



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇOK AMAÇLI ATÖLYE
TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN
ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Saddam Hocine BOUZEGAG

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Saddam Hocine Bouzegag tarafından hazırlanan “Sürdürülebilir Çok Amaçlı Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi için Çözüm Yaklaşımları” adlı tez çalışması 11/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN
(Gazi Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI
(Erciyes Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Alper DÖYEN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yakup ATASAGUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Saddam Hocine BOUZEGAG

Tarih: 11/11/2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇOK AMAÇLI ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Saddam Hocine BOUZEGAG

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

2025, 125 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI
Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN
Dr. Öğr. Üyesi Alper DÖYEN
Dr. Öğr. Üyesi Yakup ATASAGUN**

Son yıllarda sürdürülebilirlik, sanayi kalkınması alanında karşılaşılan en önemli küresel zorluklardan biri olarak öne çıkmaktadır. Başarı artık yalnızca maliyetlerin düşürülmesi ya da üretkenliğin artırılmasıyla ölçülmemekte, aynı zamanda kaynakların etkin kullanımı ve israfın en aza indirgenmesi de gerektirmektedir.

Modern imalat sektöründe kaynakların etkin yönetimi giderek artan bir öncelik hâline gelmiştir. Şirketlerin, operasyonel verimlilik ile çevresel sürdürülebilirlik arasında hassas bir denge kurmaları gerekmektedir. Enerjiye yönelik küresel baskıların artmasıyla birlikte, üretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin azaltılması her zamankinden daha kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu zorluklara karşılık olarak sürdürülebilir üretim çizelgelemesi, operasyonel verimlilik ile çevresel kaygılar arasında bütünleşik bir yaklaşım sağlamak üzere temel bir araç konumuna gelmiştir. Bu yaklaşım yalnızca ekonomik performansa odaklanmamakta, aynı zamanda sürdürülebilirliğin bütüncül gereklilikleriyle uyumlu üretim sistemlerinin inşasını da amaçlamaktadır.

Bu tez çalışması, çok amaçlı sürdürülebilir atölye tipi çizelgeleme (SÇA-ATÇ) problemini ele almaktadır. Söz konusu problemde her iş birden fazla operasyondan oluşmakta ve bu operasyonlar farklı hız seviyelerinde çalışabilen makineler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak, enerji odaklı iki strateji olan makinelerin açma/kapama kontrolü ile aktif işlem sırasında hız ölçeklemeyi aynı anda entegre etmektedir. Aynı makine üzerinde işlenen ardışık operasyonlar arasındaki boşta kalma süresi önceden belirlenmiş bir eşiği aştığında, enerji tüketimini azaltmak amacıyla makine kapatılmaktadır. Aksi hâlde, makine düşük enerji tüketimli bekleme modunda tutulmakta ve aşırı açma/kapama işlemlerinden kaçınılmaktadır. Bununla eşzamanlı olarak, hız ölçekleme stratejisi teslim tarihlerinin karşılanmasına yardımcı olmak için uygulanmaktadır; çünkü gecikmeler, müşteri memnuniyetsizliğine yol açmaktadır. Daha yüksek hız seviyelerinde çalışmak gecikme cezalarını azaltmakta, ancak enerji tüketimini artırmakta, düşük hızlarda ise durum tersine dönmektedir. Bu nedenle problem, toplam enerji tüketiminin ve toplam gecikmenin minimize edilmesi gibi birbiriyle çelişen iki amacı içermektedir.

Bu iki amaçlı problem için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli geliştirilmiş ve kesin Pareto-optimal çözümler elde etmek amacıyla Artırılmış Epsilon Kısıt (Augmecon) yöntemi

uygulanmıştır. Ancak, problem boyutu büyüdükçe Augmecon yöntemi makul sürede Pareto-optimal çözümler bulamamaktadır. Bu nedenle, özel olarak tasarlanmış iki meta-sezgisel algoritma önerilmiştir: Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma II (NSGA-II) ve Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu (MOGWO).

Toplamda 50 problem örneği üretilmiş ve operasyon sayılarına göre küçük, orta ve büyük boyutlarda sınıflandırılmıştır. Bunlardan 12 küçük boyutlu örnek bu çalışma için üretilmiş, 38 orta ve büyük boyutlu problem örneği ise literatürde sıkça kullanılan kıyaslama veri setlerinden uyarlanmıştır.

Önerilen algoritmaların göreceli performansları, literatürde yaygın olarak kullanılan çok amaçlı ölçütler olan Hiperhacim (HV), Kalite Ölçütü (QM), CPU süresi ve Domine Edilmeyen Çözümlerin sayısı (NDS) kullanılarak değerlendirilmiştir.

MOGWO algoritmasının, özellikle küçük ve bazı orta boyutlu problemlerde, çözüm kalitesi (HV ve QM) ile NDS bakımından NSGA-II'ye üstünlük sağladığı görülmüştür. Buna karşılık, Augmecon yöntemi problem boyutunun artmasıyla birlikte aşırı hesaplama yükü gerektirmiştir. 8 problem örnekleri için pareto çözümleri üretebilmiş olmasına karşın, 12 örneğin 4'ünde belirlenen süre sınırları içinde ödünleşim matrislerini doğru şekilde elde edememiştir.

Öte yandan, NSGA-II özellikle büyük boyutlu problemlerde yüksek hesaplama verimliliği sergilerken; çözüm kalitesi açısından performansı düşmüştür. İlginç bir şekilde, daha büyük problemlerde NSGA-II bazen MOGWO'yu HV ve QM açısından aşabilmiştir. Özet olarak, MOGWO, genellikle daha çeşitli ve yüksek kaliteli pareto yüzeyleri üretirken, NSGA-II özellikle büyük boyutlu problemlerde daha hızlı yakınsama ve daha düşük hesaplama süresi sunmuştur.

