uygulanması.	25
Şekil 4.5. Kısmi eşleşmiş çaprazlama örneği.	26
Şekil 4.6. Çevrim çaprazlama uygulama örneği.	27
Şekil 4.7. Sıralı çaprazlama yöntemi örneği.	29
Şekil 4.8. Doğrusal sıralı çaprazlama örneği.	31
Şekil 4.9. Kromozomlara mutasyon işlemi uygulaması.	32
Şekil 4.10. Ters dizi mutasyonu örneği.	32
Şekil 4.11. Takas mutasyonu örneği.	33
Şekil 4.12. Keyfi üç iş değişikliği mutasyonu örneği.	33
Şekil 4.13. Hızlı Baskın Olmayan Sıralama ve Kalabalık Mesafe [99].....	35
Şekil 4.14. Kalabalık mesafe hesabı [99].....	36
Şekil 4.15. NSGA-2 ve WSBNSGA-2 yöntemlerinin adımlarının karşılaştırılması.	39
Şekil 4.16. WSBNSGA-2 yöntemi akış şeması.	41
Şekil 5.1. Atölye çizelgeleme problemi kromozom yapısı.	47
Şekil 5.2. S/N oranı grafik sonucu.	49
Şekil 5.3. Yöntemlerin başarılı Minf(x) değerleri ile karşılaştırılması.	74
Şekil 5.4. Başarılı sonuç sayılarının karşılaştırılması	79



ÇOK AMAÇLI ENERJİ VERİMLİ ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI: WASPAS TABANLI NSGA-2

ÖZET

Son yıllarda sanayileşmenin artması ile birlikte enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonunun artması gibi çeşitli sebepler işletmeleri, imalat süreçlerini çevre bilinci ile gerçekleştirmeye yönlendirmiştir. Çevreye olan zararlı etkilerin azaltılmasının yanı sıra enerji tüketiminin işletmelerde imalat maliyetlerini arttıran önemli unsurlardan biri olması da bu konuda çalışma yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Çevre bilinci ile imalat süreçlerinin gerçekleştirilmesi; çevrenin zarar görmesinin önlenmesi ile sürdürülebilir bir imalat ortamının sağlanabilmesi, enerji maliyeti gibi büyük maliyetlerin azaltılması ve rekabet avantajı gibi birçok yarar sağlamaktadır. İşletmeler açısından çevre bilinçli bir üretimi gerçekleştirmek için uygun yeni teçhizatların alımı, sistem ve makine kurulumları yapılabileceği gibi mevcut üretim proseslerinde de düzenlemeler yapılabilmektedir. Özellikle işletmelerde yapılacak işlerin belirli hedefler doğrultusunda hangi operasyonlarının hangi makinelerin kullanımı ile hangi sırada yapılacağına belirlendiği çizelgeleme çalışmalarının daha az maliyetli olması ve daha kolay uygulanabilir olması sebebiyle, bu alanda yapay zeka tekniklerinden de yararlanılan birçok çalışma yapılmıştır. Çizelgeleme çalışmalarında imalatın süresinin, maliyetlerinin, gecikmelerinin azaltılması hedefleri ile uzun yıllar çalışmalar yapılmış, son yıllarda çevresel konuların öne çıkması ile enerji tüketim miktarının, enerji maliyetlerinin, sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çevresel hedeflerin de dahil edildiği çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada atölye tipi bir imalat ortamında, klasik bir imalat hedefi olan maksimum tamamlanma zamanının azaltılması ile çevresel açıdan önemli olan toplam enerji tüketiminin azaltılması hedeflerinin birlikte gerçekleştirilmesinin istendiği, çok amaçlı enerji verimli bir atölye çizelgeleme probleminin çözümüne odaklanılmıştır. Birçok çizelgeleme probleminin çözümünde uygulanmış bir algoritma olan NSGA-2 (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-2) yöntemi ile çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan WASPAS (Bütünleşik Ağırlıklı Toplam ve Çarpım Yöntemi) yöntemi entegre edilerek WSBNSGA-2 (WASPAS Tabanlı NSGA-2) önerilmiş ve çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme test problemleri üzerinde uygulanmıştır. Uygulamalarda kullanılmak üzere, Taguchi Deney Tasarımı yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Öncelikle algoritmanın performansında etkili olabilecek parametreler ile faktörler ve seviyeler belirlenmiştir. Bu faktör ve seviyeler ile Minitab programında Taguchi tasarımı yapılarak 9 farklı parametre kombinasyonuna sahip deney seti elde edilmiştir. Bu kombinasyonların her biri için WSBNSGA-2 ve NSGA-2 ayrı ayrı 5'er tekrarlı olarak uygulanmıştır. Her bir parametre kombinasyonu için yapılan 5 tekrar sonucunda elde edilen *TEC* (toplam enerji tüketimi) ve *C_{maks}* (maksimum tamamlanma zamanı) değerlerinin ayrı ayrı ortalamaları sonuç değerleri olarak kullanılmıştır. Hesaplanan *TEC* ve *C_{maks}* değerlerinin birlikte değerlendirilebilmesi için bu değerlere min-maks normalizasyonu ile normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon yapılan değerler iki problem hedefi de eşit önem düzeyine sahip olacak şekilde ağırlıklandırılarak toplanmış ve *Minf(x)* değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile

Taguchi analizi yapılarak en iyi sonuç veren parametreler belirlenmiştir. ANOVA testi ile Taguchi yöntemi sonuçları analiz edilmiş ve parametrelerin sonuca katkıları değerlendirilmiştir. Taguchi ile belirlenen parametrelerin etkinliğinin değerlendirilebilmesi için parametre belirleme sürecinde hesaplanan $Minf(x)$ değerleri ve test problemleri üzerinde belirlenen parametrelerin kullanımıyla hesaplanan $Minf(x)$ değerlerinden yararlanılmıştır. Bu değerlerin ortalamalarının kıyaslanması ile belirlenen parametrelerin etkin olduğu ve uygulanabilirliği görülmüştür. Test problemleri üzerinde Taguchi ile belirlenen parametreler kullanılarak yapılan çok tekrarlı uygulama sonuçlarından yararlanılarak; minimum TEC , minimum C_{maks} , ortalama RPI (Bağıl Yüzdelik Artış) değerleri, ortalama $Minf(x)$ ve istatistiksel testler ile WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, önerilen yöntemin yüksek oranda başarı sağladığını ve yöntemin kullanımı ile bu problem türünde etkin çözüm elde edilebileceğini göstermiştir.



A NEW SOLUTION APPROACH FOR MULTI-OBJECTIVE ENERGY EFFICIENT JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM: WASPAS BASED NSGA-2

SUMMARY

Today, with the development of industry, there has been an increase in energy consumption and greenhouse gas emissions, which has led to negative consequences such as environmental pollution and global warming. Studies aimed at reducing environmental damage have gained importance in recent years due to these reasons, as well as the increase in operating costs along with the increase in energy consumption. Businesses have turned to designing their facilities and manufacturing processes with environmental awareness. Businesses can be enabled to manufacture with environmental awareness through various methods, such as providing more suitable machinery and equipment and developing existing manufacturing processes. In a manufacturing environment where existing machinery and equipment are used, it is a very effective option for businesses to focus on scheduling studies, which determine the order in which each operation will be performed, using which machinery and equipment, in a way that meets the specified targets. In scheduling studies, various manufacturing targets are determined, such as reducing the completion time and costs of the jobs and reducing the number of delayed jobs, and the job order is tried to be determined in order to achieve these targets in the optimum way. With the prominence of environmental issues, in addition to these manufacturing targets, environmental targets such as reducing energy consumption and greenhouse gas emissions while scheduling have also been included in the studies. In solving this type of problem, heuristic and metaheuristic algorithms have been frequently preferred in many studies.

In this study, a multi-objective energy efficient job shop scheduling problem is considered, where the makespan and total energy consumption are both targeted to be minimized. In order to solve the problem, a hybrid method, WSBNSGA-2 (WASPAS Based NSGA-2), was proposed and implemented by integrating the NSGA-2 (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) method, which is an algorithm applied to many scheduling problems in the literature, and the WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) method, which is a multi-criteria decision-making method. The applications are implemented by utilizing 15 multi-objective energy efficient job shop scheduling test problems of different sizes.

In the first phase of the application, the parameters on which the NSGA-2 and WSBNSGA-2 algorithms showed the best performance were tried to be determined. The population size, crossover rate and mutation rate parameters that can affect the performance of the algorithms are determined as factors, and 3 different values that can be preferred for each parameter are determined as the levels of these factors. As a result of processing the determined factors and levels into the Taguchi module in the Minitab program, 9 experiments with different parameter combinations were presented by the program. With these parameter combinations, NSGA-2 and WSBNSGA-2 methods were applied on 15 test problems with 5 repetitions for each

experimental combination. The average of TEC (total energy consumption) and C_{max} (maximum completion time) results obtained with 5 repetitions for each experimental combination was used as the result value of that experimental combination. In order to combine the TEC and C_{max} values into a single objective function value, the normalization process was applied using min-max normalization. As a result of normalization, the objective function values were calculated by assuming that the importance level of the problem's objectives was equal. These objective function values were used as the result values of Taguchi experimental combinations and the best parameters were determined by obtaining S/N graphs with the Taguchi Method for both algorithms in all problem sizes. ANOVA test was applied to the result values obtained with the Taguchi method. In all test problems, ANOVA test results were used for both algorithms to evaluate whether the parameters contributed to the results and the contribution rates of the contributing parameters. In order to evaluate whether more effective results can be obtained as a result of applying the parameters determined by the Taguchi method, both methods were applied on 15 test problems with 35 repetitions using the determined parameter values. While applying the WSBNSGA-2 method, the WASPAS method was used instead of the Fast Non Dominated Sorting step of the NSGA-2 method. The WASPAS method was applied with the chromosomes in the population as alternatives and the problem targets as criteria, and the chromosomes were assigned to the fronts with the order obtained as a result of WASPAS. The chromosomes in each front are sorted within themselves using Crowding Distance calculation values, as in the NSGA-2 method. Thus, a ranking was obtained for all chromosomes. With this order, chromosome pairs were determined for crossover and mutation operations. By crossover and mutation, new generations of individuals are produced and added to the population. Instead of Fast Non Dominated Sorting, which is applied by the NSGA-2 method in the process of eliminating chromosomes exceeding the N population size, the WASPAS method was applied again. Fronts were created using the WASPAS method and then the chromosomes in the fronts were ranked using Crowding Distance. Chromosomes exceeding the population size were eliminated from the population. TEC and C_{max} values were obtained by applying the algorithms 35 times to each of the 15 test problems. These results were normalized together with the TEC and C_{max} results calculated with the applications made in 9 experimental combinations. The objective function values were calculated using the normalized TEC and C_{max} values. The averages of the objective function values obtained with 35 repetitions were calculated. In all problems, the objective function values of 35 trials using the best parameters for both methods were compared with the application results made with 9 parameter combinations. As a result of the comparisons, it was seen that in all problems, better results were obtained with the parameters determined by Taguchi for both methods. This shows that Taguchi provides effective performance in parameter optimization.

The methods were applied by running them 35 times on test problems using the parameters determined by Taguchi. When the obtained results were evaluated in terms of TEC and C_{max} , it was seen that the WSBNSGA-2 method was superior to the NSGA-2 method in TEC values in 14 out of 15 test problems and in C_{max} values in 12 of them. RPI (Relative Percentage Increase) values were used as another criterion in the comparison of the methods. It was seen that the average RPI results obtained with the TEC values of the proposed method were better in all 15 test problems and in 12 of the results obtained with the C_{max} values. When the average $Minf(x)$ values of the 35 repeated results were examined separately for all problems, it was determined that the proposed method provided more successful results by reaching smaller values in 14

out of 15 problems. For the average $Minf(x)$ values, statistical methods were used to evaluate whether this success obtained by the proposed method was coincidental. First of all, it was statistically analyzed whether there was a significant difference between the means of $Minf(x)$ values obtained from 35 repeated applications on multi-objective energy efficient job shop scheduling problems with WSBNSGA-2 and NSGA-2 methods. In two of the 15 test problems, the best population size values determined by Taguchi were different for the two methods. Therefore, the two methods were applied using different starting populations in the applications on these test problems. In testing these results, 2 Sample t Test, a parametric test used in independent samples, was used. In the other test problems, the methods were applied on the same starting populations. Therefore, Paired Sample t Test, a parametric test used in dependent samples, was used. When the statistical results of the applications were examined; While the WSBNSGA-2 method obtained more successful results in 12 of the 15 test problems, it was seen that there was no statistically significant difference between the results of the two methods in 3 test problems. The comparisons show that the WSBNSGA-2 method is more successful than the NSGA-2 method in most of the multi-objective energy efficient job shop scheduling test problems and is an applicable method in this problem type.



1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun artması, sanayileşme, doğal kaynakların hızlı tüketimi, birçok canlı türünün yok olması, küresel ısınma gibi çeşitli sebepler çevresel konulara olan hassasiyeti arttırmıştır. İşletmeler açısından değerlendirildiğinde, ürün kalitesinin yanı sıra çevreye olan olumsuz etkilerin en aza indirilmesi konusu da bu sebeple son yıllarda önem kazanmıştır. Çevre bilinci, işletmeler için hem rekabet avantajı sağlayan bir etken hem de toplumsal açıdan bir sorumluluk halini almıştır. İşletmelerin çevre bilinci ile faaliyetlerini gerçekleştirmesi için birçok ülkede çeşitli yaptırımlar getirilmiş ve düzenli denetimler ile sürekliliğinin sağlanması hedeflenmiştir.

Sanayileşmenin, çevrenin zarar görmesinde büyük etkisi olduğu birçok araştırmada gözlemlenmiştir. Mouzon vd. tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada; son 50 yılda sanayideki enerji tüketiminin önceki yıllara kıyasla yaklaşık 2 katı kadar artış gösterdiği, ayrıca petrol ve kömür gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımının artması ile birlikte küresel ısınmanın da arttığı belirtilmiştir [1]. Sanayide yüksek miktarlarda enerji tüketilmesi ve sera gazı salınımı Dünya çapında sürdürülebilir üretim konusunda birçok çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Sürdürülebilir üretim kavramının ortaya çıkması, çevrenin zarar görmesinin temelinde sanayinin geliştiği ülkelerde sürdürülemez tüketim ve üretim olduğunun vurgulandığı 1992 yılında yapılan Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'na dayanmaktadır [2]. Sürdürülebilir üretimin gerçekleştirilmesi için büyük önem taşıyan 6 unsur, Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Üretimde Sürdürülebilirliğin Unsurları [3].

Şekil 1.1 incelendiğinde klasik üretim anlayışında büyük öneme sahip olan üretim maliyetinin yanı sıra sürdürülebilir üretim kavramı ile personel sağlığı, operasyonel güvenlik gibi sosyal unsurların ve güç tüketimi, çevre dostu, atık yönetimi gibi çevresel unsurların dahil olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir üretimin unsurlarının, üretimde çevre konularına ağırlık verilerek belirlendiği açıkça görülmektedir.

Sanayide enerji tüketiminin azaltılması, hem üretim maliyetini etkilemesi sebebiyle hem de enerji tüketiminin sera gazı emisyonunun yaklaşık %80'lik kısmını oluşturması sebebiyle oldukça önemlidir [4]. Enerji verimli üretim gerçekleştirebilmek için işletmelerin, yeni tesisler satın alması veya kurması yüksek maliyetlere sebep olacağından üretim planlamanın bir parçası olan çizelgeleme faaliyetlerinin enerji verimli yapılması oldukça etkili ve daha az maliyetli bir seçenek olacaktır [5]. Sürdürülebilir üretim ortamında çizelgeleme konusunda yapılan çalışmaların başlangıcı 2007 yılında Mouzon vd. tarafından yapılan çalışmaya dayanmaktadır [1, 6]. Son yıllarda üretim çizelgeleme faaliyetlerinde maksimum tamamlanma zamanı, maksimum gecikme, ortalama akış süresi gibi temel üretim hedeflerinin yanı sıra sürdürülebilirlik unsurlarına da sıklıkla yer verilmiştir. Sürdürülebilir üretim

ortamında çevre konularının öne çıktığı yeşil çizelgeleme olarak adlandırılan çizelgeleme problemi kapsamında, çalışmalarda temel üretim hedeflerinin yanı sıra enerji tüketimi ve emisyonun azaltılması hedeflerine de yer verilmeye başlanmıştır. İşlerin temel üretim hedeflerini optimum düzeyde sağlayacak şekilde makinelerde hangi sıra ile yapılacağının belirlendiği klasik üretim çizelgeleme problemleri gibi enerji tüketimi gibi çevresel hedeflerin de dahil edildiği yeşil çizelgeleme problemleri de NP-Zor sınıfında yer alan problemlerdir. Bu türdeki problemlerin çözümünde kesin sonuçlara ulaşmayı sağlayan matematiksel metotların yetersiz kalması sebebiyle literatürde birçok çalışmada uygulanmış olan sezgisel ve metasezgisel evrimsel yaklaşımlardan yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları genetik algoritma, karınca kolonisi algoritması ve yapay arı kolonisi algoritmasıdır. Yapılan bir araştırmada, enerji tüketiminin en aza indirilmesinin hedeflendiği yeşil çizelgeleme problemi üzerine yapılan çalışmaların yaklaşık %59'unun çözümünde evrimsel algoritmaların kullanıldığı görülmüştür [7].

Bu çalışmada, maksimum tamamlanma zamanı ve toplam enerji tüketiminin birlikte en aza indirilmesinin hedeflendiği atölye ortamında, çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır. İşlerin operasyonlarının makinelerde problem hedeflerini sağlayacak şekilde hangi sıra ile yapılacağının belirlenmesi hedeflenmiştir. Problemin çözümünde literatürde geniş yer bulan, çalışmalarda geliştirilen algoritmaların kıyaslanmasında sıklıkla tercih edilen, metasezgisel yöntemlerden genetik algoritma temel alınarak geliştirilmiş olan NSGA-2 algoritması uygulanmıştır. NSGA-2 algoritmasının çok amaçlı probleme çözüm sağlamada performansını arttırmak amacıyla, son yıllarda çalışmalarda algoritmalar ile birlikte uygulanmaya başlayan, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan WASPAS entegre edilerek WSBNSGA-2 yöntemi önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın başarısı 10, 20, 30, 40 ,50 iş sayılarından ve 10, 15, 20 makine sayılarından oluşan 15 farklı çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme test problemi üzerinde 35 tekrarlı denemelere ait sonuçların karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalarda t testleri, ortalama $Minf(x)$, minimum C_{maks} , minimum TEC ve ortalama RPI sonuçlarından yararlanılmıştır.



2. ÇİZELGELEME

Çizelgeleme, imalat ve hizmet alanında kısıtlı kaynakların en uygun şekilde atanması olarak nitelendirilebilen bir süreçtir. Üretim, lojistik, depolama gibi birçok sistemin başarılı bir şekilde yürütülebilmesinde çizelgeleme önemli bir yere sahiptir [8]. Çizelgeleme çalışmalarına yönelik yapılan araştırmaların başlangıcı 1950'li yıllara uzanmaktadır [9]. Literatürde, çizelgeleme problemi olarak adlandırılan bu problemler özellikle imalatta üzerinde durulan konulardan biridir. İmalat çizelgeleme, yapılacak işin ms adet makineye belirlenen hedefi/hedefleri optimum düzeyde sağlayarak atanması olarak ifade edilebilir. Literatürde farklı özelliklerdeki imalat ortamlarının çizelgelenmesine yönelik birçok çalışma mevcuttur. 1980'li yıllara kadar tek amacın optimum düzeyde gerçekleştirilmesinin hedeflendiği çalışmalar yapılırken, gelişen endüstri ile işletmeler arasındaki rekabet artmış ve birden fazla amacın aynı anda optimizasyonun hedeflendiği çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [10]. Birden fazla hedefin birlikte değerlendirildiği çalışmalarda problem, çok amaçlı çizelgeleme problemi olarak ele alınmaktadır. Bu problemlerde aynı anda optimum düzeyde olması istenen iki veya daha fazla ölçütün ayrı ayrı değerlendirilmesi yerine, bu ölçütlerin birlikte optimum düzeylere ulaşması sağlanmaya çalışılır. Tek amaçlı uygulamalarda genellikle maksimum tamamlanma zamanının minimum düzeyde olması hedeflenerek çizelgeleme çalışmaları yapılmıştır. Maksimum tamamlanma zamanı kriteri, imalatta hedeflerin en önemlisi olarak görülmektedir [11]. Başka kriterlerin de değerlendirmeye dahil edilmesi ihtiyacı ile daha sonra maksimum tamamlanma zamanının minimizasyonunun yanı sıra ortalama ve maksimum akış süreleri, ortalama ve maksimum gecikme, geciken iş sayısı gibi kriterlerin minimizasyonu veya başka kriterlerin maksimizasyonu hedefleri de çalışmalarda ele alınmıştır. Çok amaçlı çizelgeleme problemlerinde problem hedefini ifade eden amaç fonksiyonu, sağlanması istenen tüm kriterleri içerecek şekilde oluşturulabilmektedir.

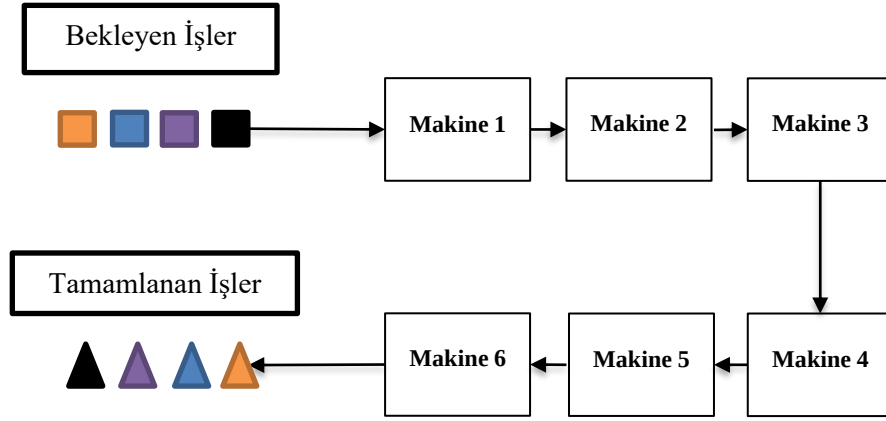
Çizelgeleme problemleri, iş ve makine sayısının fazla olduğu durumda karmaşık bir hale gelmekte ve bu nedenle bu problemlerin çözümünde kesin sonuçlara ulaşmayı sağlayan matematiksel metotlar kullanılamamaktadır. Çizelgeleme problemleri genellikle P veya NP problem sınıfları ile ifade edilmektedirler [12]. Endüstriyel

ortamdaki çizelgeleme problemleri yapılacak işin ve kullanılan makinenin sayısının fazla olması sebebiyle oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Chen ve Bulfin tarafından 1993 yılında yapılan çalışmada tek makine problemlerinin çok amaçlı örneklerinde, problemlerin NP-Zor problemler sınıfına dahil olduğu gösterilmiştir [13]. Böylece ölçüt sayısının artışının da problemi zorlaştırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. NP-Zor sınıfında yer alan çizelgeleme problemlerinin çözümünde genellikle yüksek kalitede ve kabul edilebilir bir sürede yaklaşık çözümler sağlayan metasezgisel yöntemler kullanılmaktadır [14]. Genetik algoritma, yapay arı algoritması, karınca kolonisi algoritması, tavlama benzetimi literatürde bu problemler üzerinde sıklıkla uygulanan ve etkin çözümler sağlayan yaklaşımlardan bazılarıdır.

Literatürde oldukça geniş bir çalışma alanına sahip olan çizelgeleme problemlerinin birçok çeşidi bulunmaktadır. Çizelgeleme problemleri başlangıçta probleme ait parametrelerin belirli olduğu durumda statik, belirsiz ve değişken olduğu durumda ise dinamik çizelgeleme problemleri olarak iki grupta incelenmektedir. İşlerin tek makine üzerinde çizelgelenmesinin hedeflendiği problemler tek makine, birden fazla makinenin kullanıldıkları ise çok makine problemleri olarak ele alınmaktadır. İşler makinelerde aynı rotayı takip ederek işleniyorsa problem akış tipi, farklı rotaları takip ederek işlenebiliyorsa bu durumda ise atölye tipi çizelgeleme olmak üzere iki ayrı grupta değerlendirilmektedir. Literatürde akış ve atölye tipi çizelgeleme problemleri en çok üzerinde durulan çizelgeleme türleri olmakla birlikte, bu problem türleri üzerine yapılan oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır.

2.1. Akış Tipi Çizelgeleme

Akış tipi çizelgeleme, is adet işin ms adet makinede aynı sırayı takip edecek şekilde işlem gördüğü ve işlerin birbirlerine göre işleme tabi tutulma önceliğinin belirlendiği problemlerdir. Akış tipi çizelgeleme problemlerine yönelik çalışmaların başlangıcı Johnson'ın 1954 yılındaki çalışmasına dayanmaktadır [15]. Akış tipi çizelgeleme problemlerinin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Akış tipi çizelgeleme.

Uygulama şekli bakımından akış tipi hat ile montaj hattı birbirine benzetilmektedir. Fakat bazı farklılıklar ile bu iki model birbirinden ayrılmaktadır. Aşağıda üç madde halinde belirtilen farklılıklar sebebiyle Heller tarafından 1959 yılında yapılan çalışma ile akış tipi imalat ortamı tutucu bir montaj hattı olarak ifade edilmiştir [16].

1. Montaj hattında tüm işler tüm makinelerde işlem görmekte iken, akış tipi atölyede işlerin gereksinimleri doğrultusunda bazı makinelerde işlem uygulanmayabilir.
2. Montaj hattında iş istasyonları birbirine bağlı iken akış tipi imalat ortamında tüm makineler birbirinden bağımsızdır.
3. Montaj hattında tüm işlerin iş istasyonlarında standart bir işlem süresi varken akış tipi imalat ortamında işlerin makinelerde birbirlerinden bağımsız olarak kendilerine ait işlem süreleri bulunmaktadır.

Akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünün yapılabilmesi amacıyla işler, makineler veya işletme politikaları açısından birçok varsayım kabul edilmektedir. Akış tipi çizelgeleme problemlerinin bazı temel varsayımları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [17].

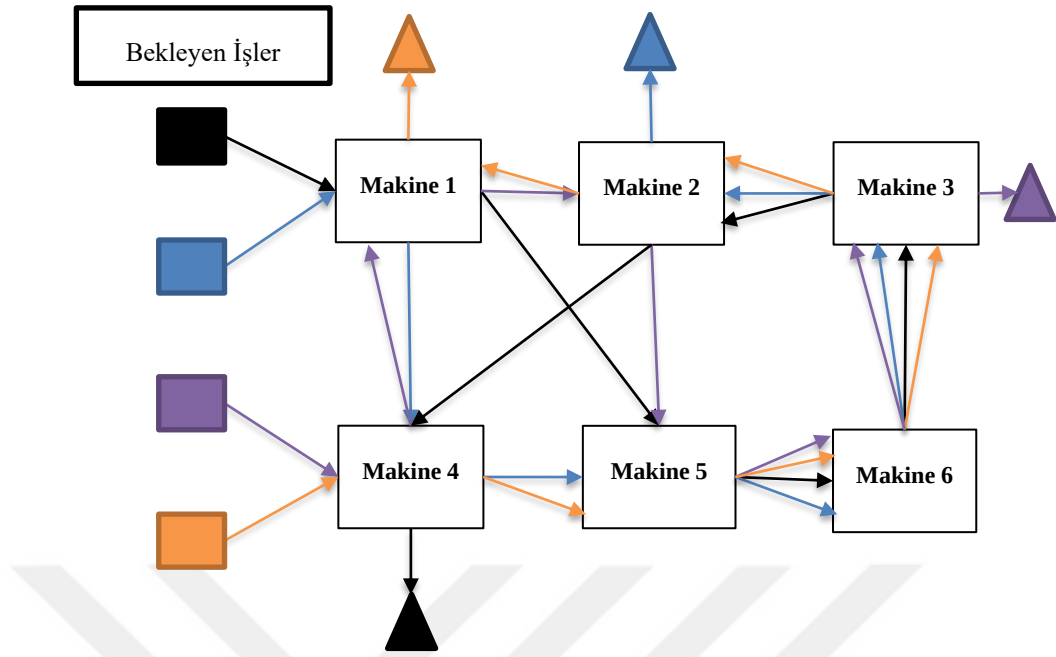
1. Her iş başlangıç anında işlenmek için hazır bulunur.
2. İşlerin tamamı birbirinden bağımsız kabul edilir.
3. İşlerin operasyonlarının her birinin gerçekleştirilmesinde yalnızca bir makine kullanılır.

4. İşlerin makinelerde bilinen ve sonlu işlem süreleri bulunmaktadır ve taşıma, kurulum vb. süreler işlem süresine dahil olarak kabul edilmektedir. İşlerin hesaplanan işlem süreleri birbirinden bağımsızdır.
5. İşlerin her biri bir makinede yalnızca bir defa işleme tabi tutulur.
6. Sistemdeki her iş merkezinde yalnızca bir makine vardır ve bu makinelerin her birinden yalnız bir tane mevcuttur.
7. Makinelerin başlangıç anında boşta ve işlem yapmaya hazır olduğu kabul edilmektedir.
8. Makinelerin her biri aynı anda yalnızca bir tane işin bir tane operasyonunu yapabilmektedir.
9. Makinelerin süreç tamamlanıncaya kadar arıza, bakım vb. herhangi bir durum sebebiyle çalışmalarının kesintiye uğramadığı kabul edilir.
10. İşler belirlenen sıra ile işlenir ve hiçbir iş atlanmaz.

Akış tipi çizelgeleme problemlerinde imalat ortamında aynı işlemi gerçekleştirmek için aynı özelliklere sahip birden fazla makinenin bulunduğu durumlarda, problem literatürde esnek akış tipi çizelgeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Bu problem türünde akış rotasına sağlanan esneklik ile problem zorlaşmaktadır. Esnek akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümüne yönelik çalışmalarda sezgisel yaklaşımlar ve geliştirilen hibrit metotların birçok uygulaması bulunmaktadır.

2.2. Atölye Tipi Çizelgeleme

Atölye tipi çizelgeleme problemi birkaç işlemten oluşan is adet işin ms adet makinede farklı rotaları izleyerek işleme tabi tutulduğu ve belirlenen hedefler doğrultusunda işlerin hangi sırada makinelerde işleneceğinin belirlenmesinin hedeflendiği bir problem türüdür. Bu problem türünün NP-Zor sınıfında yer alması sebebiyle, problemin optimal çözümünün elde edilmesi zordur [18]. Matematiksel yöntemlerle kabul edilebilir bir sürede çözüm sağlanamaması sebebiyle geliştirilen sezgisel ve metasezgisel yaklaşımların kullanılması ile kısa zamanda yaklaşık optimal çözüm elde edilmektedir. Atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde Dal-Sınır Algoritması, Lagrange Gevşetmesi, Lokal Arama ve Yapay Sinir Ağları gibi çok sayıda yöntem kullanılmaktadır [19]. Atölye tipi çizelgeleme problemlerinin yapısı Şekil 2.2’de yer alan örnek üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Atölye tipi çizelgeleme.

Atölye tipi çizelgeleme problemlerine çözüm ararken kabul edilen bazı varsayımlar aşağıda sıralanmıştır [20].

1. Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde işler makinelerden her birini işlem süresi boyunca kullanmaktadır.
2. Makinelerin her biri aynı anda yalnızca bir işe işlem uygulayabilmektedir.
3. Bir makinede bir işe işlem yapılmaya başlandığında bu işlem tamamlanıncaya kadar makinenin kesintisiz olarak çalıştığı kabul edilmektedir.
4. İşler belirli bir sıraya göre makinelerde işlenmektedir.

Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde aynı özelliklere ve işleve sahip makine sayısının birden fazla olması durumunda problem esnek atölye tipi çizelgeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Esnek atölye tipi çizelgeleme problemi, atölye tipi imalat ortamı ile paralel makinelerin bulunduğu imalat ortamının bir araya getirilmiş hali olarak değerlendirilebilir [21]. Esnek atölye çizelgeleme problemlerinde iş sayısının ikiden fazla olduğu durumda problem, NP-Zor problemler arasında yer almaktadır [11].

Çalışmada, başlangıç anından en son iş tamamlanıncaya kadar makineler tarafından süreç boyunca harcanan toplam enerji (boşta kalma ve çalışma süresince harcanan) miktarını ifade eden toplam enerji tüketiminin minimizasyonu (2.1) ve başlangıç

anından sistemden en son çıkan işin tamamlanma zamanına kadar olan toplam süreyi ifade eden maksimum tamamlanma zamanının minimizasyonu (2.2) hedeflerinin birlikte sağlanması istenmektedir. Atölye tipi bir imalat ortamındaki işlerin, makinelerdeki işlem sıralarının belirlenmesi hedeflenmektedir. NP-Zor sınıfında yer alan bu problem türünün çözümünde sezgisel algoritmaların kullanımı ile optimal çözüme ulaşılması hedeflenmiştir. Çözüm yöntemi olarak yeni bir yaklaşım önerilmiş ve uygulanmış, elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve istatistiksel analizi ile başarısının değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Problem hedefleri;

$$f_1 = \text{Min}(TEC) \quad (2.1)$$

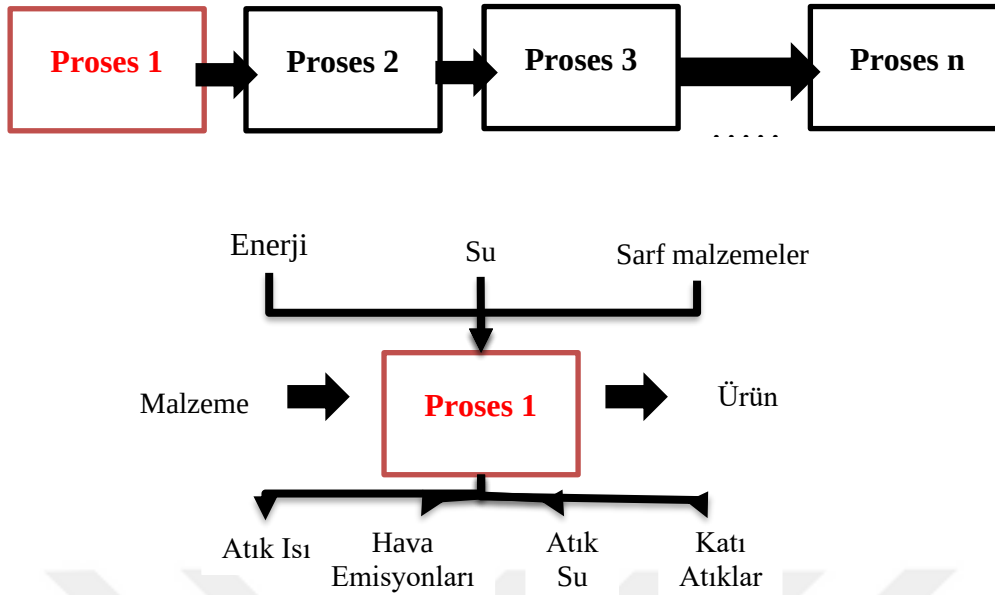
$$f_2 = \text{Min}(C_{\text{maks}}) \quad (2.2)$$

2.3. Yeşil Çizelgeleme

Son yıllarda nüfus artışı ve sanayinin gelişimi ile birlikte doğal kaynaklar hızla tüketilmekte ve çevre kirliliği artmaktadır. Bu durum çevre bilincini arttırmış ve işletmelerin faaliyetlerinde çevresel konuları öne çıkarmıştır. İşletmeler arasındaki rekabet, teşvikler, zorunlu yaptırımlar gibi sebepler üretim yapan işletmeleri yeşil üretim faaliyetlerine yönlendirmektedir [22]. Yeşil üretim, atıl kaynak tüketiminin ve emisyonların azaltılması gibi uygulamalar ile çevreye olan etkinin minimum düzeyde olması için sistem faaliyetlerindeki tasarım ve mühendislik uygulamalarının sürdürülebilirlik çerçevesinde gerçekleştirilmesi olarak ifade edilebilir [23]. Yeşil üretim, son yıllarda önem kazanan sürdürülebilir üretimin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Sürdürülebilir bir üretimin önemli üç parçasını üretimin ekonomik, sosyal ve çevresel olması oluşturmaktadır. Zaman içerisinde tüketicilerin çevreye olan duyarlılığı üreticilerin de bu konuda daha hassas davranmasına sebep olmuş ve özellikle imalat yapan işletmeleri, yenilikler yapmaya yönlendirmiştir. Burada sürdürülebilirliğin sosyal yönünün sağlanabilmesi, üretimde sosyal sorumluluk bilincini gerektirmektedir [22]. Üretimde sosyal bilincin sağlanması ve uygulamaların ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmesi kadar üretimin çevresel olması konusu da sürdürülebilir bir üretimin vazgeçilmez bir parçasıdır. Özellikle çeşitli sektörlerde imalat faaliyetlerinin yüksek oranda enerji tüketimine sebep olması ve imalat

işlemlerinin sonucunda oluşan yüksek oranlarda karbondioksit, azot, metan gibi sera gazlarının emisyonu çevreyi tehdit etmekte, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi ciddi olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır.

Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nde ortaya konulan bilgiler ışığında 1990 yılından 2100 yılına kadar olan süreçte küresel sıcaklıkta yaklaşık 5,8 dereceye kadar çıkabilecek artışın beklendiği belirtilmiştir [24]. Sanayileşen birçok ülkede sera gazı salınımının azaltılması hedeflenerek 1997 yılında Kyoto protokolü kabul edilmiş ve 2005 yılında bu protokol uygulanmaya başlanmıştır [25]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın Dünya'daki toplam enerji tüketimi miktarlarında sektörlerin payına ait yıllık verileri çerçevesinde; ulaşım, ticari ve kamu hizmetleri, yerleşim gibi birçok alanda 2005 yılından itibaren en yüksek enerji tüketiminin endüstriyel faaliyetler ile gerçekleştiği tespit edilmiştir [26]. ABD Bilgi İdaresi'nin verileri ışığında Dünya'daki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %50'sinin sanayi tarafından tüketildiği görülmüştür [11]. Ayrıca yapılan çalışmalar ile enerji tüketiminde ABD'de %54'lük Brezilya'da ise %44'lük payın sanayiye ait olduğu ve enerji tüketiminin atmosferdeki sera gazı miktarının artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir [27]. Dornfeld tarafından yapılan çalışmada ABD'de tıp, madencilik, imalat, tarım gibi sektörlerin oluşturduğu atık miktarları kıyaslandığında 6 milyar metreküpe yakın atık miktarı ile imalat sektörünün diğer sektörlerden oldukça yüksek bir fark ile fazla atık miktarına sebep olduğu görülmüştür [22]. Geçmişten bu yana Dünya'da zaman zaman toplumlarda çevresel kaygılar var olmakla birlikte, Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (WECD) tarafından da 1989 yılında mevcut uygulanan düzenin Dünya'daki canlılar üzerinde etkisinin olduğu raporlamıştır [28]. Tüm bu sebepler neticesinde yeşil uygulamaların son yıllarda imalata entegre edilmesi önemli araştırma konularından biri olmuştur [28]. Bir imalat prosesi sırasında ortaya çıkan atıklar Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Proses zinciri analizi girdi ve çıktıları [22].

İmalatın planlanmasındaki birçok aşamada çevreye verilen zararın en aza indirilmesi konuları üzerine son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Özellikle imalat planlamada önemli bir yeri olan çizelgeleme faaliyetlerinin çevre bilinci ile gerçekleştirilmesi hedeflenerek literatürde yer alan yeşil çizelgeleme kavramı ortaya çıkmıştır. Yeşil çizelgeleme, zaman kısıtı ve teknolojik kısıtlar altında kaynak kullanımı, üretim maliyetleri vb. hedefleri optimum düzeyde sağlarken aynı zamanda çevreye olan olumsuz etkilerin de minimum düzeyde tutulmasının hedeflendiği iş rotasının belirlenmesi olarak tanımlanabilir [29]. İmalatta yeşil çizelgeleme faaliyetlerinde optimum olması istenen hedefler sera gazlarının azaltılması olabileceği gibi, enerji ve su gibi kaynak tüketiminin azaltılması yönünde de olabilir. Genellikle yapılan çalışmalarda çevresel hedefler, imalat çizelgelemede en önemli hedefler ile birlikte değerlendirilmektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İmalat çizelgeleme problemlerinde çevreye olan olumsuz etkilerin en aza indirilmesinin hedeflendiği, üretimde sürdürülebilirlik kapsamında enerji ve emisyonu azaltmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Mouzon ve Yıldırım tarafından, imalatla tek makine üzerinde işlerin çizelgelenmesi sırasında, toplam enerji tüketimi ve toplam gecikmenin birlikte en aza indirilmesi hedeflemiş ve Ağgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü metodu geliştirilerek Toplam Enerji ve Toplam Gecikmeyi Minimize Etmek İçin Çok Amaçlı GRASP metodu önerilmiştir [30]. Uygulama sonucunda toplam gecikmenin azalması ile toplam enerji tüketiminin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan birçok uygulama arasından en uygun çözümün belirlenmesinde Analitik Hiyerarşi Prosesi uygulanmıştır.

Fang vd. akış tipi çizelgeleme problemlerine maksimum tamamlanma zamanı, toplam güç tüketimi ve karbon ayak izi kriterlerinin minimum olmasının hedeflendiği yeni bir yaklaşım sağlamıştır [31]. İki makineli, 6 ve 36 işten oluşan akış tipi çizelgeleme problemleri ile uygulamalar yapmış, makine sayısı ve çevresel kriterlerin artışı ile daha da büyük boyutlara ulaşabilecek bu tür problemlerin çözümünde mevcut optimizasyon tekniklerinin yeterliliğini ve yeni algoritmaların geliştirilmesinin gerekliliğini araştırmıştır. Yıldırım vd. tarafından tek makineli atölye çizelgelemede toplam tamamlanma süresi ve toplam enerji tüketimini minimum düzeye getirmeyi hedefleyen çok amaçlı bir genetik algoritma olan Toplam Enerji Tüketimini ve Toplam Tamamlanma Süresini En Aza İndirmek İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma önerilmiştir [32]. Önerilen metodun 4 farklı varyasyonu problemler üzerinde uygulanmış ve performansı değerlendirilmiştir.

May vd. tarafından enerji tasarruflu atölye çizelgelemede optimum çözüm elde etmek amacıyla, NSGA-2 ve SPEA-2 algoritmalarından yararlanılarak GGA önerilmiştir [33]. Önerilen metodun performansı farklı büyüklüklerdeki problemler üzerinde farklı makine davranışları ile oluşturulan 4 politika çerçevesinde, maksimum tamamlanma zamanı ve değersiz enerji tüketimi kriterlerinin sonuçlarındaki değişim izlenerek değerlendirilmiştir. Liu vd. tarafından proses dışı elektrik tüketimi ve toplam ağırlıklı

gecikmenin optimizasyonunun hedeflendiği atölye çizelgeleme probleminde NSGA-2 algoritması temel alınarak geliştirilen Atölye Üretiminde Elektrik Tasarrufu için Genetik Algoritma metodu uygulanmıştır [34]. Metodun performansı NSGA-2 ve LEKIN ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Li vd. tarafından toplam maliyetin belirli bir kısıta sahip olduğu atölye ortamında, işlerin atölyede çizelgelenmesi amacıyla geliştirilen sezgisel bir yöntemden yararlanılmıştır [35]. Toplam maliyet, paralel ve aynı çalışma hızına sahip makinelerin enerji ve temizlik maliyeti ele alınarak hesaplanmıştır. Geliştirilen sezgisel metot farklı iş ve makine sayılarına sahip problemler üzerinde uygulanmıştır. Algoritmanın performansı CPLEX ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Zheng ve Wang tarafından Meyve Sineği Optimizasyonu Algoritması, kaynak kısıtlı ilişkisiz paralel makinelerden oluşan yeşil çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiştir [36]. Önerilen işbirlikçi çok amaçlı Meyve Sineği Optimizasyonu Algoritması maksimum tamamlanma zamanı ve karbon emisyonu kriterlerinin optimizasyonunun hedeflendiği, farklı iş ve makine sayılarından oluşan problemler üzerinde uygulanmıştır. Önerilen algoritmaya ait sonuçlar, farklı Meyve Sineği Optimizasyonu algoritmaları ve NSGA-2 algoritması uygulandığında edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Mansouri vd. tarafından atölyede işlerin iki makine kullanılarak çizelgelenmesinde toplam enerji miktarı ve maksimum tamamlanma zamanı kriterlerinin minimizasyonunun hedeflendiği farklı iş sayılarından oluşan problemler ele alınmıştır [37]. Problemler üzerinde, geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal bir optimizasyon metodu uygulanmıştır. Metodun başarısı CPLEX uygulaması ile elde edilen sonuçlarla iki yönlü ANOVA testinden yararlanılarak değerlendirilmiştir. Cota vd. tarafından sıra bağımlı hazırlık zamanlı, değişken hızda çalışan paralel makineler kullanılan imalat ortamında üretim süresinin ve toplam elektrik tüketiminin minimizasyonunun hedeflendiği bir yeşil çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve Çok Amaçlı Akıllı Havuz Arama Matematiksel yöntemi uygulanmıştır [27].

Gong vd. tarafından çalışanların ve makinelerin esnek olduğu bir çift esnek atölye çizelgeleme problemi önerilmiştir [38]. Önerilen problemin çözümünde genetik algoritmanın kromozom kodlama, çaprazlama ve mutasyon adımlarında çeşitli yenilikler yapılarak geliştirilen NHGA, NSGA-2 ile kıyaslanarak insan, zaman ve

yeşil üretim faktörleri de değerlendirilerek uygulanmıştır. Meng vd. tarafından ilişkisiz paralel makinelerin bulunduğu üretim ortamında enerji duyarlı akış tipi çizelgeleme problemi ele alınmış, problemin modellenmesi beş farklı şekilde gerçekleştirilmiş ve beş farklı model birbiri ile kıyaslanmıştır [39]. Problem türünün çözümünde IGA yöntemi önerilmiş ve test problemleri üzerinde uygulanmıştır. Önerilen algoritmanın performans değerlendirmesinde GA, SA ve MBO yöntemleri referans alınmıştır. Jiang vd. tarafından toplam enerji tüketimi ve gecikme maliyetinin minimum olmasının hedeflendiği atölye çizelgeleme problemine çözüm sağlamak amacıyla, DMGWO yöntemi geliştirilmiştir [40]. Geliştirilen algoritma, Gri Kurt Optimizasyon algoritmasının tek ve çift arama modları ile oluşturulan iki ayrı türünden yararlanılarak değerlendirilmiştir.

Jiang vd. tarafından toplam enerji tüketim maliyetinin ve tamamlanma süresi maliyetinin minimum olmasının hedeflendiği enerji tasarruflu bir atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır [41]. Problemin çözümünde kullanılmak üzere IWOA yöntemi önerilmiştir. Önerilen algoritmanın farklı varyasyonları da uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Önerilen IWOA metodunun problem türünün çözümünde sağladığı avantaj Genetik Algoritma 1, Genetik Algoritma 2 ve TLBO algoritmasının sonuçları ile kıyaslanarak gösterilmiştir. Lei vd. tarafından toplam enerji tüketiminin aşmaması gereken bir sınırın belirlendiği esnek atölye çizelgeleme problemine çözüm elde etmek amacıyla, ICA ile VNS metotlarına dayanan TPM yöntemi geliştirilmiştir [42]. Geliştirilen metodun performansının değerlendirilmesinde çeşitli problemler üzerinde NSGA-2 ve VNS ile elde edilen sonuçlarla kıyaslama yapılmıştır. Wang vd. tarafından çok amaçlı esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümünde NSGA-3 (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III) modifiye edilerek uygulanmıştır [43]. Maksimum tamamlanma zamanı, iş yükü dengesi, erken tamamlanma ve gecikme, maliyet, kalite, enerji tüketimi kriterlerinin birlikte optimum olmasının hedeflendiği 10 problem üzerinde önerilen NSGA-3 algoritmasının performansı farklı tekniklerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Foumani ve Smith-Miles tarafından karbon emisyonu ve maksimum tamamlanma zamanı kriterlerinin birlikte minimizasyonunun hedeflendiği yeşil akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde, geliştirilmiş bir karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemi uygulamış ve üç farklı karbon azaltma politikası çerçevesinde

uygun çözümler elde edilmeye çalışılmıştır [44]. Wu ve Sun tarafından maksimum tamamlanma zamanı, enerji tüketimi ve toplam açılan/kapanan makine sayısının minimum olmasının hedeflendiği esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümünde, yeşil bir NSGA-2 algoritması uygulanmış ve algoritmanın performansı farklı yazarlar tarafından 2013 yılında önerilen GSAA ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [11].

Zandi vd. tarafından toplam tamamlanma süresi ve süreç boyunca tüketilen toplam enerji miktarı kriterlerinin optimizasyonunun hedeflendiği yeşil paralel makine çizelgeleme probleminin çözümünde geliştirilen sezgisel bir metot kullanılmış, metodun başarısı GAMS ile yapılan uygulamalar ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak kanıtlanmıştır [45]. Uygulamalarda maksimum tamamlanma zamanı ve toplam enerji tüketiminin minimum olması hedeflenmiş, önerilen yaklaşımın performansı aralarında NSGA'2'nin de yer aldığı çeşitli metotlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Jiang vd. tarafından toplam enerji tüketim maliyeti ve tamamlanma süresi maliyetinin optimum olmasının hedeflendiği yeşil atölye çizelgeleme probleminin çözümünde, geliştirilen DWOA uygulanmıştır [46]. Önerilen metodun performansı MGA, MTLBO algoritması ve MDGWO metotlarıyla farklı boyutlardaki problemler üzerinde yapılan uygulamalarda elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Gong vd. tarafından insan ve makine esnekliği olan akış tipi çizelgeleme problemi modeli önerilmiş, önerilen problem türünde işlem süresi, enerji tüketimi ve işçi maliyetinin minimum olması problem hedefleri olarak belirlenmiştir [47]. Problemin çözümünde, geliştirilen bir Hibrit Evrimsel Algoritma uygulanmıştır. Çeşitli test problemleri üzerinde yapılan uygulamalar ile elde edilen sonuçların, N6 yerel arama prosedürünün eklendiği NSGA-2 ve NNIA metotlarıyla elde edilen sonuçlarla kıyaslanması ile önerilen metodun üstünlüğü gösterilmiştir.

Dai vd. tarafından enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanının minimum olmasının hedeflendiği ulaştırma kısıtlı esnek atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır [48]. Tezgahlar arasında taşımaların ve enerji tüketiminin de dikkate alındığı problemin çözümünde GA, PSO ve Tavlama Benzetimi Algoritması entegrasyonu ile EGA önerilmiştir. Önerilen metodun performansı MOGA ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Gong vd. tarafından dinamik elektrik fiyatının göz önünde bulundurulduğu esnek atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır [49]. Maksimum tamamlanma zamanı, toplam enerji maliyeti, toplam işgücü maliyeti, maksimum

makine iş yükü ve toplam makine iş yükü olmak üzere beş hedefin birlikte minimizasyonu hedeflenen problem türünün çözümünde, çok amaçlı esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümüne uyarlanmış NSGA-3 algoritması uygulanmıştır. Algoritmanın performansı birçok farklı çok amaçlı algoritma ile karşılaştırılmış ve algoritmanın üstünlüğü gösterilmiştir. Lu vd. tarafından enerji tüketim maliyetinin ve tamamlanma süresi maliyetinin toplamının optimum olmasının hedeflendiği esnek atölye çizelgeleme problemine, önerilen DWWO algoritması ile çözüm sağlanmıştır [50]. Önerilen yaklaşım, farklı büyüklüklerdeki enerji bilinçli esnek atölye çizelgeleme problemleri üzerinde yapılan uygulamaların sonuçları çerçevesinde MGA ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Luan vd. tarafından enerji tüketimi maliyeti ve işleme maliyeti toplamının minimum olmasının hedeflendiği düşük karbonlu esnek atölye çizelgeleme problemine, geliştirilen bir DWOA önerilerek çözüm elde edilmiştir [51]. Önerilen metodunun çeşitli varyantları birçok problem üzerinde uygulanmış ve genetik algoritma ile kıyaslanarak performansı değerlendirilmiştir. Mirahmadi ve Taghipour tarafından karbondioksit emisyonuna dayalı enerji kullanımının dikkate alındığı atölye ortamında, üretim ve bakım faaliyetlerinin çizelgelenmesi amacıyla stokastik bir matematiksel model önerilmiştir [52]. Maksimum tamamlanma zamanının minimum olmasının hedeflendiği modelin çözümünde genetik algoritma uygulanmıştır.

Tao vd. tarafından kaynak kısıtlılığının göz önünde bulundurulduğu, üretim süresi ve enerji tüketiminin birlikte en aza indirilmesinin hedeflendiği hibrit akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde Tavlama Benzetimi ile geliştirilen bir algoritma önerilmiş ve uygulanmıştır [53]. Gu vd. tarafından karbon salınımının ve enerji tüketiminin minimum olmasının hedeflendiği bir enerji verimli permutasyon akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde, geliştirilen HCSA uygulanmıştır [54]. Lu ve Qiao tarafından geleneksel genetik algoritmanın çalışma performansını geliştirmek amacıyla EAGA önerilmiş, çelik sektöründe enerji tüketiminin minimum olmasının hedeflendiği çizelgeleme problemi üzerinde önerilen yöntemin başarısı Genetik Yerel Arama, Tavlama Benzetimi ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir [55]. Qin vd. enerji verimli engelleme hibrit akış tipi çizelgeleme problemine çözüm sağlamak amacıyla değiştirilmiş bir yinelemeli açgözlü algoritma önermiş, önerilen yaklaşımın başarısını farklı büyüklükteki çeşitli test problemleri üzerinde değerlendirmiştir [56].

Zhang vd. tarafından maksimum tamamlanma süresi ve toplam karbon emisyonunun minimum olmasının hedeflendiği Enerji Verimli Dağıtılmış Montaj Permütasyon Akış Atölyesi Planlama Problemi ele alınmış, çözümünde hibrit bir yöntem ile yüksek kalite ve çeşitlilikte başlangıç popülasyonu oluşturmayı hedefleyen MCEDA metodu uygulanmıştır [57]. Mou vd. tarafından bekleme, taşıma ve kontrol edilebilir işlem sürelerinin yanı sıra enerji tüketiminin en aza indirilmesinin hedeflendiği enerji verimli dağıtılmış permütasyon akış tipi ters çizelgeleme probleminin çözümünde, çift popülasyonlu bir işbirlikçi arama bağlantısına sahip, hibrit işbirlikçi algoritma önerilmiş, önerilen yaklaşımın performansı ANOVA testinden yararlanılarak yapılan analizler ile değerlendirilmiştir [58]. Lu vd. tarafından üretim süresi ve toplam enerji tüketiminin minimum olmasının hedeflendiği dağıtılmış permütasyon akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde, yüksek kalitede bir başlangıç popülasyonu için işbirlikçi bir başlatma stratejisine sahip CMOA önerilmiş ve performansı değerlendirilmiştir [59]. Wang vd. tarafından toplam karbon emisyonunu ve üretim süresini minimum yapmayı hedefleyen çok amaçlı düşük karbonlu hibrit akış tipi çizelgeleme problemi ele alınmış, farklı enerji tüketim oranlarına sahip makinelerin göz önüne alındığı problemin çözümünde ITLBO algoritması önerilmiştir [60].