Buna ek olarak, teslim tarihi sıklığının algoritmik performans üzerindeki etkisi, sıkı, orta ve gevşek teslim tarihleri olmak üzere üç farklı ayar değerlendirilerek incelenmiştir. Sonuçlar, her iki algoritmada da teslim tarihleri gevşetildikçe (sıkıdan gevşeye) HV değerlerinin arttığını göstermektedir. Bu doğrultuda, orta aralıkta belirlenen teslim tarihleriyle elde edilen çözümler sıkı teslim tarihleriyle elde edilenlerden üstün bulunurken; gevşek teslim tarihlerinde elde edilen çözümler ise orta aralıktakileri geride bırakmıştır. Ayrıca, MOGWO algoritmasının daha gevşek teslim tarihleri altında daha fazla sayıda domine edilmeyen çözüm ürettiği gözlemlenirken, NSGA-II'nin ise daha dalgalı bir performans sergilediği ve sonuçlarının istikrarsızlık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açma/Kapama Stratejisi, Atölye Tipi Çizelgeleme, Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi, Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu, Çok Amaçlı Optimizasyon, Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma-II, Hız Ölçekleme Stratejisi, Karma Tamsayı Doğrusal Programlama, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

PhD THESIS

SOLUTION APPROACHES FOR MULTI-OBJECTIVE SUSTAINABLE JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM

Saddam Hocine BOUZEGAG

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Industrial Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

2025, 125 Pages

Jury

**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI
Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN
Asst. Prof. Dr. Alper DÖYEN
Asst. Prof. Dr. Yakup ATASAGUN**

In recent decades, sustainability has emerged as one of the foremost global challenges in industrial development. Success is no longer measured solely by cost reduction or productivity improvement; it now also requires the efficient use of resources and the minimization of waste.

Effective resource management has become an increasing priority in modern manufacturing, where companies must balance operational efficiency with environmental sustainability. With growing global energy pressures, optimizing production processes while reducing energy consumption has become an urgent challenge.

In response to these challenges, sustainable production scheduling has emerged as a key tool to integrate operational efficiency with environmental considerations. This approach not only focuses on economic performance but also aims to build production systems that align with the holistic requirements of sustainability.

This thesis addresses a multi-objective sustainable job shop scheduling problem, in which each job consists of multiple operations that can be executed on machines operating at variable speeds. Unlike traditional approaches, this study integrates two energy-saving strategies: machine on/off control and speed scaling. When the idle time between consecutive operations on the same machine exceeds a predetermined threshold, the machine is turned off to reduce energy consumption. Otherwise, it remains in standby mode, consuming significantly less energy and avoiding excessive on/off cycles. Speed scaling strategy, meanwhile, is employed as a versatile tool to help meet the jobs' due dates, any tardiness lead to customer dissatisfaction. Operating machines at higher speeds reduces tardiness penalties but increases energy consumption, and vice versa. Accordingly, the problem involves two conflicting objectives: minimizing total energy consumption and minimizing total tardiness.

To address this bi-objective problem, a mixed-integer linear programming (MILP) model was developed, and the augmented ϵ -constraint (Augmecon) method was applied to obtain exact Pareto-optimal solutions. However, as the problem size increases, the Augmecon method fails to find Pareto-optimal solutions within a reasonable time. Therefore, two specially designed metaheuristic algorithms are proposed: the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and the Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO).

A total of 50 problem instances were generated and categorized into small, medium, and large sizes based on the number of operations. Of these, 12 small instances were randomly generated for this study, while 38 medium and large instances were adapted from well-known benchmark datasets frequently used in the literature.

The performance of the proposed algorithms was evaluated using several widely adopted metrics in the literature, including Hypervolume (HV), Quality Metric (QM), CPU time, and the Number of Non-Dominated Solutions (NDS).

The MOGWO algorithm outperforms NSGA-II in terms of solution quality (HV and QM) and the number of non-dominated solutions, particularly for small and some medium-sized problems. In contrast, the Augmecon method requires excessive computational effort as the problem size increases. Although it was able to generate Pareto solutions for 8 problem instances, it fails to obtain payoff matrices within the specified time limits for 4 out of 12 instances.

NSGA-II, on the other hand, demonstrates high computational efficiency, particularly for large-sized problems; however, its performance in terms of solution quality declines. Interestingly, in larger problems, NSGA-II occasionally outperforms MOGWO in terms of HV and QM. In summary, MOGWO generally produces more diverse and higher-quality Pareto fronts, whereas NSGA-II offers faster convergence and lower computational time, especially in large-sized problem instances.

Furthermore, the impact of due-date tightness on algorithmic performance is examined by evaluating three settings: tight, medium, and loose due dates. The results indicate that hypervolume values increase for both algorithms as due dates are relaxed (from tight to loose). Accordingly, solutions obtained under medium due dates outperform those associated with tight due dates, while solutions corresponding to loose due dates surpass those obtained under medium settings. Moreover, the MOGWO generates a larger number of non-dominated solutions under more relaxed due dates, whereas NSGA-II exhibits more fluctuating performance and shows instability in its results.

Keywords: Augmented Epsilon Constraint Method, Job Shop Scheduling, Mixed Integer Linear Programming, Multi Objective Optimization, Multi Objective Grey Wolf Optimization, Non-Dominated Sorting Algorithm-II, On/Off Strategy, Scaling Speed Strategy, Sustainability.

ÖNSÖZ

İkinci vatanım Türkiye’de geçirdiğim yıllar boyunca karşılaştığım zorluklar ve meydan okumalarla dolu bu süreçte, azimli olmanın yolumu açtığını ve yalnızca denemeyi bıraktığımızda başarısızlığın gerçekleşeceğini hiçbir zaman unutmadım. Bu yolculuk sadece bir öğrenim süreci değil, aynı zamanda irade ve sabrın gerçek bir sınavı oldu.

Hayatını kaybeden babam Said BOUZEGAG’a en derin şükranlarımı sunarım. Bana verdiği son öğüt, yaşam boyu rehberim oldu: Yoluma devam etmek, ne kadar zahmetli veya uzak olursa olsun, bilime olan pusulamdan sapmamak. Bedeni aramızdan ayrılmış olsa da sesi, her şüphe ve zayıflık anında bana eşlik etti ve birlikte başladığımız işi yarıda bırakmamam gerektiğini hatırlattı. Onun hatırası, karanlığı aydınlatan bir ışık oldu ve beni nihai hedefime ulaştırdı.

Ayrıca, doktora danışmanım Sayın Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN’e sabrı, anlayışı ve doktora süresince bana aktardığı bilgi ve deneyimleri için en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi aynı zamanda yüksek lisans sürecimde de danışmanım olmuş, ilk günden itibaren sürekli manevi destek ve büyük bir özveri göstermiştir. Onun rehberliği ve desteği, bu tezin tamamlanmasında önemli bir rol oynamış olup, alanımda yetkin bir akademisyen olma yolunda bana ilham kaynağı olmuştur.

Tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI ve Dr. Öğr. Üyesi Alper DÖYEN’e, değerli önerileri ve yapıcı katkılarıyla çalışmamın kalitesini artırmalarına sağladıkları destek için teşekkür ederim.

Özel olarak, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yakup ATASAGUN’a, çalışma süresince, özellikle de son yılda, kıymetli zamanını ayırarak bana sağladığı değerli katkılar ve sürekli destek için sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, her türlü anlayışı gösteren ve rahat çalışma ortamı sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünün tüm öğretim elemanlarına, özellikle de lisansüstü eğitim sürecime başladığım günden son güne kadar desteğini, ilgisini ve samimiyetini esirgemeyen, önceki Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ahmet PEKER’e çok teşekkür ederim.

Sadık ağabeyim Faruk’a, bu zorlu süreçte hem sevinç hem hüznün anlarında yanımda olduğu için ve kıymetli dostluğu için çok teşekkür ederim. Dostlarım Azzouzi, Djamal AYADI ve DRİBAT’e de yalnızlık ve yurtdışındaki zorluklar sırasında bana gösterdikleri samimi destek ve öğütleri için minnettarlığımı sunarım.

Sevgili annem, kardeşlerim ve eşim başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım; sabırları, sürekli duaları ve her adımda yanımda olmaları, bu yolculuğun görünmez destekçisi oldu. Onların sevgisi, güveni ve sınırsız teşviki olmasa, bu başarı mümkün olamazdı.

Her şeyden önce, şükürümü Allah’a arz ederim.

Saddam Hocine BOUZEGAG
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÜRETİM ÇİZELGELEME.....	6
2.1. Üretimde Çizelgeleme Kavramı ve Tanımı	6
2.2. Çizelgelemenin Kurumsal Yapı İçindeki Yeri ve Önemi	7
2.3. Çizelgeleme Problemlerinin Karar Seviyeleri	8
2.4. Üretim Çizelgeleme Ortamları.....	9
2.5. Üretim Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	10
2.6. Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi	12
2.6.1. ATÇP'nin tanımı ve varsayımları.....	12
2.6.2. ATÇP'nin matematik ifadesi	14
2.6.3. ATÇP'nin zorluk düzeyi	16
2.6.4. ATÇP'nin çizelge türleri.....	17
3. SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM ÇİZELGELEME.....	18
3.1. Sürdürülebilirlik Kavramı ve Tanımı	18
3.2. Sürdürülebilir Üretim Kavramı ve Tanımı	20
3.3. Sürdürülebilir Üretim Göstergeleri.....	23
3.4. Sürdürülebilir Üretim Çizelgeleme.....	26
3.4.1. Ekonomik odaklı üretim çizelgeleme	26
3.4.1.1. Üretim maliyeti	26
3.4.1.2. Enerji maliyeti.....	27
3.4.1.3. İşçilik maliyeti	28
3.4.1.4. Stok maliyeti	28
3.4.2. Çevresel odaklı üretim çizelgeleme	29
3.4.3. Sosyal odaklı üretim çizelgeleme	29
4. ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON.....	31
4.1. Çok Amaçlı Optimizasyonun Kavramı ve Tanımı	31
4.2. Pareto Optimalliği Kavramı.....	34
4.3. Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinin Yöntemleri	35
4.3.1. Kesin yöntemler.....	35
4.3.1.1. Tercihsiz yöntemler	36
4.3.1.2. Priori yöntemler	37
4.3.1.3. Etkileşimli yöntemler.....	37

4.3.1.4. Posteriori yöntemler.....	38
4.3.2. Meta-sezgisel algoritmalar.....	39
5. KAYNAK ARAŞTIRMASI	42
5.1. Enerji Odaklı Üretim Çizelgeleme (EOÜÇ) Stratejileri	42
5.2. EOÜÇ Literatürünün Genel Değerlendirilmesi	46
6. SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇOK AMAÇLI ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME (SÇA-ATÇ) PROBLEMİ	49
6.1. SÇA-ATÇ Probleminin Tanımı	50
6.1.1. SÇA-ATÇ problemi için açıklayıcı sayısal bir örnek.....	50
6.1.2. SÇA-ATÇ probleminin formal tanımı.....	53
6.1.3. İncelenen SÇA-ATÇ probleminin avantajları ve ilişkili zorluklar.....	54
6.1.3.1. İncelenen SÇA-ATÇ probleminin avantajları	55
6.1.3.2. İncelenen SÇA-ATÇ problemi ile ilişkili zorluklar.....	55
6.1.4. SÇA-ATÇ problemi için önerilen KTDP modeli	56
6.2. SÇA-ATÇ Problemi için Önerilen Çözüm Yaklaşımları	60
6.2.1. Artırılmış epsilon kısıt yaklaşımı (Augmecon)	60
6.2.2. Augmecon yönteminin örnek test verisine uygulanması.....	63
6.2.3. Domine edilmeyen sıralama genetik algoritma-II (NSGA-II).....	65
6.2.3.1. Kromozom gösterimi	68
6.2.3.2. Başlangıç popülasyonu	69
6.2.3.3. Amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi.....	70
6.2.3.4. Ebeveyn seçimi	72
6.2.3.5. Çaprazlama prosedürü	74
6.2.3.6. Mutasyon prosedürü	77
6.2.3.7. Popülasyonun güncellenmesi.....	78
6.2.4. Çok amaçlı gri kurt optimizasyon algoritma (MOGWO).....	79
6.2.4.1. Sabit boyutlu dış arşiv.....	83
6.2.4.2. Lider kurtların (Alfa, beta, delta) seçilmesi.....	83
6.2.4.3. Kurtların pozisyonlarının güncellenmesi.....	84
7. DENEYSEL BULGULAR	87
7.1. SÇA-ATÇ Problemi için Test Problemlerinin Üretilmesi.....	87
7.2. SÇA-ATÇ Problemi için Değerlendirme Ölçütleri	90
7.3. SÇA-ATÇ Problemi için Karşılaştırmalı Sonuçların Analizi.....	93
7.3.1. Augmecon ile küçük boyutlu çözülebilir problemler	93
7.3.2. Daha büyük boyutlu problemler için meta-sezgisellerin karşılaştırmalı performansları	97
7.4. Teslim Tarihi Parametresinin SÇA-ATÇ Problemi Üzerindeki Etkileri	100
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
8.1. Sonuçlar	105
8.2. Öneriler.....	107
KAYNAKLAR	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