Saber ve Ranjbar tarafından karbon emisyonu ve toplam gecikmenin birlikte en aza indirilmesinin hedeflendiği permütasyon akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde, geliştirilen MODBH yöntemi uygulanmıştır [61]. Li vd. tarafından enerji verimli hibrit akış tipi çizelgeleme probleminde, kromozomların alt gruplar halinde değerlendirilip işbirlikçi bir yaklaşım ile bir araya getirildiği bir Geliştirilmiş İşbirlikçi Evrimsel Algoritma uygulanmıştır [62]. Li, Gao vd. tarafından en yüksek güç tüketimi miktarını sınırlayan ve maksimum tamamlanma zamanının en az olmasının hedeflendiği bir permutasyon akış tipi çizelgeleme probleminin çözümünde kanonik yapay arı kolonisi algoritması, yinelemeli yerel arama algoritması gibi algoritmalar problem modeline uygun hale getirilerek uygulanmıştır [63].

Enerji verimli dağıtılmış esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümünde, önerilen SPAMA uygulanmış ve sonuçları gelişmiş algoritmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [64]. Esnek atölye ortamında toplam enerji tüketimi, yapım süresi ve işleme maliyetinin minimum olmasının hedeflendiği problem üzerinde önerilen yeni bir, çok amaçlı BDABC algoritması uygulanmış ve önerilen yöntemin etkinliği çeşitli algoritmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir [65]. Heterojen Fabrikalarda

Dağıtılmış Permütasyon Akış Atölyesi Problemi’nde enerji tüketimi ve üretim süresi kriterlerinin dikkate alındığı problem türünde, bilgi odaklı bir çok amaçlı evrimsel yöntem uygulanmış ve performansı bilinen çok amaçlı algoritmalar ile karşılaştırılmıştır [66].

Literatürde çevresel hedeflerin temel alındığı birçok çizelgeleme çalışması olduğu görülmektedir. Bu çalışmada toplam enerji tüketiminin (TEC) ve maksimum tamamlanma zamanının (C_{maks}) birlikte minimum olması hedeflenmiştir. Enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanının azaltılması hedeflerinin minimizasyonuna odaklanan bazı çalışmaların ele aldığı problem ve kullandığı yöntemlerin bilgisi Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Maksimum tamamlanma zamanı ve enerji tüketimi odaklı çalışmalar.

Yıl	Yazarlar	Problem	Yöntemler
2005	He vd. [67]	Atölye Çizelgeleme Problemi	Tabu arama algoritmasına dayanan sezgisel bir algoritma geliştirmiştir.
2013	Dai vd. [68]	Esnek Akış Tipi Çizelgeleme Problemi	Bir Genetik Tavlama Benzetimi algoritması geliştirilmiştir.
2016	Ding vd. [69]	Çok Amaçlı Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemi	MONEH ve MMOIG yöntemleri geliştirilmiştir.
2018	Zhang vd. [70]	Esnek Atölye Çizelgeleme Problemi	IMHGA yöntemi önerilmiştir.
2019	Zhang vd. [71]	Hibrit Akış Tipi Yeşil Çizelgeleme Problemi	TOPSIS’e dayalı ikili turnuva kuralının kullanıldığı, MDABC geliştirilmiştir.
2019	Luo vd. [72]	Atölye Çizelgeleme Problemi	MOGWO algoritması önerilmiştir.
2020	Li vd. [73]	Esnek Atölye Çizelgeleme Problemi	Tavlama Benzetimi yönteminden yararlanılarak Geliştirilmiş Jaya algoritması önerilmiştir.
2024	Fontes vd. [74]	Atölye Çizelgeleme Problemi	Aynı anda birden fazla popülasyonu geliştiren Çok Amaçlı Önyargılı Rastgele Anahtar Genetik Algoritma önerilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde özellikle son yıllarda çevresel konuların çözeltilme problemleri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Sürdürülebilir üretim ortamında enerji tüketimi ve emisyon miktarının azaltılmasının hedeflendiği yeşil çözeltilme problemlerinin çözümünde sezgiseller, metasezgisel algoritmalar ve çeşitli hibrit yaklaşımların kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca son yıllarda çözeltilme problemlerinde ve farklı optimizasyon problemlerinde sezgisel ve metasezgiseller ile çok kriterli karar verme yöntemlerinin birlikte uygulamaları yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak, Ebadifard vd. tarafından iş akışı çözeltilmede Pareto Tabanlı Kara Delik Optimize Edici yönteminin uygulandığı ve WASPAS yöntemi kullanılarak pareto çözümler arasından en uygun olanın belirlendiği çalışma gösterilebilir [75]. Tirkolaee vd. tarafından yapılan çalışmada NSGA-2 ve farklı algoritmaların da kullanıldığı dayanıklı aşı tedarik zinciri ağı probleminde tedarikçilerin önceliklerinin belirlenmesinde WASPAS metodunun bir entegrasyonu kullanılmıştır [76].

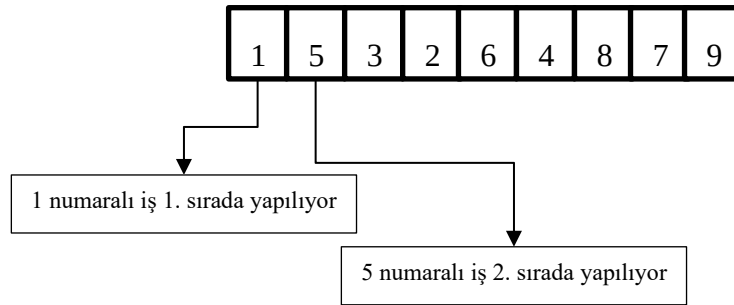
Bu çalışmada mevcut çalışmalardan farklı olarak, enerji verimli bir atölye ortamında NSGA-2 yönteminin çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanacak kromozomların belirlediği hızlı baskın olmayan sıralama adımında, WASPAS yöntemi uygulanmıştır. WASPAS yönteminin kromozomlar arasında sıralama yapamadığı durumda ise NSGA-2 yönteminin kalabalık mesafe uygulamasından yararlanılarak sıralama ve tercih yapılması sağlanmıştır.

4. METOTLAR

Bu tez çalışmasında GA temelli bir yapay zeka algoritması olan NSGA-2 ve bir çok kriterli karar verme yöntemi olan WASPAS (Bütünleşik Ağırlıklı Toplam ve Çarpım Yöntemi) entegre edilerek WSBNSGA-2 (WASPAS Tabanlı NSGA-2) yöntemi geliştirilmiştir. GA, NSGA-2, WASPAS, WSBNSGA-2, algoritmaların parametrelerinin belirlenmesinde yararlanılan Taguchi Deney Tasarımı ve sonuçların değerlendirilmesinde yararlanılan performans değerlendirme metotları bu bölümde açıklanmıştır.

4.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, Charles Darwin'in doğal seçim ilkesine dayanan ve bu biyolojik sürecin taklit edilmesi ile geliştirilen bir metottur [20]. 1975 yılında ilk kez Holland tarafından önerilmiş ve 1985 yılında da Davis tarafından ilk kez atölye çizelgeleme problemine uygulanmıştır [77]. Goldberg'in çalışmaları ile bilinen metasezgisel bir yöntem olmuştur [78]. Genetik algoritma uygulamalarında gen adı verilen birimlerden yararlanılmaktadır. Problemin olası çözümleri genlerden oluşan kromozomlar halinde kodlanmaktadır. Dokuz işten oluşan bir çizelgeleme problemine ait işlerin yapılma sıralarını belirten permutasyon tipi bir kodlama örneği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 9 işin çizelgelendiği bir kromozom örneği.

Genetik algoritma uygulamasının ilk adımında rassal olarak, belirlenen popülasyon büyüklüğü kadar kromozom oluşturulur. Ardından seçim işlemi ile yeni jenerasyonların geliştirilmesinde kullanılacak kromozom çiftleri belirlenir. Çaprazlama ve mutasyon stratejilerinden yararlanılarak yeni jenerasyon bireyler

oluşturulur. Oluşturulan yeni jenerasyon bireyler, mevcut popülasyona dahil edilir. Belirlenen eleme stratejisi ile popülasyondan yeni birey kadar eski birey elenir ve durdurma kriteri sağlanıncaya adımlar tekrarlanır. Adımların tekrar edilmesi süresince her jenerasyonda daha iyi bireyler elde edilmeye çalışılır ve böylece çözümün geliştirilmesi hedeflenir. Durdurma kriteri sağlanınca algoritmanın çalışması sona erdirilir.

Genetik algoritma uygulamaları önceleri tek problem amacının optimum olması hedeflenerek yapılmaktaydı. Endüstrinin gelişmesi, işletmeler arası rekabetin artması gibi sebeplerle birlikte birden fazla işletme hedefinin birlikte sağlanması istenmiş ve bu durum çok amaçlı değerlendirmenin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Birden fazla amacın birlikte gerçekleştirilmesinin hedeflendiği çok amaçlı optimizasyon problemlerinde genetik algoritmanın uygulanmasına yönelik çeşitli denemeler olmuştur. Çok amaçlı optimizasyonda genetik algoritmanın başarılı uygulamaları, Schaffer tarafından yapılan çalışma ile sunulan VEGA'ya dayanmaktadır [79]. VEGA ile çok amaçlı uygulamalarda pareto optimal çözümlerin elde edilmesi hedeflenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [80]. Zamanla bu alandaki çalışmalar yoğunlaşarak genetik algoritma geliştirilmiş ve ÇAGA olarak adlandırılarak çeşitli alanlardaki problemlere çözüm elde etmek amacıyla uygulanmıştır. ÇAGA uygulanırken amaç fonksiyonu, her bir hedefi temsil eden ayrı fonksiyonlar yerine tüm problem hedeflerinin bir araya getirildiği tek fonksiyon olarak uygulanabilmektedir.

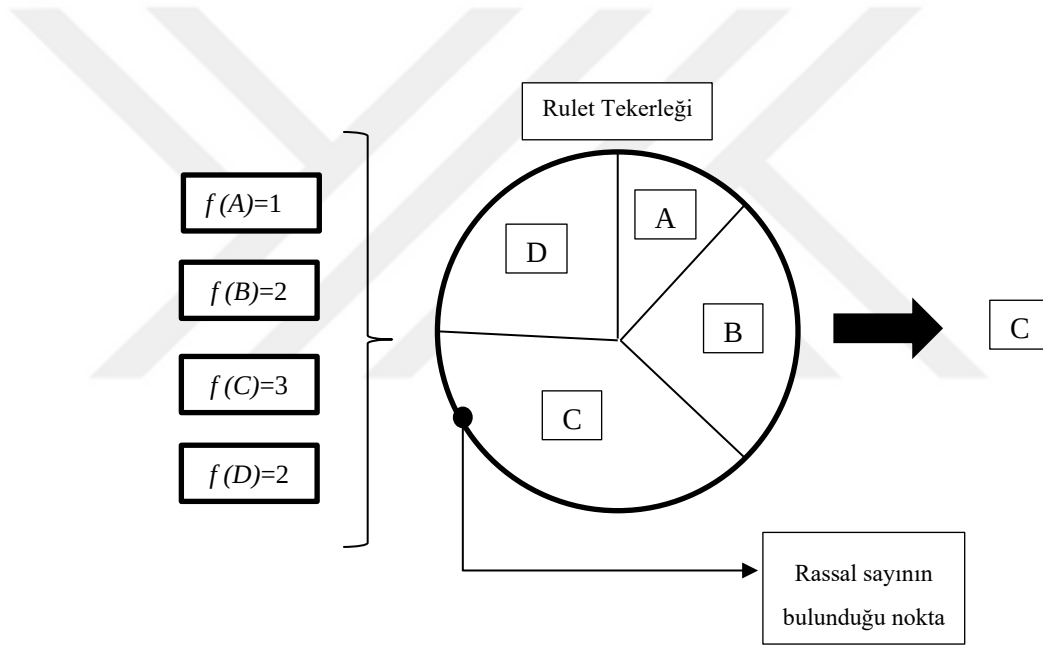
Genetik algoritma uygulamalarında seçim, çaprazlama, mutasyon ve eleme işlemlerinde tercih edilen stratejiler, algoritmanın problemler üzerindeki performansında oldukça etkilidir. Seçim, çaprazlama, mutasyon ve eleme adımları bu bölümde tanıtılmıştır.

4.1.1. Seçim

Genetik algoritma uygulamalarında başlangıç popülasyonunun rassal olarak oluşturulmasının ardından, genetik operatörler olarak adlandırılan çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanmaktadır. Popülasyondaki bireyler arasından çaprazlama ve mutasyon uygulanacak bireylerin seçilmesi amacıyla seçim stratejilerinden yararlanmaktadır. Turnuva Seçimi, Rank Seçimi, Rulet Tekerleği Seçimi literatürde sıklıkla uygulanan seçim stratejilerinden bazılarıdır.

4.1.1.1. Rulet tekerleği seçimi

Rulet tekerleği seçimi 1975 yılında Holland tarafından önerilmiş bir seçim stratejisidir [81]. Çaprazlanacak bireylerin seçimi sırasında öncelikle başlangıç popülasyonundaki tüm bireyler için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Ardından rulet çemberi oluşturulur. Çember oluşturulurken, tüm bireylere amaç fonksiyonu değerleri ile orantılı olarak $[0,100]$ aralığında çember üzerinde alan verilir. Böylece amaç fonksiyonu en iyi olan bireyler çemberde daha fazla alana sahip olmuş olur. Rassal olarak $[0,100]$ aralığında sayı üretilir. Üretilen sayı, çemberde hangi kromozomun alanına karşılık geliyorsa o kromozom seçilir. Bu işlemlerin tekrarlı olarak uygulanması ile çaprazlanacak tüm kromozom çiftlerinin belirlenmesi sağlanır. Rulet Tekerleği Seçimi'nin mekanizması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Bir maksimizasyon probleminde Rulet Tekerleği Seçimi [82].

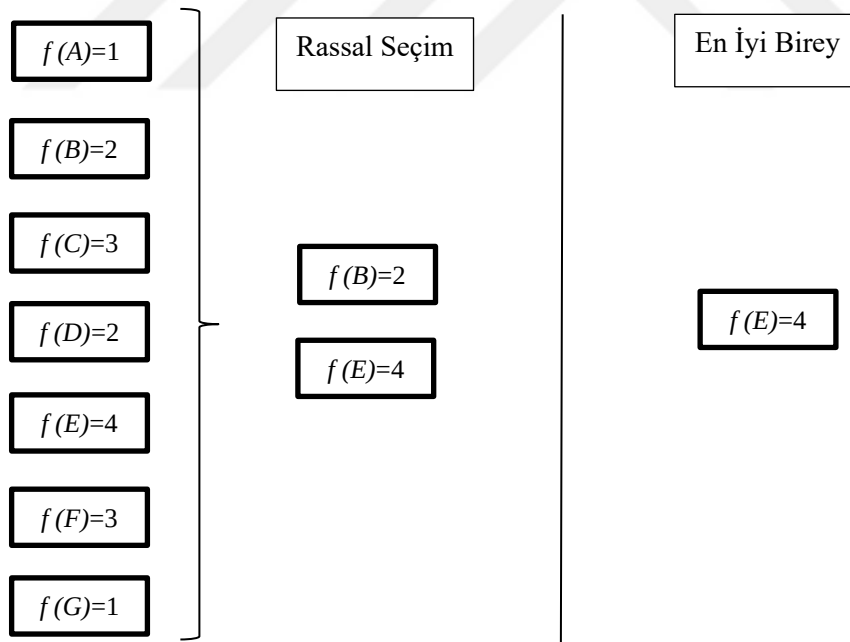
4.1.1.2. Rank seçimi

Uygunluk orantılı seçim (Rulet tekerleği seçimi) orantı kullanması sebebiyle ilk iterasyonlarda iyi bir sonuç bularak erken yakınsamaya sebep olabilmektedir ve bu durum yöntemin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir [83]. Rank Seçimi, Baker tarafından uygunluk orantılı seçimin olumsuzluklarının önlenmesi amaçlanarak önerilmiş bir yaklaşımdır [84]. Rank Seçimi uygulanırken öncelikle, popülasyondaki tüm bireylerin (N adet) amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Ardından popülasyondaki bireyler en kötü amaç fonksiyonu değerine sahip birey ilk sırada olacak şekilde en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip bireye doğru sıralanır. Bireyler yapılan sıralamaya

göre en kötü amaç fonksiyonu değerine sahip bireye 1 numara, en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip bireye N numara verilecek şekilde numaralandırılır. Tüm bireylere ait sıra numaraları toplanır. Bireylerin numara değerleri bu toplama ayrı ayrı bölünerek her bir birey için oranlar belirlenir. Oranlardan yararlanılarak her bir birey için seçilme aralığı belirlenir. Rassal sayı üretilir ve bu sayının karşılık geldiği aralığa sahip olan birey çaprazlama işlemi uygulanmak üzere seçilir.

4.1.1.3. Turnuva seçimi

Turnuva Seçimi 1980 yılında Brindle tarafından önerilen bir seçim stratejisidir [85]. Turnuva seçiminin ilk adımını bir turnuva genişliği değerinin belirlenmesi oluşturur. Popülasyonda yer alan tüm bireylerin arasından, belirlenen turnuva genişliği kadar birey rassal olarak seçilir. Seçilen bireylerin amaç fonksiyonu ile uygunluk değeri hesaplanır. En iyi uygunluk değerine sahip birey çaprazlama işlemi uygulanmak üzere seçilir. Çaprazlama işlemi için gerekli tüm bireyler işlemlerin tekrarlanması ile seçilir. Turnuva genişliği 2 olan bir maksimizasyon problemi için Turnuva Seçimine ait örnek Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

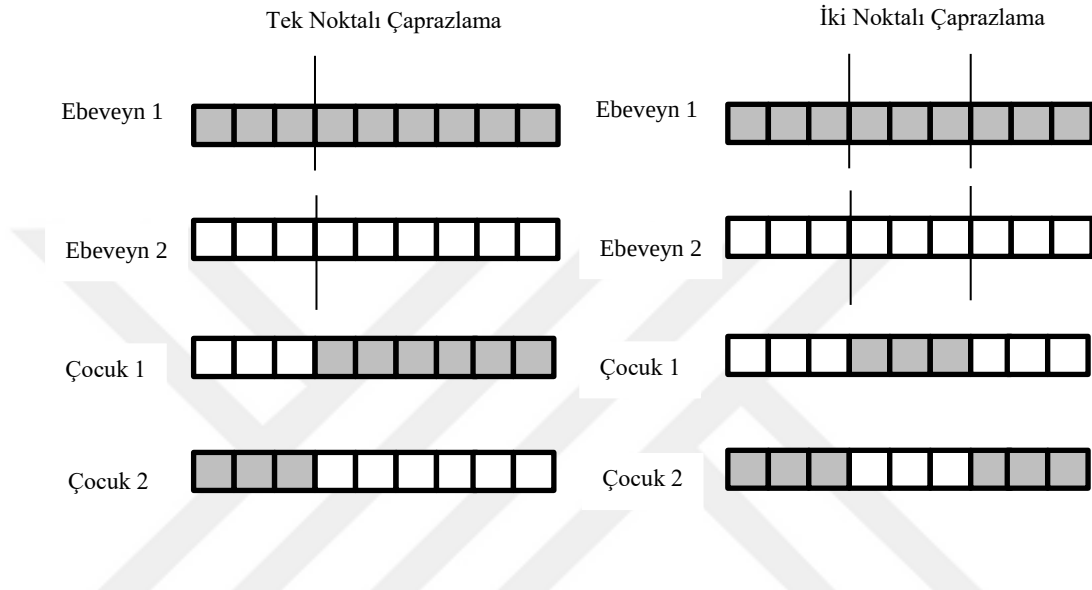


Şekil 4.3. Turnuva seçimi örneği [82].

4.1.2. Çaprazlama

Çaprazlama, seçim işlemi ile popülasyondan seçilen bireylerden yeni bireylerin oluşturulması amacıyla kullanılan bir genetik operatördür. Seçilen iki bireyin birbirleri arasında gen transferi yapılarak uygulanmaktadır. Kromozomlar üzerinde gen transferi

yapılacak kısmın belirlenme şekline göre adlandırılan tek ve iki noktalı çaprazlama bilinen en popüler çaprazlama türleridir. Problemden kullanılan çaprazlama yöntemi ve çaprazlama oranı algoritmanın başarısı üzerinde oldukça etkilidir. Pozisyona dayalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, düzgün çaprazlama, sezgisel çaprazlama, doğrusal sıralı çaprazlama literatürde uygulanan bazı çaprazlama yöntemleridir [86, 87]. Şekil 4.4’te tek ve iki noktalı çaprazlamanın örneği gösterilmiştir.

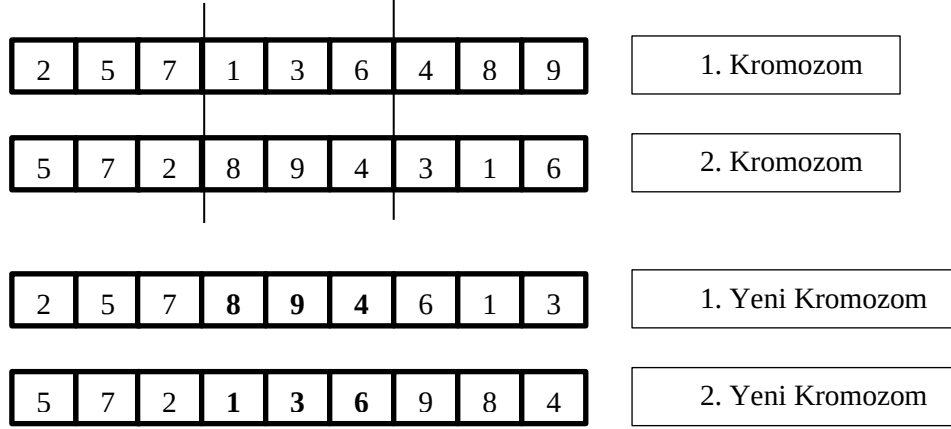


Şekil 4.4. Kromozomlara tek noktalı ve iki noktalı çaprazlama uygulanması.

Literatürde çeşitli problemler üzerinde uygulanan birçok iki noktalı çaprazlama türü mevcuttur. Kısmi eşleşmiş çaprazlama, çevrim çaprazlama, sıralı çaprazlama ve doğrusal sıralı çaprazlama bu yöntemlerden bazılarıdır.

4.1.2.1. Kısmi eşleşmiş çaprazlama

Kısmi Eşleşmiş Çaprazlama yöntemi Goldberg ve Lingle tarafından 1985 yılında önerilmiş bir çaprazlama yöntemidir [88]. Yöntemin örnek bir uygulaması Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

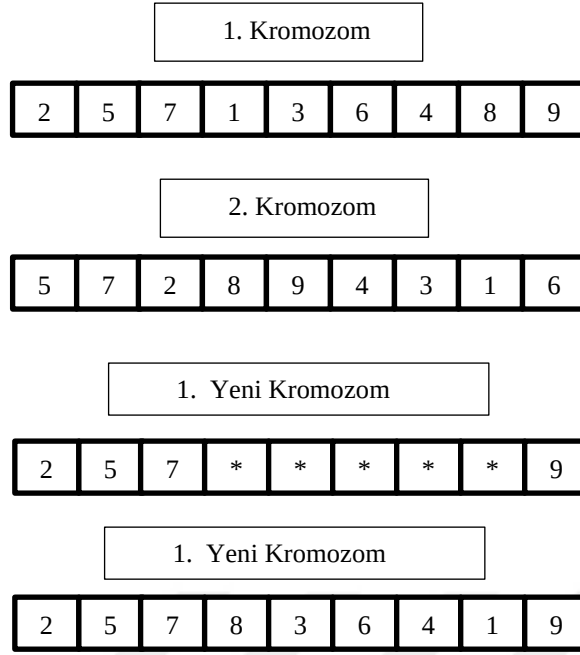


Şekil 4.5. Kısmi eşleşmiş çaprazlama örneği.

Şekil 4.5'te yer alan 1. ve 2. kromozomların 4, 5 ve 6. genlerinin yer değiştirileceği görülmektedir. Öncelikle 1. kromozomda bulunan 1, 3 ve 6 numaralı genler 2. kromozomdaki 8, 9 ve 4 numaralı genlerin yerine sırası ile yerleştirilecektir. 1, 3 ve 6 numaralı genlerin 2. kromozoma yerleştirilmesi ile bu genlerin kromozomda tekrarlı olmaması açısından 2. kromozomda çaprazlama işlemi öncesinde yer alan 1 numaralı genin yerine 8, 3 numaralı genin yerine 9 ve 6 numaralı genin yerine 4 numara yerleştirilir. Bu işlem sonucu 2. yeni kromozom oluşur. Aynı işlem 2. kromozomdaki 8, 9 ve 4 numaralı genlerin 1. kromozoma aktarılması ile tekrar edilir ve 1. yeni kromozom oluşturulur.

4.1.2.2. Çevrim çaprazlama

Çevrim çaprazlama Oliver vd. tarafından 1987 yılında geliştirilen bir çaprazlama stratejisidir [89, 90]. Yöntemin uygulaması Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



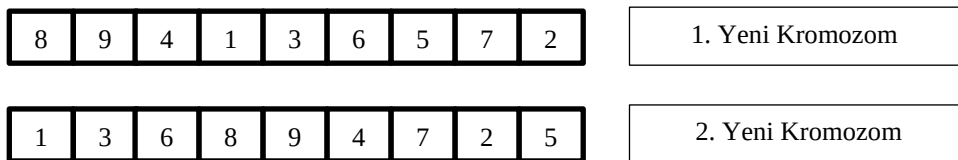
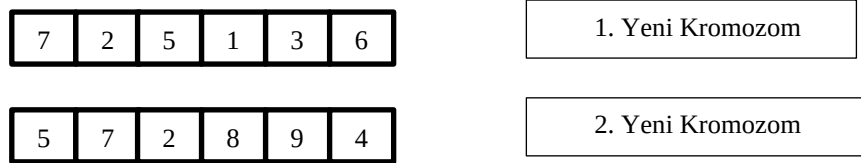
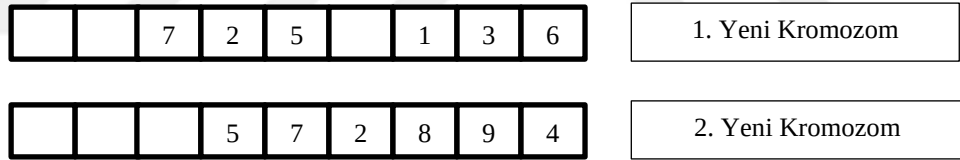
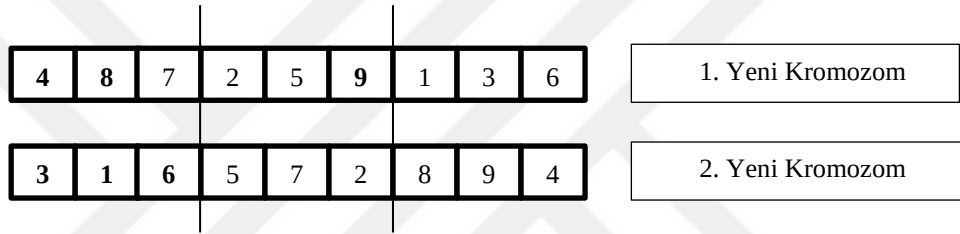
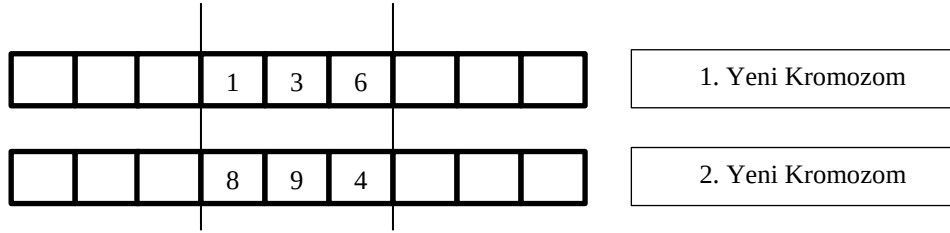
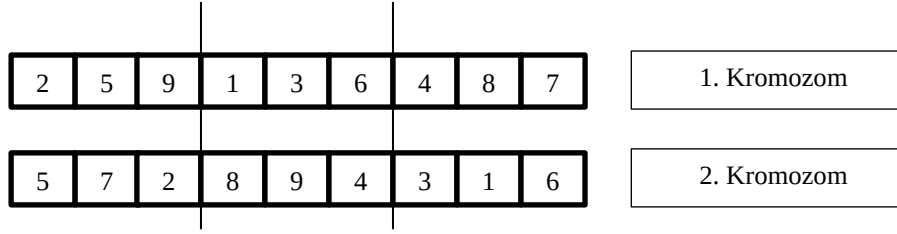
Şekil 4.6. Çevrim çaprazlama uygulama örneği.

Şekil 4.6’da yer alan 1. ve 2. kromozomun çaprazlanma sürecinde öncelikle 1. yeni kromozomun ilk geni belirlenmektedir. Yeni kromozomun ilk geni için mevcut kromozomların ilk genlerinden yani 2 ve 5 numaralı genlerden biri rassal olarak seçilir. Bu örnekte 2 numaralı gen seçilmektedir. Ardından kromozomun son geni için mevcut iki kromozomun son genleri olan 9 ve 6 numaralı genlerden rassal olarak biri seçilmiş ve 9 numaralı gen yeni kromozomun son geni olmuştur. Kromozomun 2. geni belirlenirken mevcut kromozomların 2. genleri olan 5 ve 7 numaralı genlere bakılmaktadır. 5 numaralı gen 2. kromozomun ilk geni olduğundan ve artık 2. genin belirlenme sürecinde o gen değerlendirmeye alınamayacağından yalnızca 1. kromozomda henüz geçilmemiş olan 5 numaralı gen seçilmekte ve yeni kromozomun 2. genine atanmaktadır. Yeni kromozomun 3. geni belirlenirken ebeveyn kromozomların 7 ve 2 numaralı genlerine bakılmakta ve 7 numaralı genin 2. kromozomda 2. gende kalması ve artık 2. kromozomdan bu genin alınamayacak olması sebebiyle 7 numaralı gen 1. kromozomdan alınmakta ve yeni kromozomun 3. genine atanmaktadır. Yeni kromozomun 4. geni ebeveynlerin 1 ve 8 numaralı genlerine bakılarak belirlenmekte ve bu genler arasından rassal olarak 8 numaralı gen seçilerek yeni kromozomun 4. geni belirlenmektedir. Yeni kromozomun 5. geni 3 ve 9 numaralı genler değerlendirildiğinde 9 numaralı genin yeni kromozomun son geni olarak daha önce atanması sebebiyle 3 numaralı genin atanmasıyla belirlenmektedir.

Yeni kromozomun 6. geni için ebeveynlerin 6 ve 4 numaralı genleri kıyaslanmaktadır. 7. genin belirlenmesi sırasında 4 ve 3 numaralı genlerin kıyaslanması ile tercih yapılacağından ve 3 numaralı genin daha önce atanmış olması, 4 numaralı genin seçilmesini gerektirmektedir. Bu sebeple yeni kromozomda 6. gene 6 numaralı, 7. gene ise 4 numaralı gen atanmaktadır. Yeni kromozomun 8. geninin belirlenmesinde ebeveynlerin 8 ve 1 numaralı genlerinden 8 numaranın daha önce atanması sebebiyle 1 numaralı gen tercih edilmektedir. İşlemlerin tamamlanması neticesinde 1. yeni kromozom oluşturulmuştur. Aynı sürecin uygulanması ile 2. yeni kromozom oluşturulmaktadır.

4.1.2.3. Sıralı çaprazlama

Sıralı Çaprazlama Davis vd. tarafından 1985 yılında geliştirilmiş bir çaprazlama stratejisidir [91, 92]. Oliver vd. tarafından yapılan bir çalışmada gezgin satıcı problemi üzerinde yapılan uygulama ile sıralı çaprazlama yönteminin kıyaslanan yöntemlere üstünlük sağladığı gösterilmiştir [89]. Yöntemin uygulaması Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



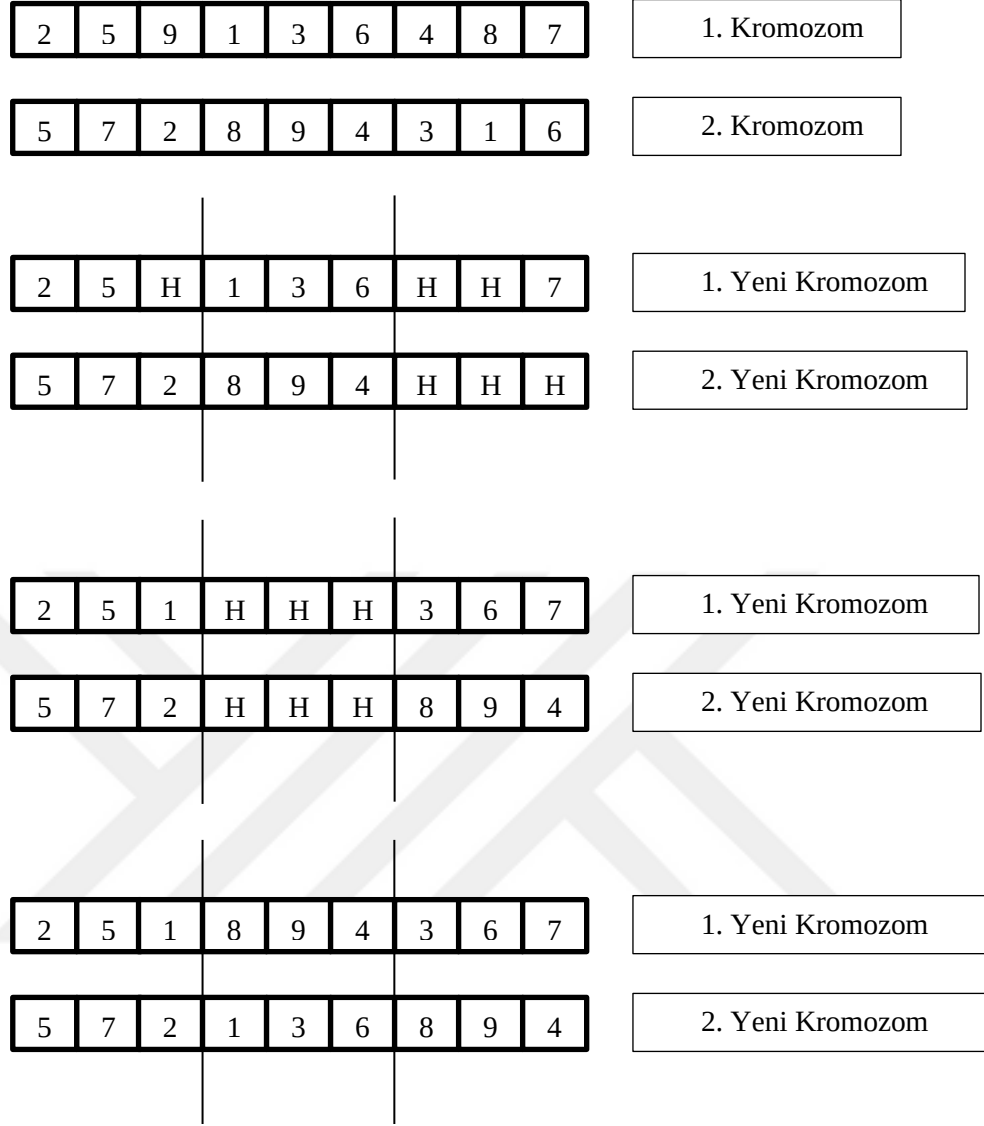
Şekil 4.7. Sıralı çaprazlama yöntemi örneği.

Şekil 4.7'deki örnekte 1. ve 2. kromozomlarda 4., 5. ve 6. genlerin bulunduğu bölümlerin çaprazlama işlemi için işaretlendiği görülmektedir. Kromozomlarda

yalnızca işaretlenen genler kalacak şekilde diğer genler arasında karşılıklı olarak transfer yapılarak yeni kromozomlar oluşturulacaktır. Gen transferi ile kromozomlarda tekrarlı genlerin oluşmaması için öncelikle 1. ve 2. kromozomlardaki genler, işaretli bölümler kromozomun son kısmında kalacak şekilde kendi içerisinde soldan sağa doğru kaydırılır. Oluşan kromozomlarda 1. kromozom üzerinde 2. kromozomun işaretli genleri, 2. kromozomun üzerinde ise 1. kromozomun işaretli genleri bulunur ve bu genler kromozomlardan çıkarılır. Kalan genlerin birleştirilmesiyle eksik gen sayısına sahip kromozomlar oluşmaktadır. 2. kromozomun işaretli genleri eksik gen sayısına sahip 1. kromozomun başına, 1. kromozomun işaretli genleri eksik gen sayısına sahip 2. kromozomun başına eklenir. Elde edilen kromozomlar yeni bireyleri oluşturmaktadır.

4.1.2.4. Doğrusal sıralı çaprazlama

Doğrusal sıralı çaprazlama, permutasyon kodlama kullanılan üretim çizelgeleme problemlerinde kromozomda aynı işin tekrarını önleyen bir çaprazlama stratejisidir. Doğrusal sıralı çaprazlama yöntemi, sıralı çaprazlama yöntemi ile kromozomlar üzerinde genlerin bir çevrim şeklinde kaydırılması sonucu kromozomun sol tarafında yer alan ve yüksek önceliğe sahip bir genin kromozomun sağ tarafına kayması ile düşük öncelikli bir hale gelebilmesi ve bu durumda kromozomun verim kaybına uğrayacağı düşüncesinden yola çıkılarak geliştirilmiştir [93]. Doğrusal sıralı çaprazlama yönteminde kromozom üzerinde yapılan gen çevriminde genlerin önceliği korunmaya çalışılmaktadır. Yöntemin adımları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

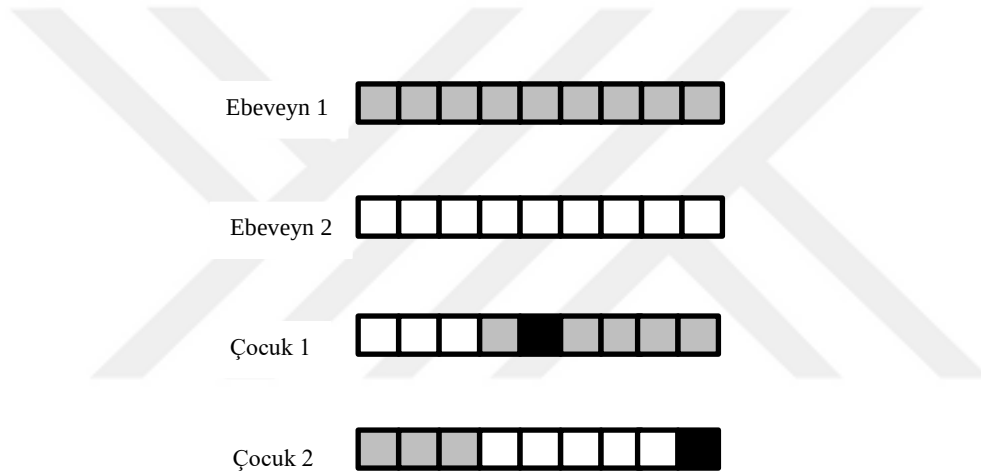


Şekil 4.8. Doğrusal sıralı çaprazlama örneği.

Şekil 4.8’de gösterilen adımlardaki gibi öncelikle kromozomlar üzerinde çaprazlanacak kısımlar işaretlenmektedir. 2. kromozomdaki 8, 9 ve 4 numaralı genler ile 1. kromozomdaki 1, 3 ve 6 numaralı genlerin yer değiştirilmesi ile yeni kromozomların oluşturulması hedeflenmektedir. 2. kromozomun 8, 9 ve 4 numaralı genlerinin 1. kromozom üzerindeki aynı numaralı genler ile çakışmaması için 1. kromozom üzerindeki aynı numaralı mevcut genlerin yerine H harfi yazılmaktadır. Ardından H harfleri kromozomun çaprazlama aralığına getirilmekte ve diğer genler öncelik sırası bozulmayacak şekilde kromozomun sağına ve soluna kaydırılmaktadır. Çaprazlama aralığında bulunan H harflerinin yerine 8, 9 ve 4 numaralı genlerin sırası ile atanması sonucu 1. yeni kromozom oluşmaktadır. Aynı sürecin diğer kromozoma uygulanması ile 2. yeni kromozomun da oluşması sağlanmaktadır.

4.1.3. Mutasyon

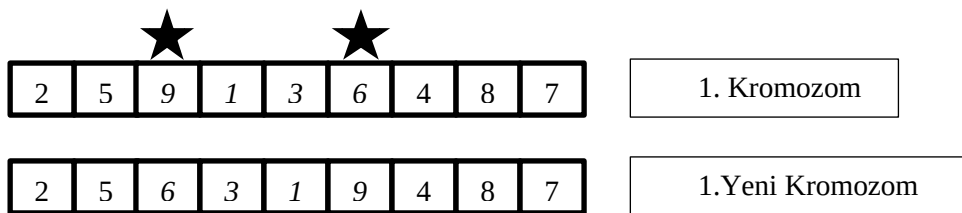
Mutasyon, genetik algoritma uygulamalarında genetik çeşitliliğin sağlanması amacıyla kullanılan bir genetik operatördür. Mutasyon işlemi, problem için belirlenen uygun mutasyon stratejisi ve mutasyon oranı çerçevesinde uygulanmaktadır. Çaprazlama sonucu oluşan kromozomlar üzerindeki genlerde belirlenen mutasyon stratejisinin kuralları çerçevesinde değişiklik yapılarak yeni jenerasyon bireylerin oluşması sağlanır. Ters Dizi Mutasyonu, Merkez Ters Mutasyon, Komşu İki Geni Değiştirme, Keyfi İki Geni Değiştirme ve Keyfi Üç Geni Değiştirme, Gauss, Güç Mutasyonu, Benzersiz Mutasyon, Takas Mutasyonu literatürde uygulanan bazı mutasyon yöntemleridir [86, 94]. Şekil 4.9’da mutasyon işleminin örneği gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kromozomlara mutasyon işlemi uygulaması.

4.1.3.1. Ters dizi mutasyonu

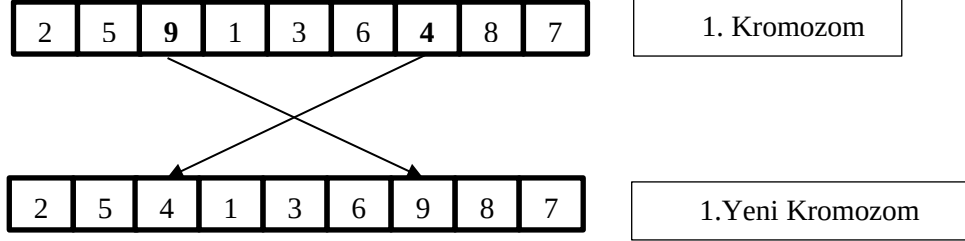
Ters dizi mutasyonu, bir kromozomun rastgele seçilen iki noktası arasındaki genlerin diziliminin tersine çevrilmesi ile yeni bir kromozom üretilmesini sağlayan mutasyon yöntemidir [94]. Ters mutasyon örneği Şekil 4.10’da gösterilmiştir



Şekil 4.10. Ters dizi mutasyonu örneği.

4.1.3.2. Takas mutasyonu

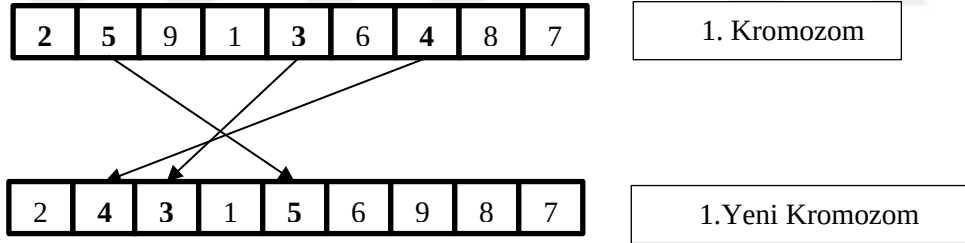
Takas mutasyonu, bir kromozom üzerinde rassal olarak seçilen iki genin yer değiştirmesi ile yeni bir kromozom elde edilmesinin sağlandığı mutasyon yöntemidir [95]. Takas mutasyonu örneği Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Takas mutasyonu örneği.

4.1.3.3. Keyfi üç iş değişikliği

Keyfi üç iş değişikliği mutasyonu, kromozom üzerindeki üç adet genin birbiri ile yer değiştirilmesi şeklinde uygulanmakta ve seçilen genler de genlerin seçilmesinin ardından hangi sıra ile kromozoma yerleştirileceği de rasgele belirlenmektedir [96]. Mutasyonun örneği Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Keyfi üç iş değişikliği mutasyonu örneği.

4.1.4. Eleme

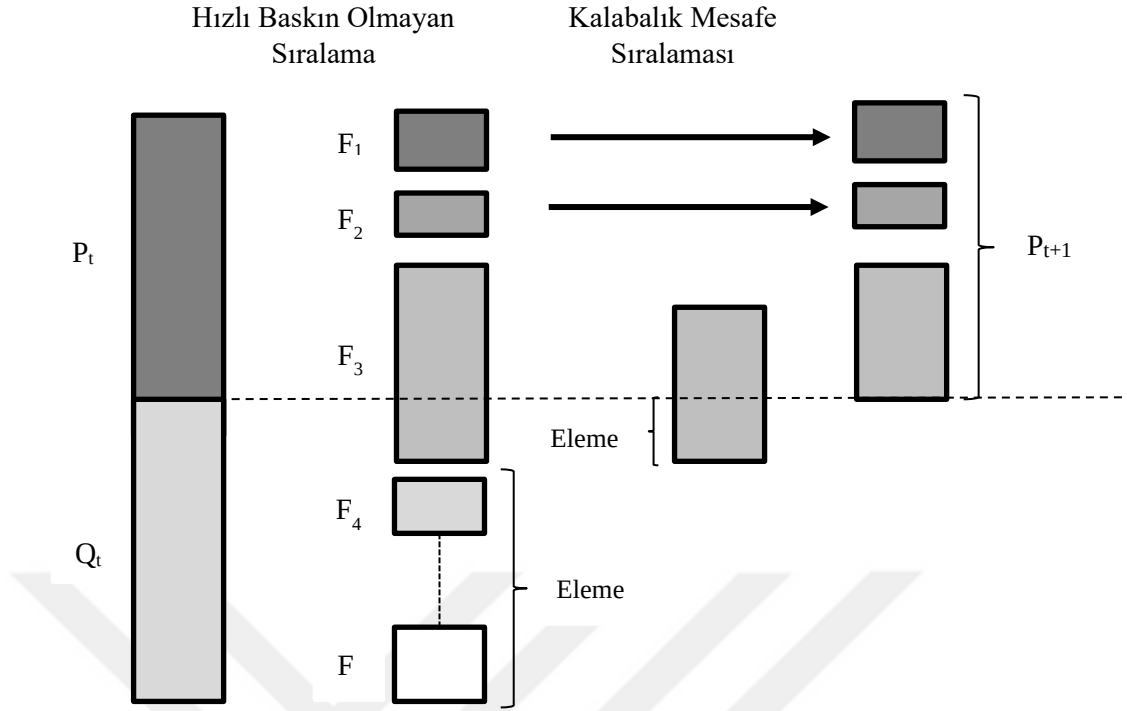
Genetik algortmada çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile elde edilen yeni jenerasyon bireylerin popülasyona aktarılması ile popülasyon büyüklüğü artar. N popülasyon büyüklüğünü korumak amacıyla eleme işlemi uygulanır. Belirlenen eleme stratejisinden yararlanılarak popülasyondaki zayıf olan bireylerin diğer bireylerin arasından çıkarılması sağlanır. Literatürde, sık kullanılan ve bireylerin iyi olandan kötü olana sıralandığında N değerini aşanların elenmesine dayanan En Kötüyü Eleme yönteminin yanı sıra Rastgele Eleme, En Eski Olanı Eleme gibi çeşitli yöntemler ile eleme işlemleri gerçekleştirilmektedir [97].

4.2. Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-2: NSGA-2

NSGA algoritması Srinivas ve Deb tarafından geliştirilen evrimsel bir, çok amaçlı optimizasyon algoritmasıdır [98]. NSGA'nın yüksek işlem karmaşıklığı sebebiyle geliştirilmesi ihtiyacı ile birlikte, Deb vd. tarafından NSGA-2 algoritması önerilmiştir [99]. NSGA-2 algoritması, genetik algoritmanın adımlarının yanı sıra pareto en iyi kümenin tespit edilebilmesi amacıyla baskınlık derecelendirmesi, kalabalık mesafe hesabı gibi ek işlemlerin uygulandığı genetik algoritma tabanlı bir algoritma olarak tasarlanmıştır [100]. NSGA-2 uygulamalarında en iyi bireylerin korunmasının hedeflendiği elitist bir yaklaşım bulunmaktadır. Ayrıca, kalabalık mesafe hesabı ile popülasyon içerisindeki bireylerde çeşitlilik oluşmasını sağlamaktadır. NSGA-2 algoritmasının uygulama adımları aşağıdaki gibidir.

1. Adım: Başlangıç popülasyonu oluşturulur.
2. Adım: Popülasyondaki bireylerin birbirlerine olan baskınlıkları değerlendirilir ve bireyler sıralanarak cepheler oluşturulur.
3. Adım: Cephelerdeki bireylerin kendi içerisinde kalabalık mesafe hesabı yapılır.
4. Adım: Kalabalık mesafe hesabının da tamamlanması ile bireylerin tamamının sıralanması sağlanır ve bireylere ait bu sıralama kullanılarak, genetik operatörlerin uygulanacağı bireyler seçilir.
5. Adım: Seçilen bireylerden çaprazlama ve mutasyon genetik operatörleri kullanılarak yeni jenerasyon bireyler elde edilir ve bu bireyler popülasyona eklenir.
6. Adım: Baskınlık değerlendirmesi ve kalabalık mesafe hesabının tekrarlanması ile bireyler sıralanır.
7. Adım: Popülasyon büyüklüğünü geçen kadar, en kötü sıraya sahip birey popülasyondan elenir.
8. Adım: Belirlenen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar döngü tekrarlanır.

NSGA-2 algoritmasında genetik algoritmadan farklı olarak yapılan hızlı baskın olmayan sıralama ve kalabalık mesafe uygulamaları Şekil 4.13'te şematik olarak gösterilmiştir.



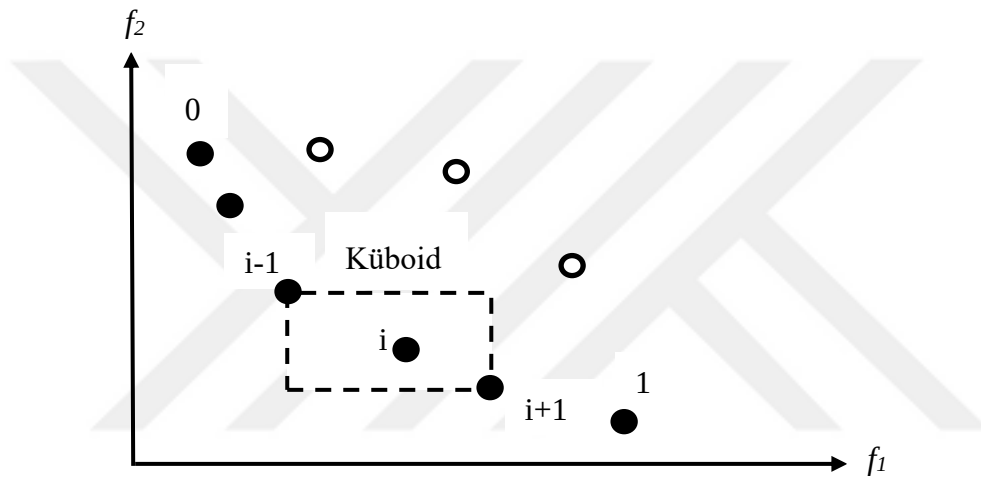
Şekil 4.13. Hızlı Baskın Olmayan Sıralama ve Kalabalık Mesafe [99].

4.2.1. Hızlı baskın olmayan sıralama

N adet bireyden oluşan bir popülasyonda, bireylerin birbirlerine olan baskınlıklarının değerlendirilmesi ile birlikte, en iyi bireyden en kötü bireye doğru sıralama yapılması amacıyla uygulanan bir adımdır. Popülasyondaki tüm bireyler için n_p (bir p çözümünü bastıran çözümlerin sayısı) ve S_p (p çözümünün bastırdığı çözümlerin kümesi) hesaplamaları yapılmaktadır. Başlangıçta $n_p = 0$ kabul edilir. Popülasyonda yer alan bireylerin amaç fonksiyonu değerleri çerçevesinde birbirleriyle kıyaslanması ile n_p değerleri hesaplanır ve S_p kümeleri oluşturulur. En küçük n_p değerine sahip bireyler ilk cepheyi oluşturur ve bu bireylerin rank değerine 1 atanır. Bu bireylerin cepheye atanması ile diğer bireylere baskınlığı ortadan kalkacağından, S_p kümelerinde yer alan bireylerin n_p değerleri azaltılır. En küçük n_p değerleri ile bu kez ikinci cephe oluşturulur ve bu bireylerin rank değerlerine 2 atanır. İkinci cepheyi oluşturan bireylerin S_p kümesinde yer alan bireylerin n_p değerleri azaltılır. Tüm bireyler bir cephede yer alıncaya ve rank değerleri belirleninceye kadar işlemlere devam edilir. Böylece bireylerin her biri bir cepheye atanır ve bireylere ait bir sıralama elde edilir.

4.2.2. Kalabalık mesafe

NSGA-2'nin hızlı baskın olmayan sıralama hesabı sonrasında aynı cephede yer alan bireylerin aynı rank değerine sahip olması sebebiyle, bu bireylerin sıralanabilmesi amacıyla kalabalık mesafe işlemi uygulanır. Cephedeki bireyler amaç fonksiyonu değerlerine göre grafiğe yerleştirilir. En başta ve en sonda olan bireyler korunur ve sonsuz değeri atanır. Diğer bireyler için kendinden bir önceki ve kendinden bir sonraki bireyler ile olan mesafesi hesaplanır. En fazla mesafeye sahip bireye çeşitlilik sağlamak için en küçük sıra verilerek daha üst sırada olması sağlanır. İki hedefli bir problem için kalabalık mesafe hesabı Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Kalabalık mesafe hesabı [99].