KİTB: Katrilyon İngiliz Termal Birimi

EOÜÇ: Enerji Odaklı Üretim Çizelgeleme

SÇA-ATÇ: Sürdürülebilir Çok Amaçlı Atölye Tipi Çizelgeleme

ATÇP: Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi

KTDP: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

AEKY: Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi

Augmecon: Augmented Epsilon-Constraint Method

HV: Hiperhacim

QM: Kalite Ölçütü

NDS: Domine Edilmeyen Çözüm Sayısı

TBL: Üçlü Sorumluluk Yaklaşımı (Triple Bottom Line)

GPX: Genelleştirilmiş Konum Çaprazlaması (Generalized Position Crossover)

Makespan: Maksimum Tamamlanma Süresi

TTS: Toplam Tamamlanma Süresi

TSV: Tamamlanma Süresi Varyansı

KV: Karar Verici

GA: Genetik Algoritma

NSGA-II: Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II)

GWO: Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization)

MOGWO: Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu (Multi Objective Grey Wolf Optimization)

SPEA2: Güç Pareto Evrimsel Algoritması 2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2)

MOEA/D: Ayırtırmaya Dayalı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition)

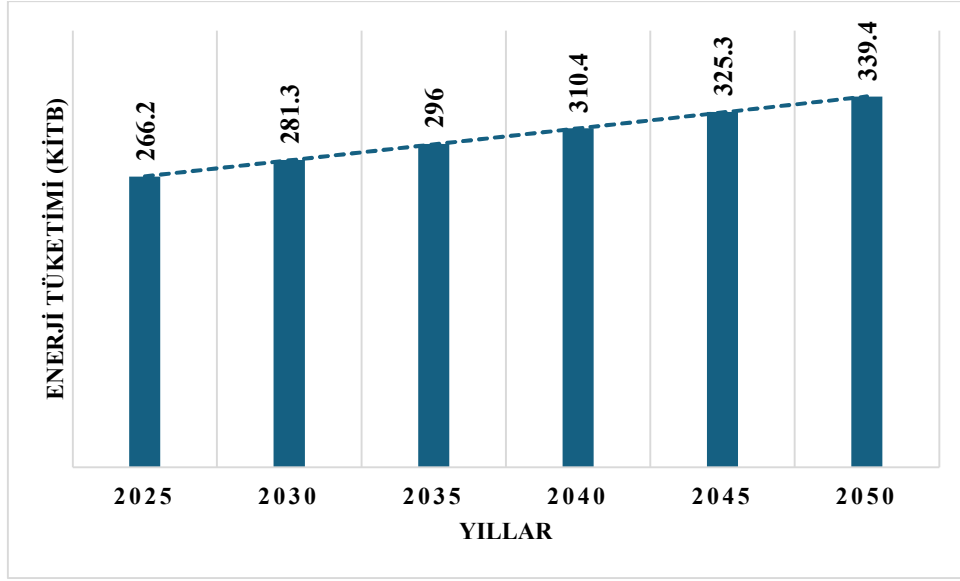
MOPSO: Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization)

PAES: Pareto Arşivli Evrimsel Strateji (Pareto Archived Evolution Strategy)

1. GİRİŞ

Günümüzde sürdürülebilirlik, şirketlerin performanslarının değerlendirilmesinde temel bir köşe taşı hâline gelmiştir. Yalnızca ekonomik göstergelere dayanmak artık yeterli görülmemekte, çevresel ve sosyal boyutlar da kurumsal performansın bütüncül değerlendirilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, ‘sürdürülebilir üretim’ kavramı, söz konusu köklü dönüşümün pratik bir yansıması olarak öne çıkmakta ve endüstriyel değer zincirinin tüm aşamalarında sürdürülebilirliğin üç temel boyutu olan çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğin bütünleşik bir yaklaşımla ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Sürdürülebilir üretim sistem yaklaşımı yalnızca maliyetleri düşürmeyi veya verimliliği artırmayı amaçlamakla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda kaynak tüketimini ve emisyonları azaltarak çevresel etkiyi en aza indirmeyi, çalışma koşullarını iyileştirerek ve adil iş koşullarını sağlayarak sosyal boyutu güçlendirmeyi, tüm paydaşların memnuniyetini güvence altına almayı amaçlamaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım şu temel ilkeye dayanmaktadır: hammadde ve enerji tüketiminden kaynaklı emisyonların azaltılması, atık veya istenmeyen ürün oluşumunun önlenmesi ve üretimin ekonomik uygulanabilirliğinin korunması. Enerji tüketimi ise çevresel ve ekonomik boyutları doğrudan etkileyen en kritik göstergelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Yoğun enerji bağımlılığı yalnızca kaynakların tükenmesine ve emisyonların artmasına yol açmamakta, aynı zamanda sanayi işletmelerinin rekabetçiliğini etkileyen önemli bir finansal yük de oluşturmaktadır.

Enerji, modern ekonomilerin sürdürülebilirliğinde ve sanayi büyümesinin desteklenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Ekonomik sektörler arasında sanayi sektörü, dünya genelinde en büyük enerji tüketicisi konumundadır. Nitekim 2024 yılında ABD sanayi sektörü yaklaşık 31,1 katrilyon İngiliz Termal Birimi (KİTB) enerji tüketmiştir ve önümüzdeki yıllarda bu tüketimin artmaya devam etmesi öngörülmektedir (Statista, 2025). Benzer şekilde, Batı Avrupa sanayi sektörü 2022 yılında 26,3 KİTB enerji tüketmiş olup, bu miktarın 2050 yılına kadar 29,3 KİTB’ye çıkması beklenmektedir (EIA, 2023). Buna karşılık, Çin’in sanayi sektörü 2023 yılında ülkenin toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %48’ini oluşturmuştur (IEA, 2025). Küresel ölçekte ise, Şekil 1.1’de gösterildiği üzere, sanayi sektörünün enerji tüketiminin 2025–2050 yılları arasında %30’dan fazla artması öngörülmektedir (EIA, 2023).