Şekil 4.14'te yer alan grafikte, siyah noktalar aynı cephede yer alan bireyleri temsil etmektedir. Burada i bireyinin $i-1$ ve $i+1$ bireylerine olan mesafesi hesaplanırken Öklid uzaklığı temel alınmaktadır. Bu sebeple bireyin kalabalık mesafe değeri küboidin toplam çevre uzunluğuna eşit olmaktadır.

4.3. Bütünleşik Ağırlıklı Toplam ve Çarpım Yöntemi: WASPAS

Bireylerin farklı alternatifler arasından yaptığı seçim, karar olarak tanımlanabilmektedir [101]. Bu alternatifleri değerlendirirken etkisi alternatif açısından olumlu veya maliyeti arttıran çeşitli karşılaştırma kriterlerinden yararlanılmaktadır. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), uygun alternatifin seçilmesi sürecinde birden fazla kriterin dikkate alındığı bir karar verme problemidir [102, 103, 104]. Bu problem türünde yalnızca bir optimal çözüme ulaşılması mümkün olmamakla

birlikte karar vericinin tercihlerinden yararlanılmaktadır [105]. Literatürde, çeşitli alanlardaki karar problemlerinde uygulanan Analitik Hiyerarşi Prosesi, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, MULTIMOORA, WASPAS gibi birçok karar verme yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada NSGA-2 yönteminin çok kriterli problemde, kriterleri değerlendirme başarısını arttırmak hedeflenerek çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan WASPAS metodu uygulanmıştır.

WASPAS metodu Zavadskas vd. tarafından geliştirilmiş bir, çok kriterli karar verme metodudur [106]. Metot, çok kriterli karar vermede iyi bilinen ve yaygın bir kullanıma sahip olan WSM ve WPM yaklaşımlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur [106, 107]. WASPAS metodu ile karar vermede WSM (Ağırlıklı Toplam Metodu) ve WPM (Ağırlıklı Çarpım Metodu) metotlarından daha başarılı sonuçlara ulaşılabilmektedir [108].

WASPAS metodunun uygulanması sırasında ilk adımda, m adet alternatifin her birinin (j) n adet kriterin her biri (i) için performans değerlerinin (x_{ij}) yerleştirildiği, denklem 4.1 'deki başlangıç matrisi oluşturmaktadır.

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} K_1 & K_2 & \dots & K_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Maksimum veya Minimum} \\ \left[\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{matrix} \right] \end{matrix} \end{matrix} \quad (4.1)$$

Başlangıç matrisinde, alternatifler açısından etkisi olumlu olan kriterler maksimum ve etkisi alternatifler açısından olumsuz veya maliyete sebep olan kriterler ise minimum olarak işaretlenmektedir. Ardından başlangıç matrisine normalizasyon işlemi uygulanmaktadır. Normalizasyon işlemi sırasında maksimum olarak belirlenen kriterler denklem 4.2 ve minimum olarak belirlenen kriterler için denklem 4.3 kullanılmaktadır.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (4.2)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (4.3)$$

Normalize edilmiş matris değerlerine ($\bar{x}_{ij}$) WSM uygulaması için denklem 4.4, WPM uygulaması için denklem 4.5'teki ağırlıklandırma işlemi uygulanır ve alternatifin toplam göreceli önemini ifade eden Q_i^1 ve Q_i^2 değerleri hesaplanır.

$$Q_i^1 = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j \quad (4.4)$$

$$Q_i^2 = \prod_{j=1}^n \bar{x}_{ij}^{w_j} \quad (4.5)$$

Alternatiflere ait sıralamanın elde edilmesinde WSM ve WPM sonuçlarını birleştiren denklem 4.6 uygulanmaktadır. Burada genellikle sıralamanın etkin bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla $\lambda=0,5$ kabul edilerek, sonuçların eşit ağırlığa sahip olduğu denklem 4.7'deki formülasyon kullanılmaktadır. Denklem 4.6'da $\lambda=0$ olduğu durumda formülasyon WPM'ye, $\lambda=1$ olduğu durumda WSM'ye dönüşmektedir [109].

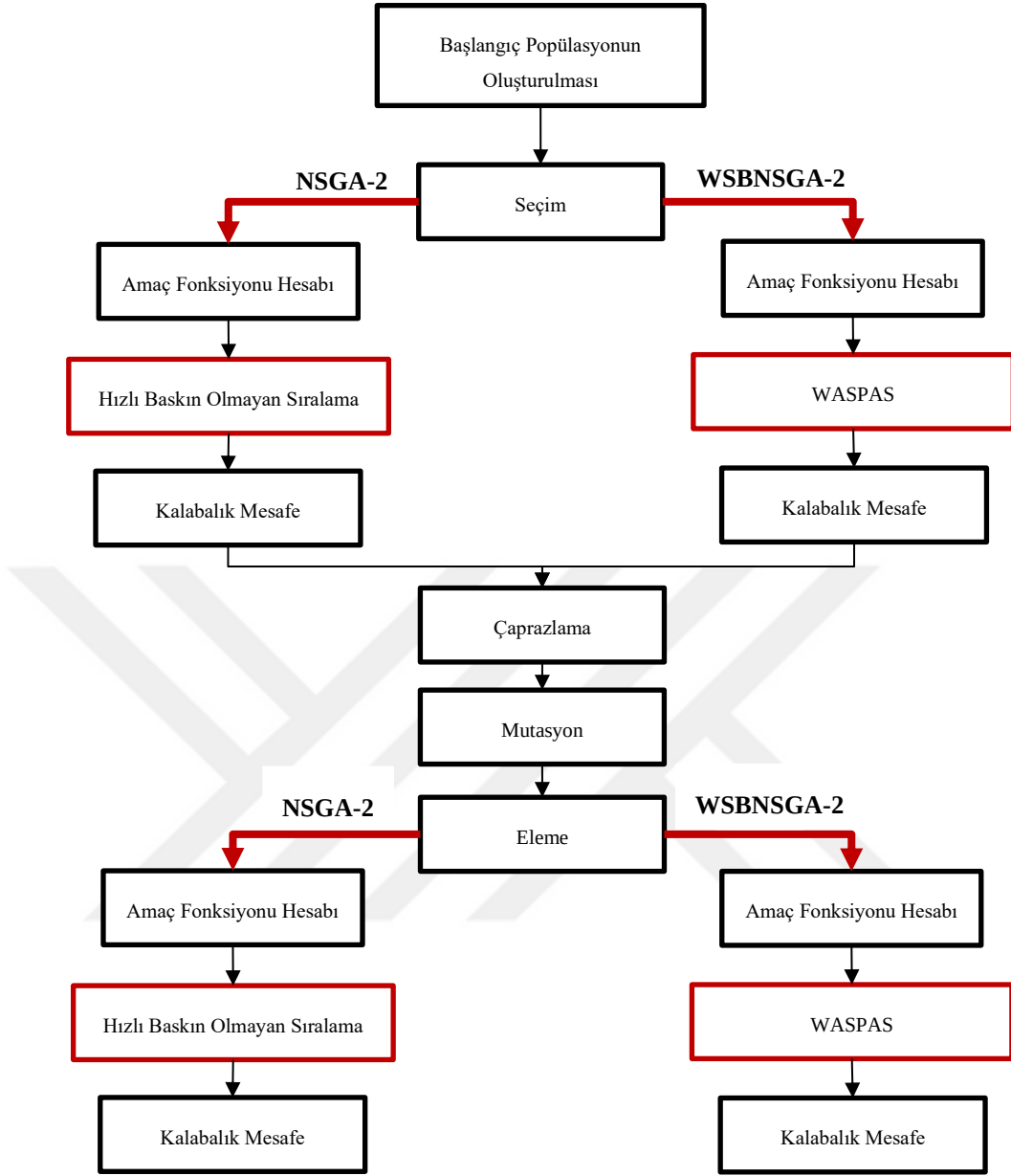
$$Q_i = \lambda Q_i^1 + (1 - \lambda) Q_i^2, \lambda = 0, \dots, 1 \quad (4.6)$$

$$Q_i = 0.5 Q_i^1 + 0.5 Q_i^2 \quad (4.7)$$

Hesaplamalar neticesinde her bir alternatif için elde edilen Q_i değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile WASPAS metodu sonucunda alternatiflere ait sıralama elde edilmiş olur.

4.4. Önerilen Metot: WASPAS Tabanlı NSGA-2

NSGA-2 metoduna WASPAS metodunun entegre edilmesi ile WASPAS Tabanlı NSGA-2 (WSBNSGA-2) hibrit metodu önerilmiştir. Geliştirilen metot ile çaprazlanacak bireylerin belirlenmesi sırasında, birden fazla problem hedefinin birlikte daha etkin bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. WSBNSGA-2 yönteminde, NSGA-2 yönteminin seçim ve eleme sürecinde uygulanan hızlı baskın olmayan sıralama adımı yerine WASPAS metodu uygulanmaktadır. Metotların uygulama adımları Şekil 4.15'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15. NSGA-2 ve WSBNSGA-2 yöntemlerinin adımlarının karşılaştırılması.

WSBNSGA-2 metodunun uygulaması sırasında takip edilen adımlar aşağıda sıralanmıştır.

Adım 1: Olası problem çözümlerinin kromozomlar halinde kodlanması ile N adet bireyden meydana gelen bir başlangıç popülasyonu rassal olarak oluşturulur.

Adım 2: Her bir kromozom için her bir problem hedefinin ayrı olacak şekilde amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: Popülasyonda yer alan tüm bireyler alternatifleri, problem hedefleri kriterleri, hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri ise alternatiflerin kriterler bazında değerlerini

oluşturacak şekilde WASPAS metodu uygulanır ve her bir kromozom için Q_i değeri hesaplanır.

Adım 4: Kromozomlar Q_i değerleri büyükten küçüğe doğru olacak şekilde sıralanır.

Adım 5: Aynı Q_i değerine sahip kromozomlara aynı sıra değeri verilecek ve en büyük Q_i değerine sahip olan kromozom/kromozomlar 1 değerini alacak şekilde tüm kromozomlara arttırılarak sıra değeri verilir. Her bir sıra değeri bir cepheyi oluşturur.

Adım 6: Aynı cephedeki kromozomların kendi arasında sıralanabilmesi için amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak kalabalık mesafe hesabı yapılır. Kalabalık mesafe değeri büyükten küçüğe doğru olacak şekilde kromozomlar cephe içerisinde sıralanır.

Adım 7: Yapılan sıralamadan yararlanılarak çaprazlama ve mutasyon uygulanacak bireyler seçilir.

Adım 8: Seçilen bireylere çaprazlama ve ardından mutasyon işlemleri uygulanarak yeni jenerasyon bireyler oluşturulur.

Adım 9: Yeni jenerasyon bireyler mevcut popülasyondaki bireylerin arasına eklenir.

Adım 10: Popülasyondaki tüm bireylerin her problem hedefi için ayrı olacak şekilde amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 11: Popülasyonda yer alan bireylerin tamamı alternatifler, problem hedefleri kriterler ve amaç fonksiyonu değerleri alternatiflerin kriterler bazındaki değerleri olacak şekilde WASPAS metodu uygulanır. Kromozomların her biri için Q_i değeri hesaplanır.

Adım 12: Kromozomlar Q_i değerleri çerçevesinde büyükten küçüğe doğru sıralanır.

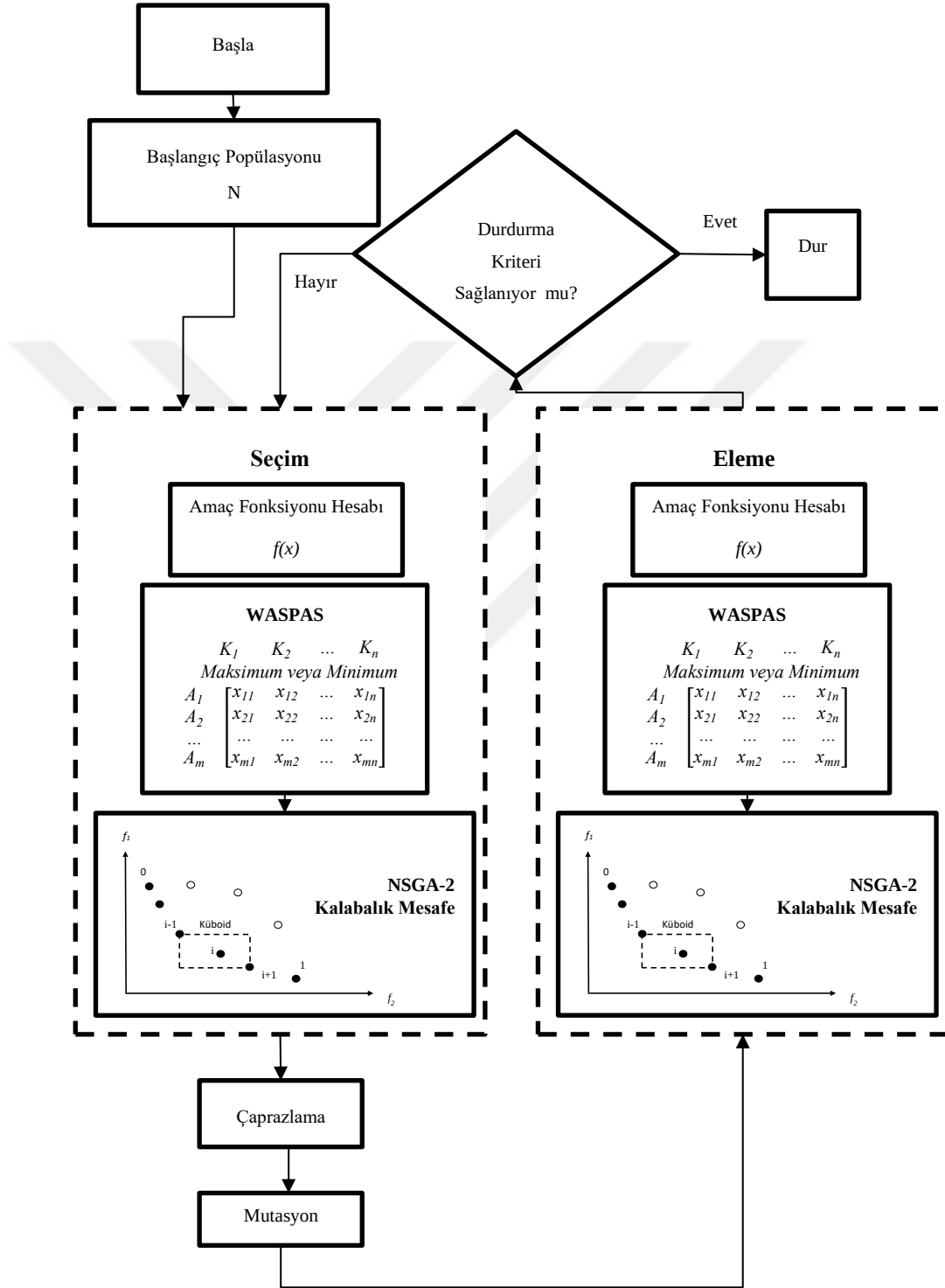
Adım 13: Kromozomlara en küçük Q_i değerine sahip olan 1 olacak şekilde arttırılarak sıra değeri verilir. Aynı Q_i değerine sahip kromozomlara aynı sıra değeri verilir. Sıra değerlerinin her biri bir cepheyi oluşturur.

Adım 14: Aynı cephedeki kromozomların kendi arasında sıralanabilmesi için amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak kalabalık mesafe hesabı yapılır. Kalabalık mesafe değeri büyükten küçüğe doğru olacak şekilde cephe içerisinde kromozomlar sıralanır.

Adım 15:Yapılan sıralamaya göre popülasyon büyüklüğünü (N) aşan bireyler popülasyondan elenir.

Adım 16: Belirlenen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar 2. adımdan itibaren süreç tekrarlanır.

Önerilen yaklaşıma ait akış şeması Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. WSBNSGA-2 yöntemi akış şeması.

4.5. Taguchi Deney Tasarımı

Fisher tarafından tarım faaliyetleri araştırmaları için kullanılmak amacıyla deney tasarımı yöntemleri geliştirilmiş, Genichi Taguchi tarafından endüstriyel şartlarda az sayıda deney ile daha sağlıklı ve verimli sonuçlara ulaşılmasını sağlayan Taguchi Deney Tasarımı yöntemi geliştirilmiştir. [110]. Literatürde bu yöntem, yapay zeka tekniklerinin uygulanması sırasında uygun parametrelerin belirlenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Taguchi metodu uygulanırken öncelikle, faktörler ve seviyeler belirlenmektedir. Ardından uygun ortogonal dizi seçilerek belirlenen deney sayısı kadar deneyler uygulanmaktadır. Problemden hedeflenen değer “en küçük” (y_i ’nin hedef değeri sıfır) ise denklem 4.8, hedeflenen değer “en büyük” (y_i ’nin hedef değeri sonsuz) ise denklem 4.9, hedeflenen değer “nominal değer en iyi” (y_i için belirlenmiş bir hedef değeri var) ise denklem 4.10 ile Sinyal / Gürültü (S/N) oranı hesaplanır [111, 112]. En yüksek S/N oranını veren parametreler tercih edilir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{ds} y_i^2 \right) \quad (4.8)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{ds} \sum_{i=1}^{ds} \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.9)$$

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{u^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.10)$$

4.6. Performans Değerlendirme Metotları

WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamaların sonuçlarının kıyaslanmasında Ortalama RPI değerleri, t testleri ve tüm sonuçların normalizasyonu ile hesaplanan $Minf(x)$ değerlerinden yararlanılmıştır.

4.6.1. Bağlı yüzdelik artış

Bağlı Yüzdelik Artış (RPI), sayının belirli bir değere göre artış oranını ifade etmektedir. Elissaouy ve Allali tarafından yapılan bir çalışmada RPI metotları algoritmaların kıyaslanmasında bir gösterge olarak kullanılmıştır [113]. RPI değerinin küçük olması kıyaslamada daha iyi bir sonucu ifade etmektedir. Çalışmada önerilen yöntem ile NSGA-2 yönteminin, test problemlerinin her biri için hesaplanan RPI

değerlerinin ortalamaları kullanılarak yöntemler karşılaştırılmıştır. Bağıl Yüzdelik Artış hesabı denklem 4.11'de gösterilmiştir. Burada f bir algoritma tarafından hesaplanan bir amaç fonksiyonu değerini, f^* karşılaştırılan algoritmaların tüm sonuçları arasındaki en iyi amaç fonksiyonu değerini ifade etmektedir [62].

$$RPI = \frac{(f - f^*)}{f^*} \times 100 \quad (4.11)$$

4.6.2. Normalizasyon ile karşılaştırma

Çalışmada, global optimum sonucun bilinmemesi sebebiyle yöntemlerin objektif bir şekilde karşılaştırılabilmesi için iki ayrı hedefi (toplam enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanı) birleştiren ve birlikte değerlendirilmesini sağlayan $Minf(x)$ hesaplamasından yararlanılmıştır. Öncelikle değerlerin toplanabilmesi amacıyla normalizasyon yapılmıştır. Toplam enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanı değerlerine ayrı ayrı denklem 4.12'deki min-maks normalizasyonu uygulanmış ve değerler 0-1 aralığına getirilmiştir [114]. Burada X veri setindeki bir değeri, X' normalizasyon yapılmış değeri, $\min(x)$ veri setinin en küçük değerini, $\max(x)$ veri setinin en büyük değerini ifade etmektedir. Normalizasyonun ardından denklem 4.13 kullanılarak, kriterlerin denklem 4.14'teki kurallar dahilinde eşit önem düzeyine sahip olduğu kabulü ile hesaplama yapılmıştır [115].

$$X' = \frac{X - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.12)$$

$$Minf(x) = [w_1 f_{1N} + w_2 f_{2N}] \quad (4.13)$$

$$w_1 + w_2 = 1, w_1 \geq 0, w_2 \geq 0 \quad (4.14)$$

4.6.3. Bağımlı ve bağımsız örneklem testleri

Normal dağılıma uygun verilerden oluşan iki örneklemin ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığının değerlendirilmesi amacıyla, parametrik istatistiksel testlerden olan t testleri kullanılabilir. Örneklemelerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığının değerlendirildiği bu testler, örneklemelerin bağımlı ve bağımsız olma durumuna göre farklılık göstermektedir.

Örneklemlerin bağımsız olduğu durumda 2 Örnek t testi, örneklemlerin bağımlı olduğu durumda Eşleştirilmiş Örneklem t Testi uygulanmaktadır. Testlerin uygulanması sırasında aşağıdaki hipotezlerden yararlanılmaktadır. Test sonucunda elde edilen p değeri, α (istatistiksel anlam düzeyi) değerinden küçük ise H1 hipotezi, büyük ise H0 hipotezi kabul edilir ve böylece sonuçların ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı değerlendirilir.

H0: Sonuçların ortalamaları arasında anlamlı bir fark yoktur.

H1: Sonuçların ortalamaları arasında anlamlı bir fark vardır.



5. UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde problem tanıtılmış ve yapılan uygulamalar detaylandırılmıştır.

5.1. Problemin Tanımı

Çalışmada is adet işin, ms adet makinede, os adet operasyonunun işlem sıralarının, toplam enerji tüketimi (f_1) ve maksimum tamamlanma zamanının (f_2) minimum olması hedeflenerek belirlenmesi istenmektedir. İşlerin her biri aynı önceliğe sahiptir. İşler makinelerde operasyon rotalarının birbirinden farklı olduğu bir atölye ortamında yapılmaktadır. Başlangıçta tüm operasyonların hangi makinelerde yapıldığı bilinmekte olup örneği Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Her bir operasyonun işleme tabi tutulduğu makinedeki işlem süresi (h) başlangıçta belirlidir ve Tablo 5.2’de örnek işlem süreleri yer almaktadır. Makinelerin çalışırken ve boşta olduğu birim zamanda harcadığı enerji miktarları (kWh) bilinmekte olup örneği Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Operasyonların yapıldığı makineler.

İşler/Operasyonlar	Operasyon 1	Operasyon 2	Operasyon 3	Operasyon 4	Operasyon 5	...	Operasyon os
İş 1	3	2	1	5	6		8
İş 2	2	1	3	5	4		6
İş 3	3	1	4	9	6		5
İş 4	2	6	5	8	1		7
İş 5	5	1	3	6	7		9
⋮							
İş is	4	2	7	6	9		8

Tablo 5.2. Operasyonların yapılma süresi.

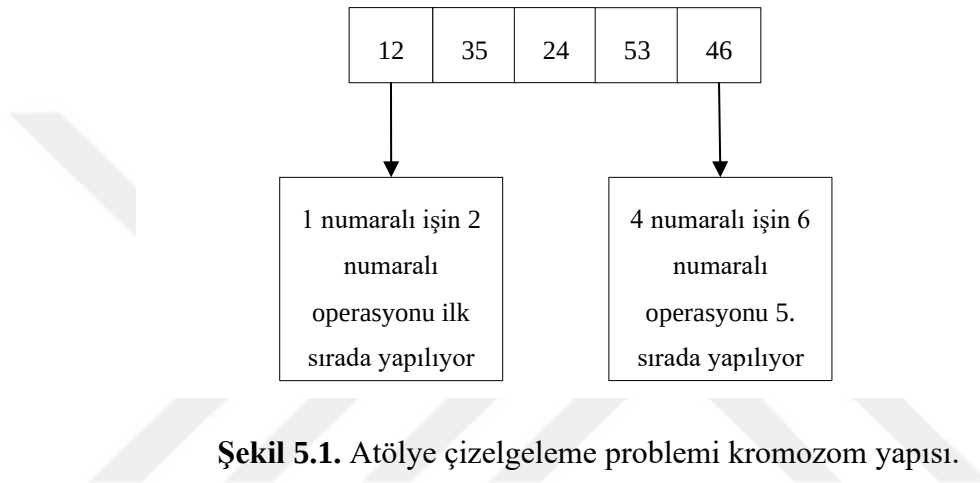
İşler/Operasyonlar	Operasyon 1	Operasyon 2	Operasyon 3	Operasyon 4	Operasyon 5	...	Operasyon os
İş 1	25	22	39	26	53		56
İş 2	10	20	46	15	38		40
İş 3	33	18	39	43	51		35
İş 4	16	17	14	32	43		18
İş 5	23	53	31	41	28		32
⋮							
İş is	50	13	56	25	13		12

Tablo 5.3. Makinelerin enerji tüketimi.

Makineler	Boştaiken harcanan enerji	Çalışırken harcanan enerji
Makine 1	2	8
Makine 2	3	12
Makine 3	3	12
Makine 4	3	10
Makine 5	2	7
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Makine ms	5	10

5.2. Yöntemlerin Python’da Kodlanması

Problemin çözümünde NSGA-2 ve WASPAS metotlarının entegre edilmesiyle geliştirilen WSBNSGA-2 yönteminin uygulanması planlanmıştır. Çözümün ilk adımında rassal olarak olası çözümler kromozomlar halinde kodlanmış ve belirlenen popülasyon büyüklüğünde (N) başlangıç popülasyonu oluşturulmuştur. 5 işin 6 makinede hangi sırayla yapılacağını belirlenmeye çalışıldığı bir çizelgeleme problemi için rassal oluşturulmuş örnek bir kromozomun yapısı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Atölye çizelgeleme problemi kromozom yapısı.

Uygulamalar, Python 3.10’da, Anaconda 3 üzerinden Pycharm Professional 2022.2.3 kullanılarak İntel Core İ5 işlemcili 11. nesil bilgisayarda yapılmıştır. Taguchi Deney Tasarımı ile elde edilen parametre değerleri kullanılmıştır. İş sayısı, makine sayısı, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, iterasyon sayısı, lamda değeri bilgilerinin programa girilmesi ile uygulama yapılmıştır. Çaprazlama yöntemi olarak kısmi eşleşmiş çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. Mutasyon işleminde kromozomlar üzerinde mutasyon oranınca rassal gen değişimi yapılmıştır. Yöntemler her defasında 200 iterasyon olarak uygulanmıştır. Xu vd. GA için 200 iterasyonda başarılı sonuç elde ettiklerini belirtmiştir [116]. WASPAS yönteminin uygulanmasında λ değeri için 0,5 kullanılmıştır.

5.3. Taguchi Deney Tasarımı İle Parametre Optimizasyonu

Taguchi Deney Tasarımı’nın ilk adımında Tablo 5.4’te gösterildiği gibi faktörler ve seviyeler belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Faktörler ve seviyeleri

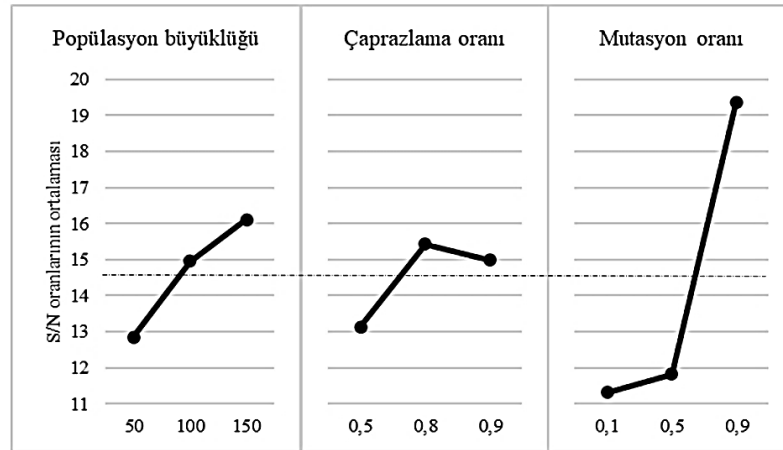
Faktörler	Seviyeler		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Popülasyon Büyüklüğü	50	100	150
Çaprazlama Oranı	0,5	0,8	0,9
Mutasyon Oranı	0,1	0,5	0,9

Minitab 21.1 kullanılarak, belirlenen 3 faktör ve 3 seviyenin bilgisi programa girilmiştir. Taguchi tasarım bölümünde problemin faktör ve seviye sayıları programda seçilmiş, bu faktör ve seviyelerin neler olduğu programa tanıtılmıştır. Taguchi tarafından çok faktörlü optimizasyon için en etkili yöntemlerden olan ortogonal dizi seçenekleri sunulmuştur [117]. Bu seçeneklerden L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Bu nedenle uygun parametrelerin tespiti için 9 deney yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Taguchi tarafından farklı parametre kombinasyonları ile sunulan 9 deney Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Taguchi deney kombinasyonları.

Deney Numarası	Popülasyon Büyüklüğü	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı
1	50	0,5	0,1
2	50	0,8	0,5
3	50	0,9	0,9
4	100	0,5	0,5
5	100	0,8	0,9
6	100	0,9	0,1
7	150	0,5	0,9
8	150	0,8	0,1
9	150	0,9	0,5

Program tarafından belirlenen 9 parametre kombinasyonu kullanılarak 10, 20, 30, 40, 50 iş ve 10, 15, 20 makineden oluşan 15 farklı test problemi üzerinde NSGA-2 ve WSBNSGA-2 yöntemleri ile uygulama yapılmıştır. Deneylerin her biri 5 kez uygulanmış ve elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin ortalamaları alınarak kullanılmıştır [118]. Bu değerlere normalizasyon yapılması ve ardından denklem 4.13'ün kullanılması ile $Minf(x)$ sonuçları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, programda parametre kombinasyonlarının karşılığında sonuç değerleri olarak kullanılmıştır. Örnek olarak WSBNSGA-2 yönteminin 20 iş 10 makine probleminde Minitab programında belirlenen 9 parametre kombinasyonuna göre yapılan deneme sonuçları, programda 9 deney kombinasyonunun yanına bir sütun olarak eklenmiştir. Ardından Minitab üzerinde sırası ile Taguchi yöntemi adımları uygulanmıştır. Uygulamada, Taguchi tasarımının analizi için oluşturulan bölüm programda seçilmiştir. Bu bölümde 9 parametre kombinasyonuna göre yapılan denemelerin sonuçları kullanılmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinde küçük olanın daha iyi bir sonuç olması (minimizasyon problemi olması) sebebiyle, programın ilgili bölümünde en küçük değerin daha iyi olduğu durumda kullanılan fonksiyon işaretlenmiştir. Böylece S/N oranı hesabında bu duruma uygun olan formülasyonun kullanılması sağlanmıştır. Program ile Şekil 5.2'deki S/N oranı grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.2. S/N oranı grafik sonucu.

Şekil 5.2'de yer alan S/N oranı grafiği incelendiğinde, WSBNSGA-2 yönteminin 20 iş 10 makine problemi için en iyi parametre değerleri görülmektedir. Popülasyon büyüklüğü 150, çaprazlama oranı 0,8, mutasyon oranı ise 0,9 olarak tercih edildiğinde algoritmanın $Minf(x)$ değerleri açısından daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu işlemler tüm problem büyüklüklerinde WSBNSGA-2 ve NSGA-2

yöntemleri için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Tüm problemlerde yapılan Taguchi uygulaması sonucu belirlenen en iyi parametreler Tablo 5.6’da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Tüm problem büyüklükleri için Taguchi yöntemi sonuçları.

is x ms	Yöntem	Popülasyon Büyüküğü	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı
10x10	WSBNSGA-2	100	0,5	0,9
	NSGA-2	100	0,5	0,9
10x15	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,9	0,9
10x20	WSBNSGA-2	100	0,5	0,9
	NSGA-2	100	0,5	0,9
20x10	WSBNSGA-2	150	0,8	0,9
	NSGA-2	150	0,9	0,9
20x15	WSBNSGA-2	100	0,8	0,9
	NSGA-2	100	0,9	0,5
20x20	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,8	0,9
30x10	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	100	0,8	0,9
30x15	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	100	0,5	0,9
30x20	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,8	0,9
40x10	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,5	0,5

Tablo 5.6. (Devamı) Tüm problem büyüklükleri için Taguchi yöntemi sonuçları.

is x ms	Yöntem	Popülasyon Büyükliği	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı
40x15	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,8	0,9
40x20	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,8	0,9
50x10	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,9	0,9
50x15	WSBNSGA-2	100	0,9	0,5
	NSGA-2	100	0,9	0,5
50x20	WSBNSGA-2	150	0,9	0,9
	NSGA-2	150	0,8	0,9

Tablo 5.6 incelendiğinde 30x10 ve 30x15 problemleri dışındaki tüm test problemlerinde WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemlerinin aynı problem büyüklüğünde, aynı popülasyon büyüklüğü değerinde başarılı sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir.

5.4. ANOVA Testi ile Parametrelerin Sonuca Katkısının Hesaplanması

Taguchi uygulaması ile yöntemler için parametre değerleri belirlenmiştir. Sonuç üzerinde etkisi olduğu değerlendirilen bu parametrelerin yöntemlerin performansı ve dolayısı ile elde edilen sonuçlar üzerindeki etki seviyelerinin analiz edilmesi için Minitab programında ANOVA testi uygulanmıştır. ANOVA testi, tüm problem büyüklüklerinde hem WSBNSGA-2 hem de NSGA-2 yöntemi için elde edilen Taguchi yöntemi sonuçlarına ayrı ayrı uygulanmıştır. Test uygulanırken programda %95 güven düzeyi seçilmiştir. Programda gerekli tüm seçimlerin yapılmasının ardından ANOVA testi sonuçları elde edilmiştir. ANOVA testi uygulanması ile Minitab programı tarafından serbestlik derecesi, düzeltilmiş kareler toplamaları, düzeltilmiş ortalama kareler, F değerleri, katkı oranı, p değerleri hesaplanmıştır. Test sonucunda elde edilen F değerleri, $\alpha=0,05$ anlam düzeyinde kullanılan F tablo

değerlerinden yararlanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen p değerleri Tablo 5.7'deki açıklamalar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Tablo 5.7. p değerlerinin açıklanması [119].

p değeri	Açıklaması
$0,01 \leq p < 0,05$	İstatistiksel olarak anlamlı.
$0,001 \leq p < 0,01$	Yüksek düzeyde istatistiksel olarak anlamlı.
$p < 0,001$	Çok yüksek düzeyde istatistiksel olarak anlamlı.
$0,05 \leq p < 0,10$	Sınırdan anlamlılık / anlamlılık eğilimi var.
$p > 0,10$	İstatistiksel olarak anlamlı değil.

Tablo 5.7'de yer alan bilgilerden yararlanılarak, ANOVA testi ile test problemlerinde her iki yöntem için elde edilen 3 parametrenin p değerlerine bakıldığında, parametrelerin $p > 0,10$ olduğu durumda sonuç üzerinde katkısı olmadığı değerlendirilmesi yapılmaktadır. Parametreler için $0,05 \leq p < 0,10$ olduğu durumda sonuca katkının sınırdan anlamlılık düzeyinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Test sonuçlarında $0,01 \leq p < 0,05$ olması, parametrenin sonuç üzerinde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde katkısı olduğunu göstermektedir. Parametre için $0,001 \leq p < 0,01$ sonucu elde edildiğinde parametrenin sonuca katkısının yüksek düzeyde istatistiksel anlam taşıdığı ve $p < 0,001$ olduğunda çok yüksek düzeyde istatistiksel anlam taşıdığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Tüm test problemlerinde yapılan Taguchi uygulaması sonuçlarından yararlanılarak, Minitab programında ANOVA testi uygulanmış ve 10 iş problemlerine ait ANOVA testi sonuçları Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. 10 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2	Popülasyon Büyükliği/100	2	99,986	49,9928	111,88	36,31	0,009
10X10	Çaprazlama Oranı/0,5	2	37,333	18,6664	41,77	13,56	0,023

Tablo 5.8. (Devamı) 10 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 10X10	Mutasyon Oranı/0,9	2	137,145	68,5724	153,46	49,81	0,006
	Hata	2	0,894	0,4468		0,32	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 10X10	Popülasyon Büyükliği/100	2	34,6604	17,3302	294,71	35,61	0,003
	Çaprazlama Oranı/0,5	2	10,2448	5,1224	87,11	10,52	0,011
	Mutasyon Oranı/0,9	2	52,3214	26,1607	444,88	53,75	0,002
WSBNSGA-2 10X15	Hata	2	0,1176	0,0588		0,12	
	Toplam	8				100	
	Popülasyon Büyükliği/150	2	142,803	71,401	23,2	42,95	0,041
NSGA-2 10X15	Çaprazlama Oranı/0,9	2	129,428	64,714	21,03	38,93	0,045
	Mutasyon Oranı/0,9	2	54,087	27,043	8,79	16,27	0,102
	Hata	2	6,154	3,077		1,85	
WSBNSGA-2 10X20	Toplam	8				100	
	Popülasyon Büyükliği/150	2	71,872	35,936	44,88	42,96	0,022
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	63,607	31,8035	39,72	38,02	0,025
NSGA-2 10X15	Mutasyon Oranı/0,9	2	30,215	15,1073	18,87	18,06	0,050
	Hata	2	1,602	0,8005		0,96	
	Toplam	8				100	
WSBNSGA-2 10X20	Popülasyon Büyükliği/100	2	49,072	24,5358	35,19	24,74	0,028
	Çaprazlama Oranı/0,5	2	37,936	18,9678	24,20	19,12	0,035
	Mutasyon Oranı/0,9	2	109,98	54,9900	78,87	55,44	0,013
WSBNSGA-2 10X20	Hata	2	1,394	0,6972		0,70	
	Toplam	8				100	

Tablo 5.8. (Devamı) 10 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
NSGA-2 10X20	Popülasyon Büüklüğü/100	2	93,091	46,5456	55,65	37,75	0,018
	Çaprazlama Oranı/0,5	2	20,051	10,0256	11,99	8,13	0,077
	Mutasyon Oranı/0,9	2	131,81	65,9049	78,79	53,45	0,013
	Hata	2	1,673	0,8364		0,68	
	Toplam	8				100	

Tablo 5.8 incelendiğinde; 10x10 probleminde tüm parametreler için p değerlerinin 0,05'ten küçük olması sebebiyle parametrelerin sonuç üzerinde, istatistiksel olarak/yüksek düzeyde istatistiksel olarak anlamlı katkılarının olduğu görülmektedir. Parametrelerin sağladığı katkının oranı Katkı % sütununda görülmektedir. Parametrelerin sonuca katkısı F değeri açısından değerlendirildiğinde %5 anlamlılık düzeyi ($\alpha=0,05$) için F değeri tablosunda F değeri hesaplanacak parametrenin serbestlik derecesi (v_1) ile hatanın serbestlik derecesinin (v_2) kesiştiği noktadaki F tablo değeri referans alınmaktadır. ANOVA testi sonucundaki F değeri tablo değerinden F_{α, v_1, v_2} büyük ise bu parametrenin sonuç üzerinde katkısı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca F değerinin büyük olması o parametrenin sonuca katkısının yüksek olduğunu göstermektedir. Örneğin, 10x10 probleminde WSBNSGA-2 yöntemi için yapılan uygulamada Mutasyon oranının p değeri 0,006 olduğundan ve hesaplanan 153,46 F değerinin, $F_{0,05,2,2}$ tablo değerinden (19) büyük olması bu parametrenin sonuca katkısının olduğunu göstermektedir. Ayrıca F değeri en yüksek olan parametre de mutasyon oranı olmuş ve sonuca katkı oranı diğer parametrelerden daha yüksek olmuştur. 10x15 probleminde WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamada p değerinin mutasyon oranı 0,102 ile 0,1'den büyük olmuştur. Bu durum yapılan uygulamada mutasyon oranının sonuca anlamlı bir katkısının olmadığını ve diğer parametrelerin 0,05'ten küçük p değeri ile sonuca anlamlı bir katkı sağladığını göstermektedir. NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda, 10x15 probleminde sonuca mutasyon oranı sınırda anlamlılık düzeyinde, diğer tüm parametreler istatistiksel olarak anlamlı düzeyde katkı sağlamıştır. 10x20 probleminde çaprazlama oranının p değerinin 0,077 hesaplanarak 0,05'ten büyük ve 0,1'den küçük olması

sebebiyle bu parametrenin NSGA-2 yönteminin sonucuna sınırda anlamlılık düzeyinde bir katkısının olduğu ve diğer parametrelerin sonuca anlamlı düzeyde katkısı olduğu görülmüştür. 10x20 problemlerinde WSBNSGA-2 yöntemi için tüm parametrelerin p değerlerine bakıldığında, sonuca istatistiksel olarak anlamlı katkı sağladıkları görülmektedir. Taguchi yöntemi sonuçlarının ANOVA testinde, 20 iş problemlerinin sonuçları Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. 20 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Topamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 20X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	8,081	4,0403	303,81	10,59	0,041
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	7,876	3,9378	296,1	8,62	0,041
	Mutasyon Oranı/0,9	2	106,155	53,0777	3991,09	80,78	0,011
	Hata	1	0,013	0,0133		0,01	
	Toplam	7				100	
NSGA-2 20X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	4,1222	2,0611	24,1	44,2	0,04
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	3,6935	1,84677	21,6	39,6	0,044
	Mutasyon Oranı/0,9	2	1,3395	0,66975	7,83	14,36	0,113
	Hata	2	0,171	0,08551		1,83	
	Toplam	8				100	
WSBNSGA-2 20X15	Popülasyon Büyüklüğü/100	2	26,6155	13,3077	2429,46	59,12	0,014
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	15,1753	7,5876	1385,2	38,06	0,019
	Mutasyon Oranı/0,9	2	1,2964	0,6482	118,33	2,81	0,065
	Hata	1	0,0055	0,0055		0,01	
	Toplam	7				100	
NSGA-2 20X15	Popülasyon Büyüklüğü/100	2	14,6438	7,3219	30,99	42,59	0,031
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	10,4102	5,2051	22,03	30,27	0,043

Tablo 5.9. (Devamı) 20 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
NSGA-2 20X15	Mutasyon Oranı/0,5	2	8,8603	4,4302	18,75	25,77	0,051
	Hata	2	0,4725	0,2362		1,37	
	Toplam	8				100	
WSBNSGA-2 20X20	Popülasyon Büyükliği/150	2	24,0457	12,0228	78,56	44,15	0,013
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	24,2056	12,1028	79,08	44,45	0,012
	Mutasyon Oranı/0,9	2	5,903	2,9515	19,29	10,84	0,049
	Hata	2	0,3061	0,1530		0,56	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 20X20	Popülasyon Büyükliği/150	2	8,097	4,0483	257,95	8,03	0,04
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	8,853	4,4263	282,04	7,71	0,04
	Mutasyon Oranı/0,9	2	149,555	74,7774	4764,74	84,25	0,01
	Hata	1	0,016			0,01	
	Toplam	7				100	

Tablo 5.9’da yer alan 20 iş problemlerine ait sonuçlar incelendiğinde, 20x10 problemi NSGA-2 uygulaması sonucu mutasyon oranının p değerinin (0,113) 0,1’den büyük olması sebebiyle bu parametrenin sonuca anlamlı bir katkısının olmadığı görülmektedir. 20x15 problemi WSBNSGA-2 uygulaması sonucu mutasyon oranının p değeri 0,065 ve 20x15 problemi NSGA-2 uygulaması sonucu mutasyon oranının p değeri 0,051 olarak elde edildiği ve bu değerlerin $0,05 \leq p < 0,10$ aralığında olması sebebiyle sonuca katkıları sınırda anlamlılık düzeyinde olmuştur. 20 iş problemlerinde yapılan diğer uygulamalarda parametrelerin p değerlerine bakıldığında sonuç üzerinde anlamlı katkı sağladıkları görülmektedir. 20x10 probleminde WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda F değeri diğer parametrelerden daha büyük olan mutasyon oranının sonuç üzerinde etkisi daha fazla olurken; 20x15 probleminde popülasyon büyüklüğünün, 20x20 probleminde çaprazlama oranının etkisi daha fazla olmuştur. 20x10 ve 20x15 problemlerinde NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda

popülasyon büyüklüğü, 20x20 problemi uygulamasında mutasyon oranı yüksek F değerine sahip ve sonucu daha fazla etkileyen parametreler olmuştur. 30 iş problemi üzerinde yapılan Taguchi uygulamasının ANOVA test sonuçları Tablo 5.10’da yer almaktadır.

Tablo 5.10. 30 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 30X10	Popülasyon Büyüküğü/150	2	49,8526	24,9263	54,53	43,06	0,018
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	46,5107	23,2554	50,87	40,18	0,019
	Mutasyon Oranı/0,9	2	18,484	9,242	20,22	15,97	0,047
	Hata	2	0,9142	0,4571		0,79	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 30X10	Popülasyon Büyüküğü/100	2	104,293	52,1465	336,58	42,37	0,039
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	74,829	37,4143	241,49	27,17	0,045
	Mutasyon Oranı/0,9	2	67,679	33,8396	218,42	30,39	0,048
	Hata	1	0,155	0,1549		0,07	
	Toplam	7				100	
WSBNSGA-2 30X15	Popülasyon Büyüküğü/150	2	164,141	82,071	43,31	50,29	0,023
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	72,929	36,464	19,24	22,34	0,049
	Mutasyon Oranı/0,9	2	85,533	42,766	22,57	26,21	0,042
	Hata	2	3,79	1,895		1,16	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 30X15	Popülasyon Büyüküğü/100	2	13,388	9,194	20,45	29,74	0,047
	Çaprazlama Oranı/0,5	2	17,29	8,645	19,23	27,96	0,049
	Mutasyon Oranı/0,9	2	25,2517	12,6259	28,08	40,84	0,034

Tablo 5.10. (Devamı) 30 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
NSGA-2 30X15	Hata	2	0,8993	0,4496		1,45	
	Toplam	8				100	
	Popülasyon Büyükülüğü/150	2	23,3047	11,6523	49,10	43,38	0,02
WSBNSGA-2 30X20	Çaprazlama Oranı/0,9	2	24,9499	12,4749	52,57	46,44	0,019
	Mutasyon Oranı/0,9	2	4,9961	2,4980	10,53	9,30	0,087
	Hata	2	0,4746	0,2373		0,88	
NSGA-2 30X20	Toplam	8				100	
	Popülasyon Büyükülüğü/150	2	12,83	6,415	601,54	12,67	0,03
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	11,863	5,9316	556,21	7,77	0,03
	Mutasyon Oranı/0,9	2	149,753	74,8763	7021,2	79,55	0,01
	Hata	1	0,011	0,0107		0,01	
	Toplam	7				100	

Tablo 5.10 sonuçları değerlendirildiğinde, 30 iş problemlerinde yalnızca 20 makine problemindeki WSBNSGA-2 uygulamasında p değeri $0,05 \leq p < 0,10$ olan mutasyon oranının sonuca sınırda anlamlılık düzeyinde bir katkısı olduğu, diğer tüm 30 iş problemleri parametrelerinin p değerlerinin $0,01 \leq p < 0,05$ aralığında olması sebebiyle bu parametrelerin sonuç üzerinde istatistiksel olarak anlamlı katkıya sahip olduğu görülmüştür. WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 30x10 ve 30x15 problemlerinde popülasyon büyüklüğü, 30x20 probleminde çaprazlama oranı diğer parametrelere kıyasla daha büyük F değerine ve sonuç üzerinde daha yüksek katkıya sahip olmuştur. NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 30x10 probleminde popülasyon büyüklüğü, 30x15 ve 30x20 problemlerinde mutasyon oranı sonuca daha fazla katkı sağlamıştır. 40 iş problemlerinde yapılan Taguchi uygulamasının ANOVA test sonuçları Tablo 5.11 gösterilmiştir.

Tablo 5.11. 40 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 40X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	69,977	34,989	29,53	42,59	0,033
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	68,929	34,464	29,09	41,95	0,033
	Mutasyon Oranı/0,9	2	23,026	11,513	9,72	14,01	0,093
	Hata	2	2,37	1,185		1,44	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 40X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	158,156	79,078	21,32	42,74	0,045
	Çaprazlama Oranı/0,5	2	63,954	31,977	8,62	17,28	0,104
	Mutasyon Oranı/0,5	2	140,483	70,241	18,94	37,97	0,05
	Hata	2	7,417	3,708		2	
	Toplam	8				100	
WSBNSGA-2 40X15	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	46,8451	23,4226	57,59	43,34	0,017
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	48,4377	24,2189	59,55	44,81	0,017
	Mutasyon Oranı/0,9	2	12,0005	6,0003	14,75	11,10	0,063
	Hata	2	0,8134	0,4067		0,75	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 40X15	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	11,008	5,5042	594,14	9,36	0,029
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	10,657	5,3285	575,17	7,29	0,029
	Mutasyon Oranı/0,9	2	164,442	82,221	8875,16	83,34	0,008
	Hata	1	0,009	0,0093		0,00	
	Toplam	7				100	
WSBNSGA-2 40X20	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	24,2606	12,1303	47,77	43,54	0,021
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	25,0297	12,5148	49,28	44,92	0,02

Tablo 5.11. (Devamı) 40 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 40X20	Mutasyon Oranı/0,9	2	5,9259	2,9630	11,67	10,63	0,079
	Hata	2	0,5079	0,2539		0,91	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 40X20	Popülasyon Büyükliği/150	2	11,288	5,6442	237,67	11,37	0,046
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	11,964	5,982	251,89	8,46	0,045
	Mutasyon Oranı/0,9	2	142,483	71,2416	2999,88	80,16	0,013
	Hata	1	0,024	0,0237		0,01	
	Toplam	7				100	

Tablo 5.11’deki sonuçlar incelendiğinde, 40 iş problemlerinde WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan tüm uygulamalarda mutasyon oranının p değerlerinin $0,05 \leq p < 0,10$ olması sebebiyle bu parametrenin sonuca sınırda anlamlılık düzeyinde bir katkısı olduğu, diğer parametrelerin $0,01 \leq p < 0,05$ değerleri ile istatistiksel olarak anlamlı düzeyde sonuca katkı sağladığı görülmektedir. 40x10 problemde NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamanın sonucunda çaprazlama oranı için $p > 0,10$ olması parametrenin sonuca anlamlı bir katkısının olmadığını, mutasyon oranı için $0,05 \leq p < 0,10$ olması parametrenin sınırda anlamlılık düzeyinde katkı sağladığını göstermektedir. 40x15 problemde NSGA-2 ile yapılan uygulamalarda, mutasyon oranının p değerine bakıldığında yüksek düzeyde istatistiksel anlam ile sonuca katkı sağladığı görülmektedir. NSGA-2 yöntemi ile 40 iş problemlerinde yapılan diğer uygulamalarda parametreler için $0,01 \leq p < 0,05$ olduğundan, bu parametreler sonuca anlamlı katkı sağlamıştır. WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 40x10 problemde popülasyon büyüklüğü, 40x15 ve 40x20 problemlerinde çaprazlama oranı yüksek F değerine ve sonuç üzerinde yüksek oranda katkıya sahip olmuştur. NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 40x10 problemde popülasyon büyüklüğü, 40x15 ve 40x20 problemlerinde mutasyon oranı sonuç üzerinde yüksek oranda katkı sağlamıştır. 50 iş problemlerinde yapılan Taguchi uygulamasının ANOVA test sonuçları Tablo 5.12’de yer almaktadır.

Tablo 5.12. 50 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 50X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	89,705	44,8525	344,51	39,46	0,003
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	115,853	57,9263	444,93	50,97	0,002
	Mutasyon Oranı/0,9	2	21,493	10,7463	82,54	9,46	0,012
	Hata	2	0,26	0,1302		0,11	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 50X10	Popülasyon Büyüklüğü/150	2	44,0537	22,0268	134,33	36,58	0,007
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	48,8613	24,4307	148,99	40,57	0,007
	Mutasyon Oranı/0,9	2	27,2015	13,6008	82,94	22,58	0,012
	Hata	2	0,328	0,164		0,27	
	Toplam	8				100	
WSBNSGA-2 50X15	Popülasyon Büyüklüğü/100	2	131,446	65,723	21,84	42,69	0,044
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	135,25	67,625	22,47	43,93	0,043
	Mutasyon Oranı/0,5	2	35,182	17,591	5,85	11,43	0,146
	Hata	2	6,018	3,009		1,95	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 50X15	Popülasyon Büyüklüğü/100	2	91,761	45,88	22,82	44,27	0,042
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	81,355	40,677	20,24	39,25	0,047
	Mutasyon Oranı/0,5	2	30,116	15,058	7,49	14,53	0,118
	Hata	2	4,02	2,01		1,94	
	Toplam	8				100	

Tablo 5.12. (Devamı) 50 iş problemi için ANOVA testi sonuçları.

Yöntem is x ms	Kaynak / Hesaplanan Değeri	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	Katkı %	p
WSBNSGA-2 50X20	Popülasyon Büyükliği/150	2	18,0671	9,0335	39,58	43,75	0,025
	Çaprazlama Oranı/0,9	2	17,57	8,7850	38,49	42,54	0,025
	Mutasyon Oranı/0,9	2	5,2055	2,6027	11,40	12,60	0,081
	Hata	2	0,4565	0,2282		1,11	
	Toplam	8				100	
NSGA-2 50X20	Popülasyon Büyükliği/150	2	12,368	6,184	3783,17	10,17	0,01
	Çaprazlama Oranı/0,8	2	12,857	6,4287	3932,85	8,65	0,01
	Mutasyon Oranı/0,9	2	150,361	75,1803	45993,06	81,18	0,00
	Hata	1	0,002	0,0016		0	
	Toplam	7				100	

Tablo 5.12'deki sonuçların 50x20 problemi WSBNSGA-2 yöntemi uygulamasında, mutasyon oranının p değeri $0,05 \leq p < 0,10$ arasında olduğundan sonuca sınırda anlamlılık düzeyinde katkısı olduğu görülmektedir. 50x15 problemde her iki yöntem ile yapılan uygulamalarda p değerlerinin 0,1'den büyük olması, mutasyon oranının sonuca anlamlı bir katkısının olmadığını göstermektedir. WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri için diğer 50 iş problemlerinde parametrelerin p değerlerine bakıldığında istatistiksel olarak/yüksek düzeyde istatistiksel olarak sonuca anlamlı katkı sağladıkları görülmektedir. WSBNSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 50x20 problemde popülasyon büyüklüğünün, 50x10 ve 50x15 problemlerinde çaprazlama oranının F değerleri ve sonuca katkısı yüksek olmuştur. NSGA-2 yöntemi ile yapılan uygulamalarda 50x10 problemde çaprazlama oranı, 50x15 problemde popülasyon büyüklüğü ve 50x20 problemde mutasyon oranı yüksek F değerine ve sonuca yüksek oranda katkıya sahip olmuştur.

5.5. Test Problemleri Üzerinde Çok Tekrarlı Uygulamaların Yapılması

Taguchi yöntemi uygulanarak belirlenen parametreler ile 10, 20, 30, 40, 50 iş sayıları ve 10, 15, 20 makine sayıları ile yapılan 35 tekrarlı denemelerin sonucunda, WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemlerinin f_1 ve f_2 sonuçları elde edilmiştir. Toplam enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanına ait bu sonuçlara her problem büyüklüğünde ayrı olacak şekilde min-maks normalizasyonu kullanılarak normalizasyon yapılmış ve denklem 4.13 kullanılarak $Minf(x)$ değerleri elde edilmiştir. Tüm problem büyüklüklerinde yapılan 35 tekrar sonucunda elde edilen f_1 ve f_2 değerleri ile $Minf(x)$ değerleri hesaplanmıştır.