Şekil. 1.1. Küresel sanayi sektörü enerji tüketimi (2025–2050) (EIA, 2023).

Çizelgeleme temelde, belirli amaçları eniyilemek üzere görevlerin (ya da işlerin) kısıt kaynaklara atanmasını sağlayan bir karar verme sürecidir (Baker ve Trietsch, 2018). Bu bağlamda, Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi (ATÇP), kombinatoriyal optimizasyon ve yöneylem araştırması alanlarının klasik ve önemli araştırma konularından biri olup, onlarca yıldır çok sayıda araştırmacı ve uygulayıcının ilgisini çekmektedir (Zhang ve ark., 2019; Xiong ve ark., 2022).

ATÇP'nin özel bir formu olan akış tipi çizelgeleme problemi, makinelerin seri hatlar şeklinde kurulduğu kitle üretim sistemlerinde yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır (de Athayde Prata ve ark., 2025). Dolayısıyla ATÇP için geliştirilen çözüm yöntemleri, doğası gereği akış tipi çizelgeleme problemine de uygulanabilmektedir. ATÇP'de her işin kendine özgü bir makine ziyaret sırası vardır ve ardışık operasyonlar arasındaki öncelik ilişkisi katıdır. Operasyonlar makinelerde belirli bir amacı en aza indirecek biçimde işlenmektedir. Yakın zamana kadar, tamamlanma süresi (makespan), toplam bitiş zamanı gibi zamana dayalı amaçlar sıklıkla çalışılmıştır. Ancak sürdürülebilirliğe yönelik artan kaygılar ve tükenen enerji kaynakları, araştırmacıları enerji tüketiminin en aza indirilmesi, CO₂ emisyonlarının azaltılması gibi çevresel boyutu önceleyen amaçlara odaklanmaya yöneltmiştir (Zhang ve Chiong, 2016; Liao ve Wang, 2018; Wang ve ark., 2022).

Enerji odaklı çizelgeleme literatürü temel olarak iki ana stratejiye ayrılmaktadır: açma/kapama ve hız ölçekleme (Gahm ve ark., 2016). (Mouzon ve ark., 2007) tarafından ortaya konan açma/kapama stratejisi, makinelerin boşta oldukları sürelerde

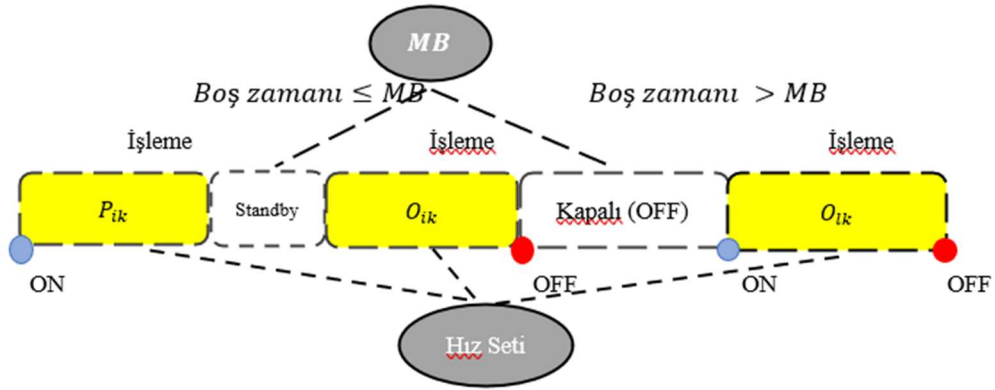
kapatılmasının enerji israfını önemli ölçüde azaltabileceğini öne sürmektedir. Ancak makinelerin her boşta kalma süresinde kapatılması, tekrar çalıştırmak için gereken ek enerji veya sık açma-kapama nedeniyle oluşabilecek potansiyel hasarlar/arızalar sebebiyle her zaman uygulanabilir olmamaktadır. Bazı süreçlerde, makinelerin kapatılması yüksek maliyetlere yol açtığından bu strateji uygun değildir. Öte yandan, (Yao ve ark., 1995) tarafından önerilen hız ölçekleme stratejisi, makinelerin farklı işlerin operasyonlarını işlerken değişken hız seviyelerinde çalışmasına imkân tanımaktadır. Bu yaklaşımda makine, boşta kaldığında tamamen kapatılmamakta, bekleme modunda tutulmaktadır. Bu durum, boşta kalma süresi uzadıkça enerji tüketiminin artmasına neden olmakta ve toplam enerji tüketiminin en aza indirilmesi amacına tam olarak uymamaktadır.

Müşteri açısından bakıldığında, ürünlerin zamanında teslim edilmesi giderek daha kritik bir performans göstergesi hâline gelmiştir (Harter ve ark., 2025). Pandemi sonrasında e-ticaret hacmi küresel ölçekte iki katına çıkarak 2024 yılı itibarıyla 6,3 trilyon ABD dolarına ulaşmıştır (Akıl ve Ungan, 2022). Fiziksel mağazaların kapanması, hijyen kaygıları, lojistik altyapısındaki gelişmeler, mobil cihazların yaygın kullanımı, sosyal medya ve dijital pazarlamanın büyümesi, müşterileri çevrim içi alışverişe yöneltmiştir. Sipariş veren müşteriler, teslimatın yapılacağı iki zaman aralığı (ya da teslimat penceresi) seçebilmekte veya en geç kabul edilebilir bir teslimat zamanı belirleyebilmektedir. Bu zamanın karşılanamaması müşteri memnuniyetsizliğine, şirket itibarının zarar görmesine ve çeşitli olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, işletmelerin rekabet gücünü koruyabilmesi için geç teslimatlardan kaynaklanan toplam gecikmeyi en aza indirmeleri gerekmektedir (Abdolhamidi ve Lurkin, 2024). Artan enerji talebine ayak uydurabilmek için, etkin çizelgeleme imalat ve hizmet sektörlerinde kritik bir rol üstlenmektedir (Michael, 1995).