5.6. Taguchi Yönteminin Parametre Belirleme Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Taguchi tarafından belirlenen 9 farklı parametre kombinasyonunun her birinin 5 defa tekrarlanması ve bu tekrarların ortalamalarının alınması ile hesaplanan $Minf(x)$ değerleri, Taguchi ile belirlenen en iyi parametrelerin kullanılmasıyla yapılan 35 denemenin sonucunda hesaplanan $Minf(x)$ değerlerinin ortalamaları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için Taguchi uygulamasında elde edilen sonuçlar ve 35 deneme sonuçlarına problem büyüklüklerinin her birinde ayrı olacak şekilde birlikte normalizasyon işlemi uygulanarak, $Minf(x)$ değerleri hesaplanmıştır. Karşılaştırmalarda 35 denemenin sonucunda elde edilen $Minf(x)$ değerlerinin ortalamasından (Deney numarası: 0) yararlanılmıştır. Tablo 5.13'te 10 iş problemlerinde elde edilen sonuçlar verilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.13. 10 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

	Deney Nu.	10 iş x 10 makine		10 iş x 15 makine		10 iş x 20 makine	
		WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
35 Tekrarın							
Ortalama	0	0,3048	0,417	0,3432	0,4366	0,3181	0,5319
$Minf(x)$							
Sonucu							

Tablo 5.13. (Devamı) 10 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

Deney Nu.	10 iş x 10 makine		10 iş x 15 makine		10 iş x 20 makine	
	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
1	0,6114	0,6778	0,8271	0,8972	0,7996	0,8420
2	0,6217	0,6885	0,7893	0,8588	0,8115	0,8539
3	0,5082	0,5738	0,5260	0,5953	0,7569	0,7589
4	0,4607	0,5258	0,6505	0,7201	0,7080	0,7055
5	0,4098	0,4743	0,6246	0,6954	0,6768	0,6697
6	0,5440	0,6100	0,5800	0,6490	0,7783	0,7669
7	0,4384	0,5033	0,5205	0,5901	0,6761	0,6737
8	0,5136	0,6197	0,5991	0,6683	0,8080	0,8055
9	0,5517	0,6176	0,4506	0,5189	0,8186	0,7713

Tablo 5.13 incelendiğinde 10 iş problemleri üzerinde yapılan uygulamalarda hem WSBNSGA-2 hem de NSGA-2 yöntemi ile en iyi parametre değerleri kullanılarak yapılan uygulamaların, her iki yöntemin de Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonu ile yapılan uygulamaların sonuçlarından daha küçük ortalama $Minf(x)$ değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum 10 iş probleminde her iki yöntem için de Taguchi'nin parametre belirlemede başarılı olduğunu göstermektedir. 20 iş problemleri için yapılan karşılaştırma Tablo 5.14'tedir.

Tablo 5.14. 20 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

Deney Nu.	20 iş x 10 makine		20 iş x 15 makine		20 iş x 20 makine		
	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	
35 Tekrarın Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	0	0,1527	0,2333	0,3038	0,3789	0,3134	0,4071
1	0,5249	0,9928	0,6182	0,8355	0,9913	0,8376	
2	0,4550	0,9825	0,5542	0,7820	0,9667	0,7307	
Taguchi ile Belirlenen 9 Kombinasyonun Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	3	0,3661	0,8131	0,3487	0,7833	0,7538	0,5877
4	0,4525	0,8883	0,6027	0,7124	0,8532	0,7289	
5	0,3534	0,8445	0,5092	0,7947	0,8121	0,5666	

Tablo 5.14. (Devamı) 20 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

	Deney Nu.	20 iş x 10 makine		20 iş x 15 makine		20 iş x 20 makine	
		WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
Taguchi ile Belirlenen 9 Kombinasyonun Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	6	0,4544	0,8553	0,5834	0,6767	0,7997	0,7290
	7	0,3755	0,8027	0,7112	0,9900	0,7417	0,5986
	8	0,4246	0,8617	0,6259	0,9701	0,8142	0,6918
	9	0,2989	0,7848	0,7412	0,7249	0,7016	0,4956

Tablo 5.14 incelendiğinde 20 iş problemlerinde WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri ile Taguchi'nin belirlediği en iyi parametre değerleri kullanılarak yapılan uygulamaların, Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonu kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla daha küçük değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle 20 iş problemlerinde parametre belirlemede Taguchi'nin etkin bir performans gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır. 30 iş problemlerinde iki yöntem için de yapılan kıyaslamalar Tablo 5.15'te gösterilmiştir.

Tablo 5.15. 30 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

	Deney Nu.	30 iş x 10 makine		30 iş x 15 makine		30 iş x 20 makine	
		WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
35 Tekrarın							
Ortalama	0	0,34	0,4434	0,3954	0,4932	0,2766	0,354
$Minf(x)$							
Sonucu							

Tablo 5.15. (Devamı) 30 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

Deney Nu.	30 iş x 10 makine		30 iş x 15 makine		30 iş x 20 makine	
	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
1	0,9454	0,9725	0,8367	0,7236	0,9848	0,7743
2	0,9197	0,7965	0,8037	0,7407	0,9546	0,6399
3	0,6728	0,7971	0,4993	0,7019	0,7006	0,4808
4	0,7861	0,7287	0,6478	0,5961	0,8194	0,6407
5	0,7431	0,5545	0,6180	0,6045	0,7877	0,4414
6	0,7285	0,7376	0,5690	0,7007	0,7545	0,6370
7	0,6629	0,7299	0,4570	0,5790	0,6936	0,4752
8	0,7424	0,7152	0,5454	0,7723	0,7714	0,5775
9	0,6207	0,5041	0,4689	0,8005	0,6328	0,3624

Tablo 5.15'te yer alan sonuçlar, 30 iş problemlerinde WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemlerinin Taguchi ile belirlenen parametreler ile elde edilen sonuçlarının, Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonu ile elde edilen ortalama $Minf(x)$ sonuçlarından daha küçük olduğunu ve belirlenen parametrelerin etkin sonuçlar sağladığını göstermektedir. 40 iş problemlerinde iki yöntem için sonuçların karşılaştırılması Tablo 5.16'da gösterilmiştir.

Tablo 5.16. 40 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

Deney Nu.		40 iş x 10 makine		40 iş x 15 makine		40 iş x 20 makine	
		WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
35 Tekrarın Ortalama $Minf(x)$ Sonucu Taguchi ile Belirlenen 9 Kombinasyonun Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	0	0,2475	0,3333	0,336	0,3484	0,308	0,3035
	1	0,9786	0,5059	0,8978	0,8300	0,9897	0,7846
	2	0,9322	0,5556	0,8559	0,6790	0,9519	0,6263
	3	0,6007	0,5923	0,5930	0,5045	0,6637	0,4457
	4	0,7570	0,4372	0,7187	0,6820	0,7987	0,6271
	5	0,7222	0,7669	0,7011	0,4548	0,7636	0,4008
	6	0,6176	0,8120	0,6446	0,6752	0,7246	0,6272
	7	0,5932	0,4292	0,5896	0,4896	0,6560	0,4418
	8	0,6928	0,5289	0,6654	0,6371	0,7440	0,5604
9	0,4505	0,3459	0,5115	0,3747	0,5862	0,3081	

Tablo 5.16'daki sonuçlar, 40 iş problemlerinde WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri uygulandığında Taguchi ile belirlenen en iyi parametreler kullanıldığında, Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonu kullanıldığında elde edilen sonuçlara kıyasla daha küçük ortalama $Minf(x)$ değerleri elde edildiğini göstermektedir. 40 iş problemlerinde her iki yöntem için de Taguchi ile belirlenen parametrelerin etkin

olduğu görülmektedir. 50 iş problemlerinde yapılan uygulamaların sonuçlarına ait karşılaştırmalar Tablo 5.17’de yer almaktadır.

Tablo 5.17. 50 iş problemi için Taguchi sonuçlarının doğrulanması.

Deney Nu.		50 iş x 10 makine		50 iş x 15 makine		50 iş x 20 makine	
		WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2
35 Tekrarın Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	0	0,2997	0,3826	0,4099	0,4785	0,3489	0,3782
	1	0,8444	0,9289	0,7271	0,7581	0,9917	0,7820
	2	0,8058	0,8793	0,7028	0,7315	0,9635	0,6657
	3	0,4688	0,5540	0,6437	0,7033	0,7365	0,5247
Taguchi ile Belirlenen 9 Kombinasyonun Ortalama $Minf(x)$ Sonucu	4	0,6240	0,7088	0,5784	0,6072	0,8423	0,6658
	5	0,5946	0,6824	0,6668	0,6975	0,8116	0,4849
	6	0,4580	0,6191	0,4926	0,5223	0,7853	0,6554
	7	0,4627	0,5486	0,9315	0,9647	0,7296	0,5224
	8	0,5594	0,6919	0,8854	0,9190	0,8000	0,6230
	9	0,3729	0,4805	0,5833	0,6128	0,6777	0,4182

Tablo 5.17 incelendiğinde 50 iş problemleri için belirlenen en iyi parametrelerle 35 tekrar ile uygulanan WSBNSGA-2 yönteminin ortalama $Minf(x)$ sonucunun Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonu kullanılarak WSBNSGA-2 yönteminin 5’er

tekrar ile uygulanması sonucu elde edilen ortalama $Minf(x)$ değerlerinden daha küçük sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca NSGA-2 yönteminin 35 kez tekrarı ile elde edilen ortalama $Minf(x)$ sonucunun da Taguchi ile belirlenen 9 parametre kombinasyonunda NSGA-2 yönteminin 5'er tekrarlı uygulamalarından elde edilen ortalama $Minf(x)$ değerlerinden daha küçük sonuçlara ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.13, Tablo 5.14, Tablo 5.15, Tablo 5.16 ve Tablo 5.17 incelendiğinde Taguchi tarafından belirlenen en iyi parametrelerin kullanılması ile elde edilen sonuçların, Taguchi tarafından belirlenen 9 parametre kombinasyonu sonuçlarından daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan problemin, maksimum tamamlanma zamanı ve toplam enerji tüketiminin minimum olmasının hedeflendiği bir minimizasyon problemi olması ve küçük değerin daha iyi bir sonucu temsil etmesi sebebiyle Taguchi ile belirlenen en iyi parametrelerin daha başarılı sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu durum Taguchi yönteminin parametre optimizasyonunda bu problem türü üzerinde etkin bir performans sağladığını göstermektedir.

5.7. Çok tekrarlı uygulama sonuçlarının analizi ve değerlendirilmesi

WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri, 35 tekrar ile 10, 20, 30, 40, 50 iş ve 10, 15, 20 makine sayıları ile oluşturulan 15 farklı çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme problemi üzerinde uygulanmıştır. Yöntemler öncelikle elde edilen minimum TEC ve minimum C_{maks} değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ardından ortalama RPI değerleri hesaplanmış ve yöntemler bu değerler çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin karşılaştırılmasında bir diğer ölçüt olarak amaç fonksiyonlarının normalizasyon ile bir araya getirilmesine dayanan ortalama $Minf(x)$ hesaplamasından yararlanılmıştır. Ortalama $Minf(x)$ değerleri açısından yöntemler karşılaştırılırken istatistiksel test uygulanmıştır. Son olarak yöntemler yapılan tüm kıyasların neticesinde başarılı sonuç sayıları çerçevesinde karşılaştırılmıştır.

5.7.1. Minimum amaç fonksiyonu değerleri ile yöntemlerin karşılaştırılması

Test problemlerinin her biri üzerinde 35 tekrar ile yapılan uygulamaların sonucunda WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemlerinin toplam enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanı hedefleri için hesapladıkları ve Tablo 5.18'de gösterilen en iyi sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.18. 35 deneme minimum TEC ve C_{maks} sonuçları.

İs x ms	WSBNSGA-2		NSGA-2		Minimum Sonucu Hesaplayan Yöntem	
	TEC	C_{maks}	TEC	C_{maks}	TEC	C_{maks}
10x10	66929	1070	68497	1065	WSBNSGA-2	NSGA-2
10x15	110446	1729	110854	1757	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
10x20	166004	2167	168112	2212	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
20x10	130387	1929	134202	2035	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
20x15	206326	3065	212187	3047	WSBNSGA-2	NSGA-2
20x20	301069	3610	309677	3683	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x10	192769	2708	196980	2886	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x15	306688	4445	310739	4644	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x20	444093	5323	445497	5379	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
40x10	259862	3727	262214	3783	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
40x15	407229	5993	410946	5768	WSBNSGA-2	NSGA-2
40x20	584956	7111	589471	7122	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
50x10	324000	4605	322063	4626	NSGA-2	WSBNSGA-2

Tablo 5.18. (Devamı) 35 deneme minimum TEC ve C_{maks} sonuçları.

is x ms	WSBNSGA-2		NSGA-2		Minimum Sonucu Hesaplayan Yöntem	
	TEC	C_{maks}	TEC	C_{maks}	TEC	C_{maks}
50x15	502752	7213	505870	7429	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
50x20	719335	8377	723775	8863	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2

Tablo 5.18 incelendiğinde, 15 farklı test problemi üzerinde yapılan denemelerin sonucunda; 10x15, 10x20, 20x10, 20x20, 30x10, 30x15, 30x20, 40x10, 40x20, 50x15 ve 50x20 problemlerinde hem TEC hem de C_{maks} açısından WSBNSGA-2 yönteminin NSGA-2 yönteminden daha iyi sonuçları hesapladığı görülmektedir. 10x10, 20x15 ve 40x15 problemlerinde TEC açısından WSBNSGA-2 daha küçük değerlere ulaşırken, C_{maks} açısından NSGA-2 daha küçük değerlere ulaşmıştır. 50x10 probleminde ise TEC açısından NSGA-2, C_{maks} açısından WSBNSGA-2 yönteminin daha küçük değerlere ulaştığı görülmektedir.

5.7.2. Yöntemlerin ortalama RPI değerleri ile karşılaştırılması

Yöntemlerin başarısının değerlendirilmesinde bir ölçüt olarak RPI hesaplamasından yararlanılmış ve yöntemler bu değerler çerçevesinde karşılaştırılmıştır. RPI hesaplamasında test problemlerinin her birinde yapılan 35 denemenin, iki yöntem için de sonuçları arasındaki en iyi TEC ve C_{maks} değerleri tespit edilmiştir. Ardından deneme sonuçlarının tamamı için tespit edilen en iyi değerler kullanılarak denklem 4.11 uygulanmış ve RPI değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan RPI değerlerinin tekrar sayısına bölünmesi ile ortalama RPI sonuçları elde edilmiştir. Yöntemlerin ortalama RPI sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.19’da gösterilmiştir.

Tablo 5.19. Ortalama RPI değerleri ile yöntemlerin karşılaştırılması.

is x ms	TEC		C _{maks}		Başarılı Sonucu Hesaplayan Yöntem	
	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	TEC	C _{maks}
10x10	3,90021	5,190575	5,215292	7,560027	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
10x15	3,311845	3,874654	8,348343	11,80699	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
10x20	3,74509	6,365389	8,028215	13,23225	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
20x10	3,509903	5,399991	6,936236	10,5458	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
20x15	3,565495	5,761437	9,218435	9,064654	WSBNSGA-2	NSGA-2
20x20	4,073172	6,069145	10,17254	11,44361	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x10	3,738612	5,098389	9,876556	12,35071	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x15	2,946587	4,31451	9,844127	10,12309	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
30x20	2,653016	3,932471	8,026086	8,652478	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
40x10	2,001348	2,764753	4,284564	5,550232	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
40x15	2,526483	2,654603	10,44036	10,69051	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
40x20	2,779481	3,253036	6,978725	5,33419	WSBNSGA-2	NSGA-2
50x10	2,53025	3,215884	4,669459	6,007135	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2
50x15	3,061509	3,84469	9,367214	9,985146	WSBNSGA-2	WSBNSGA-2

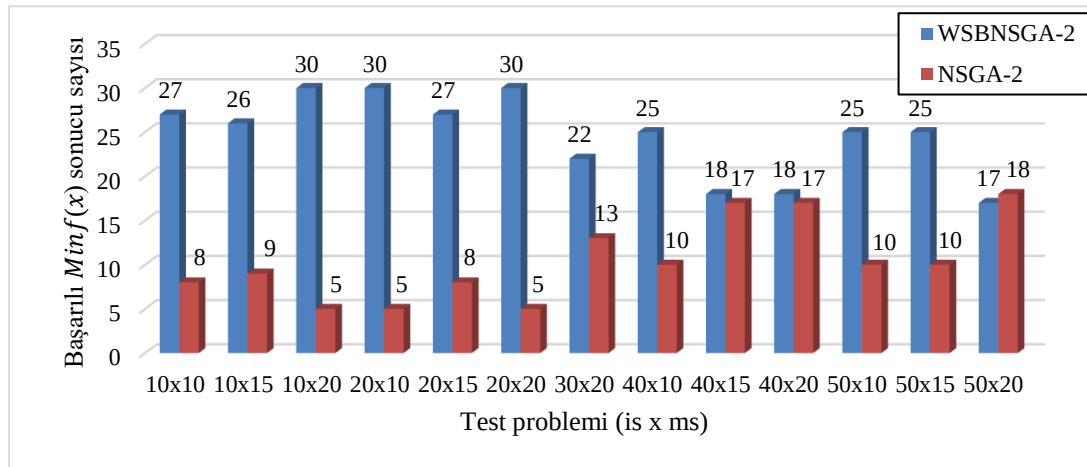
Tablo 5.19. (Devamı) Ortalama RPI değerleri ile yöntemlerin karşılaştırılması.

is x ms	TEC		C_{maks}		Başarılı Sonucu Hesaplayan Yöntem	
	WSBNSGA-2	NSGA-2	WSBNSGA-2	NSGA-2	TEC	C_{maks}
50x20	3,509265	4,269531	12,71782	12,41358	WSBNSGA-2	NSGA-2

Tablo 5.19 incelendiğinde TEC açısından 15 problemin tamamında, WSBNSGA-2 yönteminin hesaplanan ortalama RPI değerlerinin daha küçük olduğu ve daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Yöntemlerin C_{maks} açısından ortalama RPI değerlerine bakıldığında 15 problemin 12 tanesinde WSBNSGA-2 yönteminin, 3 tanesinde NSGA-2 yönteminin daha küçük değerlere ulaştığı ve bu nedenle önerilen yöntemin büyük ölçüde daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

5.7.3. Normalizasyon yapılan sonuçların karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Yöntemlerin 35 tekrar ile yapılan uygulama sonuçlarında elde edilen f_1 ve f_2 amaç fonksiyonu değerlerinin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla normalizasyon işlemi yapılmıştır. Ardından denklem 4.13'te yer alan çok amaçlı fonksiyon ile eşit önem düzeyinde bir araya getirilmiştir. Test problemlerinde her bir yöntem için 35 adet elde edilen $Minf(x)$ değerleri kıyaslanmıştır. Yöntemlerin $Minf(x)$ değerleri açısından diğer yönteme kıyasla elde ettiği başarılı sonuç sayısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

**Şekil 5.3.** Yöntemlerin başarılı $Minf(x)$ değerleri ile karşılaştırılması.

Şekil 5.3'te yer alan $Minf(x)$ değerleri incelendiğinde, 50x20 problemi dışındaki tüm problemlerde WSBNSGA-2 yönteminin daha fazla sayıda başarılı sonuç elde ettiği görülmektedir. 30x10 ve 30x15 problemlerinde iki yöntem için Taguchi ile belirlenen başlangıç popülasyonları farklı olduğundan bu problemlerde yöntemler aynı başlangıç popülasyonu ile uygulanamamıştır. Diğer tüm problemlerde her tekrar için yöntemler $Minf(x)$ değerleri açısından karşılaştırılabilirken, bu problemlerde her tekrar sonucu için bire bir karşılaştırma yapılamamıştır.

Tüm test problemlerinde elde edilen $Minf(x)$ sonuçlarının tekrar sayısına bölünmesi ile ortalama $Minf(x)$ değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 5.19'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ortalama $Minf(x)$ bakımından 40x20 problemi dışındaki tüm problemlerde önerilen WSBNSGA-2 yönteminin NSGA-2 yönteminden minimizasyon açısından daha iyi sonuçlara ulaştığı görülmektedir.

WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemlerinin sonuçlarını her iki problem hedefi ile etkin bir şekilde karşılaştırmak amacıyla $Minf(x)$ değerlerinden yararlanılarak istatistiksel test uygulanmıştır. Uygulanan test ile önerilen yöntemin ortalama $Minf(x)$ değerleri açısından 15 problemin 14 tanesinde daha iyi sonuç vermesinin tesadüfi olup olmadığının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılacak testin türünü belirlemek için öncelikle Minitab programında aşağıdaki H_0 ve H_1 hipotezleri kurularak Anderson-Darling yöntemi ile sonuç verilerinin normal dağılıma uygunluğu test edilmiştir.

H_0 : Veriler normal dağılıma uygundur.

H_1 : Veriler normal dağılıma uygun değildir.

Normalite testi sonuçları Tablo 5.19'da yer almakta olup, tüm sonuçlarda $p > 0,05$ olduğu için H_1 hipotezi reddedilerek H_0 hipotezi kabul edilmiş ve verilerin normal dağılıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Örneklem büyüklüğünün 30'un üzerinde olduğu durumda Merkezi Limit Teoremi'ne göre parametrik olan istatistiksel testler uygulanabilmektedir [120]. Bu çalışmada tüm test problemlerinde NSGA-2 ve WSBNSGA-2 yöntemleri 35'er defa çalıştırıldığından normalite testi uygulanmadan parametrik test uygulanabilmekte olup, verilerin normal dağılıma uygunluğunun gösterilmesi amacıyla normalite testi uygulanmıştır. 30x10 ve 30x15 problemleri dışındaki tüm test problemlerinde aynı başlangıç popülasyonları üzerinde yöntemler uygulandığından bağımlı örneklemelerde kullanılan parametrik bir test olan Eşleştirilmiş Örneklem t testi kullanılmıştır. 30x10 ve 30x15 problemlerinde

yöntemlerin popülasyon büyüklüklerinin farklı olması ve farklı başlangıç popülasyonları ile uygulamaların yapılması sebebiyle bağımsız örneklemelerde kullanılan, parametrik bir test olan 2 Örnek t testi kullanılmıştır. Tesler aşağıdaki hipotezler kurularak %95 güven düzeyinde uygulanmıştır.

H0: Sonuçların ortalamaları arasında anlamlı bir fark yoktur.

H1: Sonuçların ortalamaları arasında anlamlı bir fark vardır.

Tüm test problemlerinde yapılan uygulamalar ile elde edilen Eşleştirilmiş Örneklem t testi ve 2 Örnek t Testi sonucunda hesaplanan p değerleri ve sonuçlara ait açıklamalar Tablo 5.20’de gösterilmiştir.

Tablo 5.20. 35 deneme istatistiksel test sonuçları.

is x ms	WSBNSGA-2	NSGA-2	Normalite Testi (p)	Eşleştirilmiş Örneklem t Testi (p)	2 Örnek t Testi (p)	Açıklamalar
10x10	0,3961	0,5488	0,255	0,001	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
10x15	0,3463	0,4410	0,228	0,002	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
10x20	0,3181	0,5319	0,868	0,00 (p<0,001)	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
20x10	0,4249	0,6496	0,390	0,00 (p<0,001)	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.

Tablo 5.20. (Devamı) 35 deneme istatistiksel test sonuçları.

is x ms	WSBNSGA-2	NSGA-2	Normalite Testi (p)	Eşleştirilmiş Örneklem t Testi (p)	2 Örnek t Testi (p)	Açıklamalar
20x15	0,3885	0,5041	0,686	0,001	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
20x20	0,4363	0,5624	0,970	0,00 (p<0,001)	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
30x10	0,5165	0,6750	0,526	-	0,00 (p<0,001)	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
30x15	0,4853	0,5857	0,627	-	0,018	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
30x20	0,4059	0,5109	0,916	0,008	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.

Tablo 5.20. (Devamı) 35 deneme istatistiksel test sonuçları.

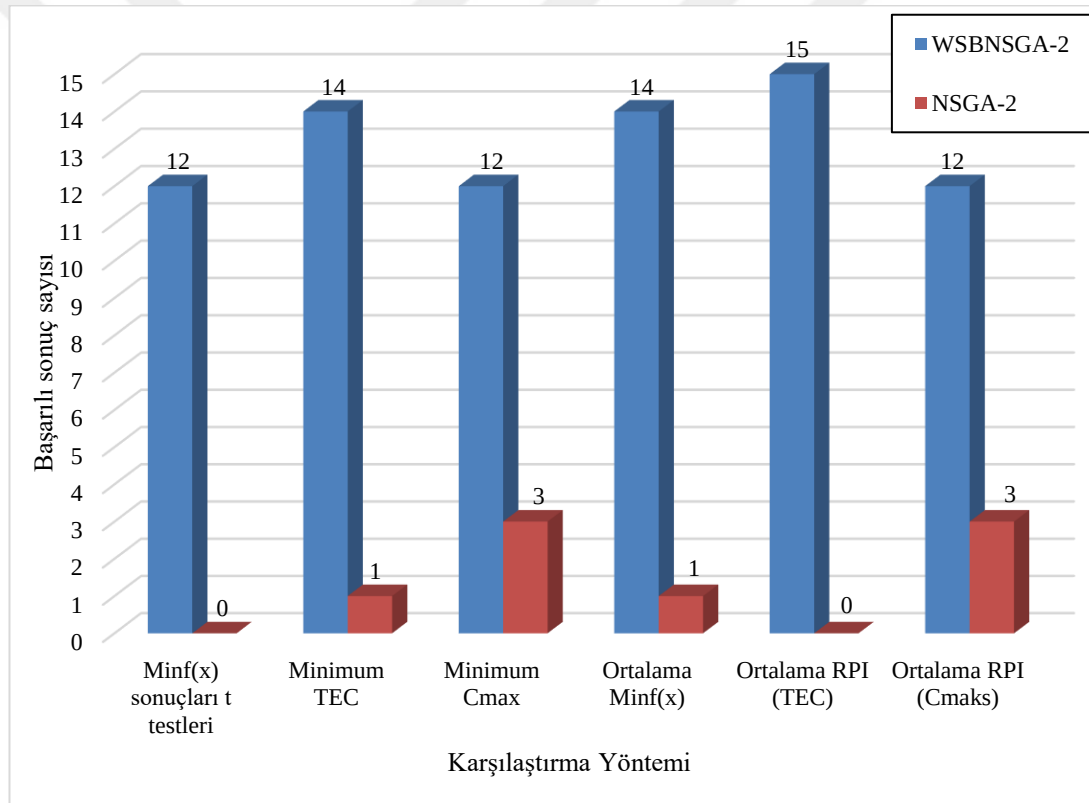
is x ms	WSBNSGA-2	NSGA-2	Normalite Testi (p)	Eşleştirilmiş Örneklem t Testi (p)	2 Örnek t Testi (p)	Açıklamalar
40x10	0,4169	0,5563	0,203	0,005	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
40x15	0,3786	0,3931	0,419	0,440	-	Yöntemlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark yoktur.
40x20	0,4322	0,4282	0,563	0,935	-	Yöntemlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark yoktur.
50x10	0,3933	0,5026	0,348	0,028	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
50x15	0,4481	0,5224	0,170	0,027	-	Önerilen yöntemin ortalaması istatistiksel anlam ile daha iyidir.
50x20	0,4991	0,5419	0,461	0,283	-	Yöntemlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.20'deki Eşleştirilmiş Örneklem t testi ve 2 Örnek t Testi sonuçları incelendiğinde 40x15, 40x20 ve 50x20 problem büyüklükleri dışındaki tüm

problemlerde istatistiksel olarak anlamlı bir fark ile önerilen WSBNSGA-2 yöntemin NSGA-2 yöntemine üstünlüğü görülmektedir. Diğer problem büyüklüklerinde ise iki yöntemin sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilememiş ve yöntemlerin birbirlerine üstünlük sağlayamadığı görülmüştür.