Yukarıda tartışıldığı üzere, sürdürülebilirlik kaygıları ile müşteri memnuniyetinin yarattığı birleşik baskı altında yöneticiler veya karar vericiler çoğu zaman birbiriyle çelişen birden fazla amacı aynı anda yönetmek zorunda kalmaktadır (Deb, 2011). Bu zorluğu aşmanın bir yolu, her amaca farklı ağırlıklar atayarak problemi tek amaçlı hâle indirmektedir. Ancak (Marler ve ark., 2004)'ün de belirttiği gibi, amaçlar ölçülebilirlik açısından karşılaştırılmaz olduğunda uygun ağırlıkların seçilmesi oldukça güçtür. Bir diğer yaklaşım ise amaçları öncelik sırasına koymak ve ikincil amaçlar için hedef değerler belirlemektir. Ne var ki, bu yöntem karar vericinin tercihlerine fazlasıyla bağımlı ve öznel bir nitelik taşımaktadır. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için özellikle de amaçların

görelî önemine ilişkin önceden bilgi bulunmadığı durumlarda çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılmakta ve bir dizi domine edilmeyen (Pareto-optimal) çözüm üretilmektedir (Zitzler ve ark., 2000). Böylelikle karar vericiler, amaçlar arasındaki ödünleşmeleri değerlendirme ve daha bilinçli seçimler yapma imkânına kavuşmaktadır.

Bu nedenle, bu çalışmada iki çelişik amaç birlikte ele alınmıştır: toplam enerji tüketimini en aza indirmek ve toplam gecikmeyi azaltmak. Bu amaçla, açma/kapama ve hız ölçekleme stratejilerini bütünleştiren yenilikçi bir çerçeve sunulmuştur. Önerilen model, farklı hız seviyelerinde çalışan birden fazla makinenin çeşitli işleri işlediği bir atölye tipi çizelgeleme ortamında çalışmaktadır. Her iş, önceden belirlenmiş bir sıraya göre yürütülmesi gereken operasyonlardan oluşmaktadır. Aktif işlem sırasında makineler seçilen bir hızda çalışmakta ve operasyon tamamlanana kadar bu hız sabit kalmaktadır. Makine boşta kaldığında ise davranışı, boşta kalma süresine bağlı olarak değişmektedir. Eğer boşta kalma süresi önceden tanımlanmış eşiği aşarsa, makine tamamen kapatılmakta ve enerji tüketimi sıfıra indirilmektedir. Buna karşılık, daha kısa boşta kalma sürelerinde makine düşük güçte bekleme moduna alınmakta ve bir sonraki göreve kadar minimum düzeyde enerji tüketmektedir. Ancak makinelerin yüksek hızda çalıştırılması işlerin tamamlanmasını hızlandırmakla birlikte enerji tüketimini ciddi ölçüde artırmaktadır. Öte yandan düşük hızda çalıştırmak enerji tasarrufu sağlasa da işlem sürelerini uzatmakta ve gecikme riskini artırmaktadır. (Bkz. Şekil 1.2)



Şekil 1.2. Önerilen alternatif çerçeve.

Bu ödünleşmeyi yönetebilmek için, atölye tipi çizelgelemesine yönelik iki amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli formüle edilmiştir. Küçük boyutlu problemlerde pareto-optimal çözümler üretmek amacıyla artırılmış epsilon kısıt yöntemi (Augmecon) kullanılmıştır. Ancak, problemin karmaşıklığı nedeniyle, ileri düzeyde iki meta-sezgisel algoritma—Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma—

II (NSGA-II) ve Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu Algoritması (MOGWO) özelleştirilerek uygulanmıştır. Bu yöntemler; Hiperhacim (HV), kalite ölçütü (QM), Domine Edilmeyen Çözüm Sayısı (NDS) ve CPU süresi gibi temel performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Bu çalışma, açma/kapama ve hız ölçekleme stratejilerini aynı anda içeren bir atölye tipi çizelgeleme problemini ele alan ilk çalışmadır.
- Çalışmada önerilen enerji modeli, makinelerin hem çalışırken hem de bekleme modunda enerji tüketimini dikkate almakta olup, literatürde daha önce sunulmamıştır.
- Bu çalışma, toplam enerji tüketiminin ve toplam gecikmenin en küçüklenmesini iki amaçlı bir çerçevede birlikte ele alan öncü bir çalışma niteliği taşımaktadır.

Tez çalışmasının diğer bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Üretim çizelgelemesi, sürdürülebilir üretim çizelgelemesi ve çok amaçlı optimizasyon kavramlarının teorik yönleri sırasıyla Bölüm 2, 3 ve 4'te ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Beşinci bölümde, enerji odaklı atölye tipi çizelgeleme problemine ilişkin literatür kapsamlı şekilde analiz edilmiş; mevcut yaklaşımlar, yöntemler ve modeller detaylandırılmış ve bu çalışmalar üzerinden literatürdeki araştırma boşlukları sistematik biçimde ortaya konmuştur.

Altıncı, yedinci ve sekizinci bölümlerde ise tez kapsamında ele alınan sürdürülebilir çok amaçlı atölye tipi çizelgeleme problemi incelenmiştir. Her bölümde, ilgili problem açıkça tanımlanmış, önerilen matematiksel modeli sunulmuş, kullanılan çözüm stratejileri geliştirilmiş ve bu stratejilerin etkinliği deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirilmiştir. Son bölümde ise tez çalışması kapsamında elde edilen bulguların genel bir değerlendirmesi yapılarak, gelecekte yapılması planlanan çalışmalara ışık tutabilecek öneriler yer almaktadır.

2. ÜRETİM ÇİZELGELEME

Bu bölümde, üretim çizelgeleme kavramı kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. İlk olarak, çizelgelemenin tanımı yapılarak üretim sistemleri içindeki yeri ve stratejik önemi açıklanmaktadır. Daha sonra, çizelgeleme problemlerinin karar seviyeleri ayrıştırılmakta ve farklı üretim ortamları bağlamında incelenmektedir. Ardından, çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması ve bu süreçteki temel kararlar ortaya konulmaktadır. Devamında, bu tezde ele alınan problemin çözümüne uygun ortam olarak Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi (ATÇP) üzerinde özellikle durulmaktadır. Öncelikle ATÇP'nin tanımı ve altında yatan varsayımlar verilmekte, ardından matematiksel ifadesi sunulmaktadır. ATÇP'nin zorluk düzeyi açıklanarak neden çözülmesi güç (NP-zor) bir problem olduğu ortaya konulmakta ve son olarak ATÇP'nin farklı çizelge türleri incelenmektedir.