5.7.4. Yöntemlerin başarılı sonuç sayıları ile karşılaştırılması

WSBNSGA-2 ve NSGA-2 yöntemleri t testleri, hesaplanan minimum *TEC*, minimum *C_{maks}*, ortalama *Minf(x)* ve ortalama RPI değerlerinden yararlanılarak kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalarda 15 test probleminde yöntemlerin başarılı sonuç sayıları Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde, yapılan tüm kıyaslamalarda WSBNSGA-2 yönteminin NSGA-2 yöntemine üstünlük sağladığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Başarılı sonuç sayılarının karşılaştırılması



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toplam enerji tüketimi ve maksimum tamamlanma zamanının minimum düzeyde olmasının istendiği çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme probleminin çözümünde, NSGA-2 ve WASPAS metotlarının entegre edilmesi ile geliştirilen WSBNSGA-2 yöntemi tanıtılmış ve yöntemin performansı test edilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde sanayileşmenin çevreye etkileri ve sürdürülebilirlik kavramı incelenmiştir. Bölüm 2’de çizelgeleme kavramı, çizelgeleme problemlerinin türleri ve yeşil çizelgeleme konuları incelenmiştir. Bölüm 3’te literatürde yeşil çizelgeleme problemlerinde yapay zeka tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Sonraki bölümde çalışmada yararlanılan NSGA-2 yönteminin temelini oluşturan Genetik Algoritma anlatılmış, yöntemin kullandığı parametreler incelenmiştir. Ardından çalışmada kullanılan NSGA-2, WASPAS, Taguchi Deney Tasarımı, performans değerlendirme metotları açıklanmış ve WSBNSGA-2 yöntemi tanıtılarak uygulama adımları detaylandırılmıştır.

Çalışmanın uygulama bölümünde; problemin özellikleri, kullanılan yöntemlerin bilgisayar programında kodlanması, Taguchi metodu ile parametrelerin belirlenmesi, Taguchi ile belirlenen parametrelerin katkılarının ANOVA testi ile analizinin yapılması, 15 farklı test problemi üzerinde 35 tekrarlı uygulamaların yapılması anlatılmıştır. Ardından Taguchi’nin test problemleri üzerinde yöntemlerin başarılı olduğu parametreleri belirlemedeki etkinliği değerlendirilmiştir. Çok tekrarlı uygulamalar ile elde edilen sonuçlar, her 35 tekrarın en iyi TEC ve C_{maks} değeri açısından kıyaslandığında 15 test probleminin 14 tanesinde toplam enerji tüketiminde, 12 tanesinde maksimum tamamlanma zamanında WSBNSGA-2 yönteminin NSGA-2 yöntemine kıyasla daha iyi değerlere ulaştığı görülmüştür. Yöntemler, TEC ve C_{maks} değerleri ile hesaplanan ortalama RPI sonuçları ile karşılaştırılmıştır. TEC açısından 15 test probleminin tamamında, C_{maks} açısından 15 problemin 12 tanesinde önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Hesaplanan ortalama $Minf(x)$ değerleri açısından yöntemler karşılaştırıldığında, 15 problemin 14’ünde WSBNSGA-2 yönteminin daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Önerilen metodun ortalamalardaki başarısının parametrik test ile istatistiksel olarak analizi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; 15 test problemi üzerinde 35 tekrar ile yapılan uygulamaların sonucunda 12 problemde WSBNSGA-2 yönteminin istatistiksel açıdan anlamlı kabul edilen farklarla NSGA-2 yöntemine üstünlük sağladığı görülmüştür. Diğer 3 problemde yöntemlerin sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı tespit edildiğinden bu 3 problem için yöntemler birbirlerine üstünlük sağlayamamıştır.

Yapılan uygulamalar neticesinde önerilen WSBNSGA-2 yönteminin çok amaçlı enerji verimli atölye çizelgeleme problemi üzerinde başarılı bir performansa sahip olduğu ve uygulanabilirliği gösterilmiştir. İleride yapılabilecek çalışmalarda farklı algoritmalar ile farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin entegre edilmesi ile yeni yöntemler geliştirilebilir. Ayrıca WSBNSGA-2 yönteminin farklı türdeki çizelgeleme problemlerinde uygulamaları yapılarak performansı değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mouzon, G., Yıldırım, M. B., & Twomey, J. (2007). Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of production research*, 45(18-19), 4247-4271.
- [2] Veleva, V., & Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of cleaner production*, 9(6), 519-549.
- [3] Mohammad, H. M., & Ibrahim, R. H. (2017). Optimization of sustainable cutting conditions in turning carbon steel by CNC turning machine. *Journal of Material Science & Engineering*, 6(2), 1-9. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000319>
- [4] Assia, S., El Abbassi, I., El Barkany, A., Darcherif, M., & El Biyaali, A. (2020). Green scheduling of jobs and flexible periods of maintenance in a two-machine flowshop to minimize makespan, a measure of service level and total energy consumption. *Advances in Operations Research*, 2020(1), 1-9.
- [5] Peng, C., Peng, T., Zhang, Y., Tang, R., & Hu, L. (2018). Minimising non-processing energy consumption and tardiness fines in a mixed-flow shop. *Energies*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/en1123382>
- [6] Koç, M. H., Sel, Ç., & Keskinçılıç, F. (2021). Sürdürülebilir Üretim Çizelgeleme Problemlerinde İnsan Faktörü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(3), 130-136.
- [7] Hidri, L., Alqahtani, A., Gazdar, A., & Ben Youssef, B. (2021). Green Scheduling of Identical Parallel Machines with Release Date, Delivery Time and No-Idle Machine Constraints. *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169277>
- [8] Awasthi, A. (2016). Optimization of NP-hard Scheduling Problems by Developing Timing Algorithms and Parallelization [Doktora tezi] Oldenburg Üniversitesi
- [9] Özgüven, C., Özbakır, L., & Yavuz, Y. (2010). Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. *Applied Mathematical Modelling*, 34(6), 1539-1548.
- [10] Kamışlı Öztürk, Z., & Sağır Özdemir, M. (2005). Çok ölçütlü çizelgeleme problemleri: geline nokta ve potansiyel araştırma alanları. 5. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 237-242.
- [11] Wu, X., & Sun, Y. (2018). A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures. *Journal of cleaner production*, 172, 3249-3264.
- [12] Eren, T. & Güner, E. (2002). Tek ve Paralel Makinalı Problemlerde Çok Ölçütlü Çizelgeleme Problemleri İçin Bir Literatür Taraması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4), 37-69.

- [13] Chen, C. L., & Bulfin, R. L. (1993). Complexity of single machine, multi-criteria scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 70(1), 115-125.
- [14] Blum, C., & Sampels, M. (2004). An ant colony optimization algorithm for shop scheduling problems. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 3(3), 285-308.
- [15] Johnson, S. M. (1954). Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. *Naval research logistics quarterly*, 1(1), 61-68.
- [16] Gupta, J. N., & Stafford Jr, E. F. (2006). Flowshop scheduling research after five decades. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 699-711.
- [17] Gupta, J. N. D. (1979). A review of flowshop scheduling research. *Disaggregation* (ss. 363-388) içinde. Springer
- [18] Brucker, P., Jurisch, B., & Sievers, B. (1994). A branch and bound algorithm for the job-shop scheduling problem. *Discrete Applied Mathematics*, 49(1-3), 107-127.
- [19] Watson, J.-P., Beck, J. C., Howe, A. E., & Whitley, L. D. (2003). Problem difficulty for tabu search in job-shop scheduling. *Artificial Intelligence*, 143(2), 189-217.
- [20] Gonçalves, J. F., de Magalhães Mendes, J. J., & Resende, M. G. (2005). A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem. *European journal of operational research*, 167(1), 77-95.
- [21] Kaya, S., & Fırlalı, N. (2013). Multi Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 31(4), 605-623.
- [22] Dornfeld, D. A. (2014). Moving towards green and sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(1), 63-66.
- [23] Deif, A. M. (2011). A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1553-1559.
- [24] Dornfeld, D. A. (Ed.), Yuan, C., Diaz, N., Zhang, T., & Vijayaraghavan, A. (2013). *Green manufacturing: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media (ss. 1-24) içinde. Springer
- [25] United Nations Climate Change (2020, 29 Nisan). What is the Kyoto Protocol? https://unfccc.int/kyoto_protocol adresinden
- [26] IEA (2020, 13 Mayıs). Energy Statistics Data Browser. [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20\(TFC\)%20by%20sector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20(TFC)%20by%20sector)
- [27] Cota, L. P., Coelho, V. N., Guimarães, F. G., & Souza, M. J. (2018). Bi-criteria formulation for green scheduling with unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *International Transactions in Operational Research*, 28(3), 1-23.

- [28] Govindan, K., Diabat, A., & Shankar, K. M. (2015). Analyzing the drivers of green manufacturing with fuzzy approach. *Journal of Cleaner Production*, 96, 182-193.
- [29] Yu, J. J. (2010). Green scheduling and its solution. *Advanced Materials Research*, 139, 1415-1418.
- [30] Mouzon, G., & Yildirim, M. B. (2008). A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(2), 105-116.
- [31] Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2011). A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(4), 234-240.
- [32] Yildirim, M. B., & Mouzon, G. (2011). Single-machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm. *IEEE transactions on engineering management*, 59(4), 585-597.
- [33] May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Prabhu, V. (2015). Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7071-7089.
- [34] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., & Petrovic, S. (2016). A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance. *International Journal of Production Economics*, 179, 259-272.
- [35] Li, K., Zhang, X., Leung, J. Y. T., & Yang, S. L. (2016). Parallel machine scheduling problems in green manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 98-106.
- [36] Zheng, X. L., & Wang, L. (2016). A collaborative multiobjective fruit fly optimization algorithm for the resource constrained unrelated parallel machine green scheduling problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(5), 790-800.
- [37] Mansouri, S. A., Aktas, E., & Besikci, U. (2016). Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 772-788.
- [38] Gong, G., Deng, Q., Gong, X., Liu, W., & Ren, Q. (2018). A new double flexible job-shop scheduling problem integrating processing time, green production, and human factor indicators. *Journal of cleaner production*, 174, 560-576.
- [39] Meng, L., Zhang, C., Shao, X., Ren, Y., & Ren, C. (2018). Mathematical modelling and optimisation of energy-conscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines. *International Journal of Production Research*, 57(4), 1119-1145.
- [40] Jiang, T., Zhang, C., Zhu, H., & Deng, G. (2018). Energy-efficient scheduling for a job shop using grey wolf optimization algorithm with double-searching mode. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(3), 1-12.
- [41] Jiang, T., Zhang, C., Zhu, H., Gu, J., & Deng, G. (2018). Energy-efficient scheduling for a job shop using an improved whale optimization algorithm. *Mathematics*, 6(11), 220.

- [42] Lei, D., Li, M., & Wang, L. (2018). A two-phase meta-heuristic for multiobjective flexible job shop scheduling problem with total energy consumption threshold. *IEEE transactions on cybernetics*, 49(3), 1097-1109.
- [43] Wang, C., Ji, Z., & Wang, Y. (2018). Many-objective flexible job shop scheduling using NSGA-III combined with multi-attribute decision making. *Modern Physics Letters B*, 32(34n36), 1-8(1840110).
- [44] Foumani, M., & Smith-Miles, K. (2019). The impact of various carbon reduction policies on green flowshop scheduling. *Applied Energy*, 249, 300-315.
- [45] Zandi, A., Ramezani, R., & Monplaisir, L. (2019). Green parallel machines scheduling problem: A bi-objective model and a heuristic algorithm to obtain Pareto frontier. *Journal of the Operational Research Society*, 1-12.
- [46] Jiang, T., Zhang, C., & Sun, Q. M. (2019). Green job shop scheduling problem with discrete whale optimization algorithm. *IEEE Access*, 7, 43153-43166.
- [47] Gong, G., Chiong, R., Deng, Q., Han, W., Zhang, L., Lin, W., & Li, K. (2019). Energy-efficient flexible flow shop scheduling with worker flexibility. *Expert Systems with Applications*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112902>
- [48] Dai, M., Tang, D., Giret, A., & Salido, M. A. (2019). Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 143-157.
- [49] Gong, X., De Pessemer, T., Martens, L., & Joseph, W. (2019). Energy-and labor-aware flexible job shop scheduling under dynamic electricity pricing: A many-objective optimization investigation. *Journal of cleaner production*, 209, 1078-1094.
- [50] Lu, Y., Lu, J., & Jiang, T. (2019). Energy-Conscious Scheduling Problem in a Flexible Job Shop Using a Discrete Water Wave Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 7, 101561-101574.
- [51] Luan, F., Cai, Z., Wu, S., Liu, S. Q., & He, Y. (2019). Optimizing the Low-Carbon Flexible Job Shop Scheduling Problem with Discrete Whale Optimization Algorithm. *Mathematics*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/math7080688>
- [52] Mirahmadi, N., & Taghipour, S. (2019). Energy-efficient optimization of Flexible Job Shop Scheduling and Preventive Maintenance. *IEEE, Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1-7.
- [53] Tao, X. R., Li, J. Q., Huang, T. H., & Duan, P. (2021). Discrete imperialist competitive algorithm for the resource-constrained hybrid flowshop problem with energy consumption. *Complex & Intelligent Systems*, 7, 311-326.
- [54] Gu, W., Li, Z., Dai, M., & Yuan, M. (2021). An energy-efficient multi-objective permutation flow shop scheduling problem using an improved hybrid cuckoo search algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(6). <https://doi.org/10.1177/16878140211023603>
- [55] Lu, H., & Qiao, F. (2022). An efficient adaptive genetic algorithm for energy saving in the hybrid flow shop scheduling with batch production at last stage. *Expert Systems*, 39(2). <https://doi.org/10.1111/exsy.12678>

- [56] Qin, H. X., Han, Y. Y., Zhang, B., Meng, L. L., Liu, Y. P., Pan, Q. K., & Gong, D. W. (2022). An improved iterated greedy algorithm for the energy-efficient blocking hybrid flow shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100992>
- [57] Zhang, Z. Q., Hu, R., Qian, B., Jin, H. P., Wang, L., & Yang, J. B. (2022). A matrix cube-based estimation of distribution algorithm for the energy-efficient distributed assembly permutation flow-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116484>
- [58] Mou, J., Duan, P., Gao, L., Liu, X., & Li, J. (2022). An effective hybrid collaborative algorithm for energy-efficient distributed permutation flow-shop inverse scheduling. *Future Generation Computer Systems*, 128, 521-537.
- [59] Lu, C., Huang, Y., Meng, L., Gao, L., Zhang, B., & Zhou, J. (2022). A Pareto-based collaborative multi-objective optimization algorithm for energy-efficient scheduling of distributed permutation flow-shop with limited buffers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102277>
- [60] Wang, W., Zhou, X., Tian, G., Fathollahi-Fard, A. M., Wu, P., Zhang, C., & Li, Z. (2022). Multi-objective low-carbon hybrid flow shop scheduling via an improved teaching-learning-based optimization algorithm. *Scientia Iranica*. <https://doi.org/10.24200/sci.2022.58317.5665>
- [61] Saber, R. G., & Ranjbar, M. (2022). Minimizing the total tardiness and the total carbon emissions in the permutation flow shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105604>
- [62] Li, C., Zhang, B., Han, Y., Wang, Y., Li, J., & Gao, K. (2022). Energy-efficient hybrid flowshop scheduling with consistent sublots using an improved cooperative coevolutionary algorithm. *Mathematics*, 11(1), 77.
- [63] Li, Y., Gao, K., Meng, L., Jing, X., & Zhang, B. (2023). Heuristics and metaheuristics to minimize makespan for flowshop with peak power consumption constraints. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 14(2), 221-238.
- [64] Li, R., Gong, W., Wang, L., Lu, C., & Zhuang, X. (2023). Surprisingly popular-based adaptive memetic algorithm for energy-efficient distributed flexible job shop scheduling. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 53(12), 8013-8023.
- [65] Tian, Z., Jiang, X., Liu, W., & Li, Z. (2023). Dynamic energy-efficient scheduling of multi-variety and small batch flexible job-shop: A case study for the aerospace industry. *Computers & Industrial Engineering*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109111>
- [66] Luo, C., Gong, W., Li, R., & Lu, C. (2023). Problem-specific knowledge MOEA/D for energy-efficient scheduling of distributed permutation flow shop in heterogeneous factories. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106454>
- [67] He, Y., Liu, F., Cao, H. J., & Li, C. B. (2005). A bi-objective model for job-shop scheduling problem to minimize both energy consumption and makespan. *Journal of Central South University of Technology*, 12(2), 167-171.

- [68] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D. (2013). Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(5), 418-429.
- [69] Ding, J. Y., Song, S., & Wu, C. (2016). Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 758-771.
- [70] Zhang, H., Ge, H., Pan, R., & Wu, Y. (2018). Multi-objective bi-level programming for the energy-aware integration of flexible job shop scheduling and multi-row layout. *Algorithms*, 11(12), 210.
- [71] Zhang, B., Pan, Q. K., Gao, L., Li, X. Y., Meng, L. L., & Peng, K. K. (2019). A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition for hybrid flowshop green scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 325-344.
- [72] Luo, Y., Lu, C., Li, X., Wang, L., & Gao, L. (2019). Green Job Shop Scheduling Problem with Machine at Different Speeds using a multi-objective grey wolf optimization algorithm. *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 573-578. <https://doi.org/10.1109/COASE.2019.8843132>
- [73] Li, J. Q., Deng, J. W., Li, C. Y., Han, Y. Y., Tian, J., Zhang, B., & Wang, C. G. (2020). An improved Jaya algorithm for solving the flexible job shop scheduling problem with transportation and setup times. *Knowledge-Based Systems*, 200.
- [74] Fontes, D. B., Homayouni, S. M., & Fernandes, J. C. (2024). Energy-efficient job shop scheduling problem with transport resources considering speed adjustable resources. *International Journal of Production Research*, 62(3), 867-890.
- [75] Ebadifard, F., & Babamir, S. M. (2018). A multi-objective approach with waspas decision-making for workflow scheduling in cloud environment. *International Journal of Web Research*, 1(1), 1-10.
- [76] Tirkolaei, E. B., Torkayesh, A. E., Tavana, M., Goli, A., Simic, V., & Ding, W. (2023). An integrated decision support framework for resilient vaccine supply chain network design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126.
- [77] Qing-dao-er-ji, R., & Wang Y. (2012). A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 39(10), 2291-2299.
- [78] Pour, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Asadi, H. (2013). Optimizing a multiobjectives flow shop scheduling problem by a novel genetic algorithm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(3), 345-354.
- [79] Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. E. (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 82-87. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.350037>

- [80] Murata, T., & Ishibuchi, H. (1995). MOGA: Multi-objective genetic algorithms. In IEEE international conference on evolutionary computation, 1, 289-294. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1995.489161>
- [81] Abd Rahman, R., Ramli, R., Jamari, Z., & Ku-Mahamud, K. R. (2016). Evolutionary Algorithm with Roulette-Tournament Selection for Solving Aquaculture Diet Formulation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2016/3672758>
- [82] Razali, N. M., & Geraghty, J. (2011). Genetic algorithm performance with different selection strategies in solving TSP. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2(1), 1-6.
- [83] Younes, A., Elkamel, A., & Areibi, S. (2019). Genetic algorithms in chemical engineering: a tutorial.
- [84] Blickle, T., & Thiele, L. (1996). A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms. *Evolutionary Computation*, 4(4), 361-394.
- [85] Xie, H., Zhang, M., Andreae, P., & Johnston, M. (2008). Is the not-sampled issue in tournament selection critical? *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 3710-3717.
- [86] Mirjalili, S. (2019). Genetic Algorithm. *Evolutionary algorithms and neural networks* (ss. 43-55) içinde. Springer https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1_4
- [87] Gersil, M., & Palamutçuoğlu, T. (2013). Ders Çizelgeleme Probleminin Melez Genetik Algoritmalar İle Performans Analizi. *Niğde Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 242-262.
- [88] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [89] Oliver, I. M., Smith, D. J., & Holland, J. R. C. (1987). A study of permutation crossover operators on the TSP, genetic algorithms and their applications. *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, 224-230.
- [90] Larranaga, P., Kuijpers, C. M. H., Murga, R. H., Inza, I., & Dizdarevic, S. (1999). Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. *Artificial intelligence review*, 13, 129-170.
- [91] Lawrynowicz, A. (2011). Genetic algorithms for solving scheduling problems in manufacturing systems. *Foundations of Management*, 3(2), 7.
- [92] Davis, L. (1985). Applying adaptive algorithms to epistatic domains. *IJCAI*, 85, 162-164.
- [93] Falkenauer, E., & Bouffouix, S. (1991). A genetic algorithm for job shop. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 824-829. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131689>
- [94] Mousa, A. A., El-Shorbagy, M. A., & Farag, M. A. (2017). K-means-clustering based evolutionary algorithm for multi-objective resource allocation problems. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 11(6), 1681-1692.

- [95] Chen, S. H., & Chen, M. C. (2011). Operators of the two-part encoding genetic algorithm in solving the multiple traveling salesmen problem. *International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence*, 331-336. <https://doi.org/10.1109/TAAI.2011.64>
- [96] Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1996). Genetic algorithms for flowshop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), 1061-1071.
- [97] Wu, Y., Liu, J., & Peng, C. (2014). A New Replacement Strategy for Genetic Algorithm and Computational Experiments. In *Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 733-736. <https://doi.org/10.1109/IS3C.2014.195>.
- [98] Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- [99] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- [100] Durmaz, E. D., & Şahin, R. (2017). Çok amaçlı tek sıra tesis düzenleme probleminin çözümü için NSGA-II ve hedef programlama yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 941-955.
- [101] Dalbudak, E., & Rençber, Ö. F. (2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri üzerine literatür incelemesi. *Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 1-17.
- [102] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3, 77-87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- [103] Kim, B. S., Shah, B., He, T., & Kim, K. I. (2022). A survey on analytical models for dynamic resource management in wireless body area networks. *Ad Hoc Networks*, 135.
- [104] Arslan, H. M. (2018). Current classification of multi criteria decision analysis methods and public sector implementations. *Current Debates in Public Finance Public Administration and Environmental Studies*, 13(13), 241-261.
- [105] Majumder, M. (2015). Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations, *Springer Briefs in Water Science and Technology*, 35-47. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-73-3_2
- [106] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., & Zakarevicius, A. (2012). Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika ir elektrotechnika*, 122(6), 3-6.
- [107] Chakraborty, S., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2015). Applications of WASPAS method as a multi-criteria decision-making tool. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 49(1), 5-22.
- [108] Mardani, A., Nilashi, M., Zakuan, N., Loganathan, N., Soheilrad, S., Saman, M. Z. M., & Ibrahim, O. (2017). A systematic review and meta-Analysis of SWARA and WASPAS methods: Theory and applications with recent fuzzy developments. *Applied Soft Computing*, 57, 265-292.

- [109] Yazdani, M., Zavadskas, E. K., Ignatius, J., & Abad, M. D. (2016). Sensitivity analysis in MADM methods: application of material selection. *Engineering Economics*, 27(4), 382-391.
- [110] Savaşkan, M., Taptık, Y., & Ürgen, M. (2010). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Dergisi*, 3(6), 117-128.
- [111] Yalçındağ, Y. (2021). Gıda işletmelerinde Taguchi yöntemi ile süreç iyileştirme ve bir uygulama [Yüksek Lisans Tezi] Pamukkale Üniversitesi
- [112] Önal, Z (2020). Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgelemenin meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri ile çözümü ve kıyaslanması [Yüksek Lisans Tezi] Yıldız Teknik Üniversitesi
- [113] Elissaouy, O., & Allali, K. (2024). Minimizing the maximum tardiness for a permutation flow shop problem under the constraint of sequence independent setup time. *RAIRO-Operations Research*, 58(1), 373-395.
- [114] Sinsomboonthong, S. (2022). Performance Comparison of New Adjusted Min-Max with Decimal Scaling and Statistical Column Normalization Methods for Artificial Neural Network Classification. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2022(1).
- [115] Veeraiah T., Pratapa Reddy Y., V S Mohan Kumar P., W D S Milton P. (2017). Optimization of Flow Shop Scheduling by MATLAB. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*. 222-226.
- [116] Xu, J. Y., Lin, W. C., Chang, Y. W., Chung, Y. H., Chen, J. H., & Wu, C. C. (2023). A two-machine learning date flow-shop scheduling problem with heuristics and population-based GA to minimize the makespan. *Mathematics*, 11(19).
- [117] Maazinejad, B., Mohammadnia, O., Ali, G. A., Makhlof, A. S., Nadagouda, M. N., Sillanpää, M., Asiri, A. M., Agarwal, S., Gupta, V. K., & Sadegh, H. (2020). Taguchi L9 (34) orthogonal array study based on methylene blue removal by single-walled carbon nanotubes-amine: Adsorption optimization using the experimental design method, kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Journal of Molecular Liquids*, 298.
- [118] Candan, G. (2010). Esnek Üretim Çizelgeleme Probleminin Genetik Algoritma ve Bulanık Mantık Yöntemleri ile Çözülmesi [Doktora Tezi] Sakarya Üniversitesi
- [119] Akbulut, Ö. (2022). Bilimsel Araştırmalarda İstatistiksel Anlamlılığın Raporlanmasında Güncel Yaklaşımlar: Hatalar ve Doğrular. *International Journal of Eastern Mediterranean Agricultural Research*, 5(1), 1-19.
- [120] Kul, S. (2014). Uygun istatistiksel test seçim kılavuzu/guideline for suitable statistical test selection. *Plevra Bülteni*, 8(2), 26-29.



EKLER

EK A. F istatistik değerleri tablosu



EK A**Tablo A.1.** F istatistik değerleri tablosu kesiti.

$\alpha = 0,05$						
$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mine Büşra GELEN MERT

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ocak-Eylül 2021 tarihlerinde Planlama ve Lojistik Mühendisi olarak görev yaptı.
- Eylül 2021'den bu yana Planlama ve Kalite Sistem Sorumlusu olarak görev yapmaktadır.

ESERLER:

- Fındık, F., Demir, A. S., & Gelen Mert, M. B. (2023). Evaluation of the Suitability of Dental Filling Materials for Green Production by WASPAS Method. International Journal of Global Warming, 31(1), 82-94. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.10058470>
- Demir, A. S., & Gelen, M. B. (2022). Çok amaçlı genetik algoritma için yeni bir seçim stratejisi önerisi: MultiMoora Rank seçimi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37 (4), 2119-2132.
- Demir, A. S., Gelen, M. B. (2021). A New Approach to Solving Multi-Objective Flow-Shop Scheduling Problems: A MultiMoora-Based Genetic Algorithm. Journal of Engineering Research, 9(4A), 191-200.
- Yılmaz Yalçın, A., & Gelen Mert, M. B. (2021). Estimating the Occupancy Rate of an Accommodation Business Using Artificial Neural Networks. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (47), 209-218.
- Demir, A. S., Gelen, M. B., & Acır, Ş. (2021). Supplier Selection for a Business Operating on a Just-in-Time Production System Using an Integrated DEMATEL and MULTIMOORA Approach. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 9(1), 68-79.

- Gelen, M. B., & Demir, A. S. (2019). Selection Of Information Technology Personnel for An Enterprise in The Process of Industry 4.0 With the MultiMoora Method. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(4), 663-675.
- Demir, A. S., & Gelen, M. B. (2018). Moora Metodu ile Bir İşletmenin İş Başvurularının Değerlendirilmesi. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS), 2(2018), 33-33.
- Kökçam, A. H., Şen, B., Gelen, M. B., & Havuç, T. (2017). Deprem Sonrasında Temel İhtiyaçların Dağıtımında Kullanılacak Kapasite Kısıtlı Araçların Genetik Algoritmalar ile Planlanması. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), 1059-1068.