2.1. Üretimde Çizelgeleme Kavramı ve Tanımı

Üretimde çizelgelemenin sistematik olarak incelenmesi 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmakta olup, özellikle Henry Gantt ve diğer öncü araştırmacıların katkılarıyla şekillenmiştir. Ancak bu öncü girişimlere rağmen, çizelgelemenin endüstri mühendisliği ve yöneylem araştırması kapsamında akademik olarak ele alınması yalnızca birkaç on yıl sonra gerçekleşmiştir. Alanın temellerini atan çalışmalar 1950'lerde görülmeye başlanmıştır. Özellikle Naval Research Logistics Quarterly dergisi (Johnson, 1954) tarafından yayımlanan ilk çizelgeleme çalışmasına yer vermiş, bunu (Smith, 1956) ve (Jackson, 1956) gibi araştırmacıların önemli katkıları izlemiştir.

Sonraki yıllarda, çizelgeleme çalışmalarına yönelik önemli ve artan bir ilgiyle birlikte akademik araştırmaların çeşitlenmesine tanıklık etmiştir. Aynı zamanda, devam eden teknolojik gelişmeler, endüstriyel uygulamalar için tasarlanmış pratik çizelgeleme sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır.

Çizelgeleme, (Baker, 1974) tarafından şu şekilde tanımlanmıştır: Çizelgeleme, bir dizi görevi yerine getirmek için kaynakların zamana göre tahsis edilmesidir. Ayrıca, çizelgelemeyi, çizelgeleme görevine dair içgörü sağlayan ilke, model, teknik ve mantıksal sonuçların bir bütünü olarak tanımlamıştır.

Ayrıca, (Morton ve Pentico, 1993) çizelgelemeyi şu şekilde tanımlamıştır: Çizelgeleme, istenen çıktıları istenilen zamanlarda üretmek için gerekli tüm faaliyetleri

yerine getirmek amacıyla kaynak kullanımını organize etme, seçme ve zamanlama sürecidir. Bu süreç, faaliyetler ve kaynaklar arasındaki çok sayıda zaman ve ilişki kısıtını karşılamayı da içerir

Öte yandan, (Pinedo, 2012) çizelgelemeyi, birçok üretim ve hizmet sektöründe düzenli olarak kullanılan bir karar verme süreci olarak tanımlamıştır. Bu süreç, belirli zaman aralıklarında kaynakların işlere atanmasıyla ilgilenir ve amacı bir veya birden fazla amacı optimize etmektir.

Sonuç olarak, çizelgeleme genel anlamda makineler, işgücü veya altyapı gibi sınırlı kaynakların belirli görevleri belirli zamanlarda gerçekleştirmek üzere atanması sürecidir. Bu organizasyon süreci; teslimat gecikmelerinin önlenmesi, üretim süresinin kısaltılması, üretim hattının dengelenmesi veya iş yükü dağılımının optimize edilmesi gibi amaçlarla planlanmaktadır.

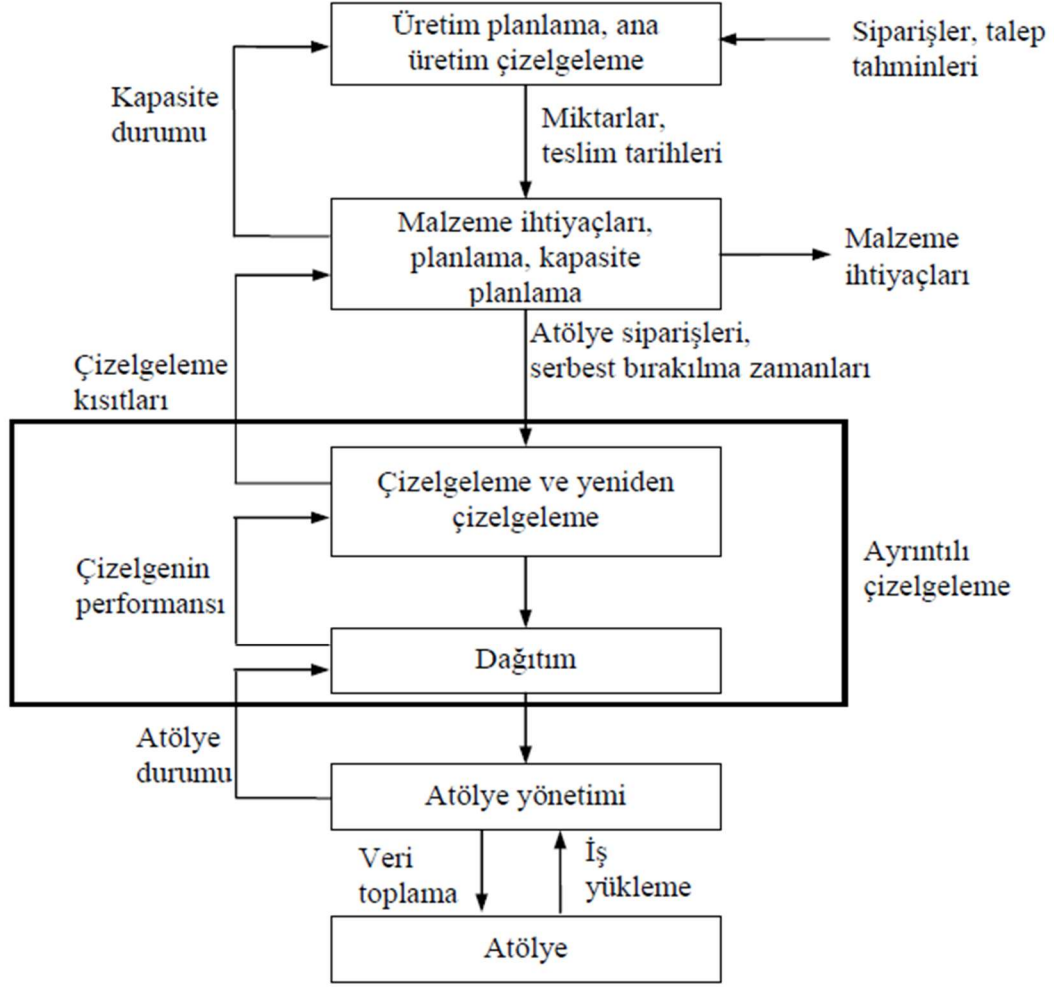
2.2. Çizelgelemenin Kurumsal Yapı İçindeki Yeri ve Önemi

Çizelgeleme fonksiyonu, bir işletme ya da bir sistem üzerindeki diğer fonksiyonlarla güçlü ve uyumlu ilişkiler kurmak zorundadır. Bu ilişkiler genellikle işletme çapında bir bilgi sistemi içinde gerçekleşir, sistem bağımlıdır ve duruma göre büyük ölçüde değişiklik gösterebilir.

Üretim ortamında serbest bırakılan siparişler, teslim tarihleriyle ilişkilendirilmiş işlere dönüştürülmelidir. Bu işler, önceden belirlenmiş bir sıraya göre iş merkezindeki makineler tarafından işlenmelidir. Ancak, zaman zaman makinelerin meşgul olması bu işlerin işlenmesinde gecikmelere yol açabilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu işler yüksek önceliğe sahipse, diğer işlerden önce işlenebilir.

Üretim sisteminde yer alan işlerin ayrıntılı olarak çizelgelenmesi, operasyonların düzenli ve verimli bir şekilde yürütülmesi açısından kritik bir gerekliliktir. Özellikle orta ve uzun vadeli planlama faaliyetlerinin yürütüldüğü üretim planlama süreci, çizelgelemeyi doğrudan etkiler. Bu aşamada, stok durumları, talep öngörüler ve kaynak gereksinimleri dikkate alınarak ürün çeşitliliğinin ve uzun vadeli kaynak kullanımının optimize edilmesi gerekir. Bu planlama sürecinde verilen kararlar, doğrudan çizelgeleme uygulamalarını etkileyebilmektedir. Ayrıca, atölyede ortaya çıkan ekipman arızaları veya tahmin edilenden daha uzun süren işlemler gibi öngörülmeven durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür aksaklıklar çizelgeler üzerinde ciddi değişikliklere yol

açabilmektedir. Şekil 2.1, üretim sisteminde bilgi akışının nasıl gerçekleştiğini görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 2.1. bir imalat sistemindeki bilgi akış diyagramı (Pinedo, 2016).

2.3. Çizelgeleme Problemlerinin Karar Seviyeleri

Çizelgeleme, üretim ve hizmet endüstrilerinde karar verme sürecinin planlanması ve kontrolünde çeşitli aşamalarda rol oynamaktadır.

(Baker, 1974), ile (Morton ve Pentico, 1993) çalışmalarında da vurgulandığı üzere, çizelgeleme karar verme sürecinin farklı düzeylerinde ele alınmaktadır. Bu düzeyler şu şekilde özetlenebilir:

- Uzun vadeli planlama: Bu aşama genellikle 2 ila 5 yıl gibi geniş bir zaman dilimini kapsar. Fabrika yerleşimi, tesis tasarımı ya da tesis genişletme gibi stratejik kararlar bu kategoriye girer.

- Orta vadeli planlama: Üretim düzgünleştirme ve lojistik gibi, 1 ila 2 yıllık bir dönem içinde gerçekleştirilebilen planlamalardır.
- Kısa vadeli planlama: Her 3 veya 6 ayda bir yapılan planlamadır. Örnekler arasında gereksinim planlaması ve teslim tarihi belirleme yer almaktadır.
- Tahmini çizelgeleme: 2 ila 6 haftalık bir zaman aralığında gerçekleştirilen çizelgelemedir. Atölye tipi yönlendirmesi, montaj hattı dengelemesi ve proses partisi boyutlandırma tahmini çizelgeleme kapsamında değerlendirilmektedir.
- Tepkisel çizelgeleme veya kontrol: Her gün veya her üç günde bir yapılan çizelgelemedir. Örnekler arasında acil işler, arızalı makineler ve gecikmiş malzemeler yer almaktadır.

2.4. Üretim Çizelgeleme Ortamları

(Conway, 1967) göre, çizelgeleme ortamları dört temel bilgi türüne göre sınıflandırılmaktadır: işlerin ve gerçekleştirilecek operasyonların özellikleri; atölyeyi oluşturan makinelerin sayısı ve türleri, işlerin makineler arasında nasıl atanabileceğini kısıtlayan kurallar ve oluşturulan çizelgenin hangi ölçütlere göre değerlendirileceği. Bu ortam türleri aşağıdaki şekilde gruplandırılmaktadır:

- Tek makineli atölye: Tek bir makine ve üzerinde işlenecek n adet işten oluşur.
- Akış tipi: Seri hâlinde m makine bulunmaktadır ve işler şu iki şekilde işlenebilir:
 - ✓ Permütasyonlu akış tipi: Tüm işler, m makinede aynı sıra ile işlenir.
 - ✓ Permütasyonsuz akış tipi: İşler, m makinede farklı sıralar izleyerek işlenebilir.
- Atölye tipi: Her işin kendine özgü bir akış düzeni vardır ve bazı işler her bir makineyi birden fazla kez ziyaret edebilir. Yani, çoklu giriş ve çıkış söz konusudur.
- Montaj atölye tipi: İşlerin en az iki bileşen öğeden oluştuğu ve en az bir montaj operasyonu içeren iş atölyesidir.
- Hibrit atölye tipi: Bazı işlerin operasyonlarının öncelik sırası birbirinin aynıdır.
- Hibrit montaj atölye tipi: Hem montaj tipi hem de hibrit iş atölyesinin özelliklerini bir arada barındırır.

- Açık atölye: m makine vardır ve her işin makinelerden geçişiyle ilgili herhangi bir kısıtlama bulunmaz. Diğer bir ifadeyle, hiçbir iş için belirlenmiş bir akış düzeni yoktur.
- Kapalı atölye: Bir iş atölyesi türüdür; ancak tüm üretim emirleri, stok yenileme kararları sonucunda üretilmektedir. Dolayısıyla üretim, doğrudan müşteri siparişlerinden etkilenmez.

2.5. Üretim Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Çizelgeleme problemleri, belirli varsayımların geçerli olup olmamasına göre farklı kategorilere ayrılır ve bulunan varsayımlara göre problemin yapısı değişir.

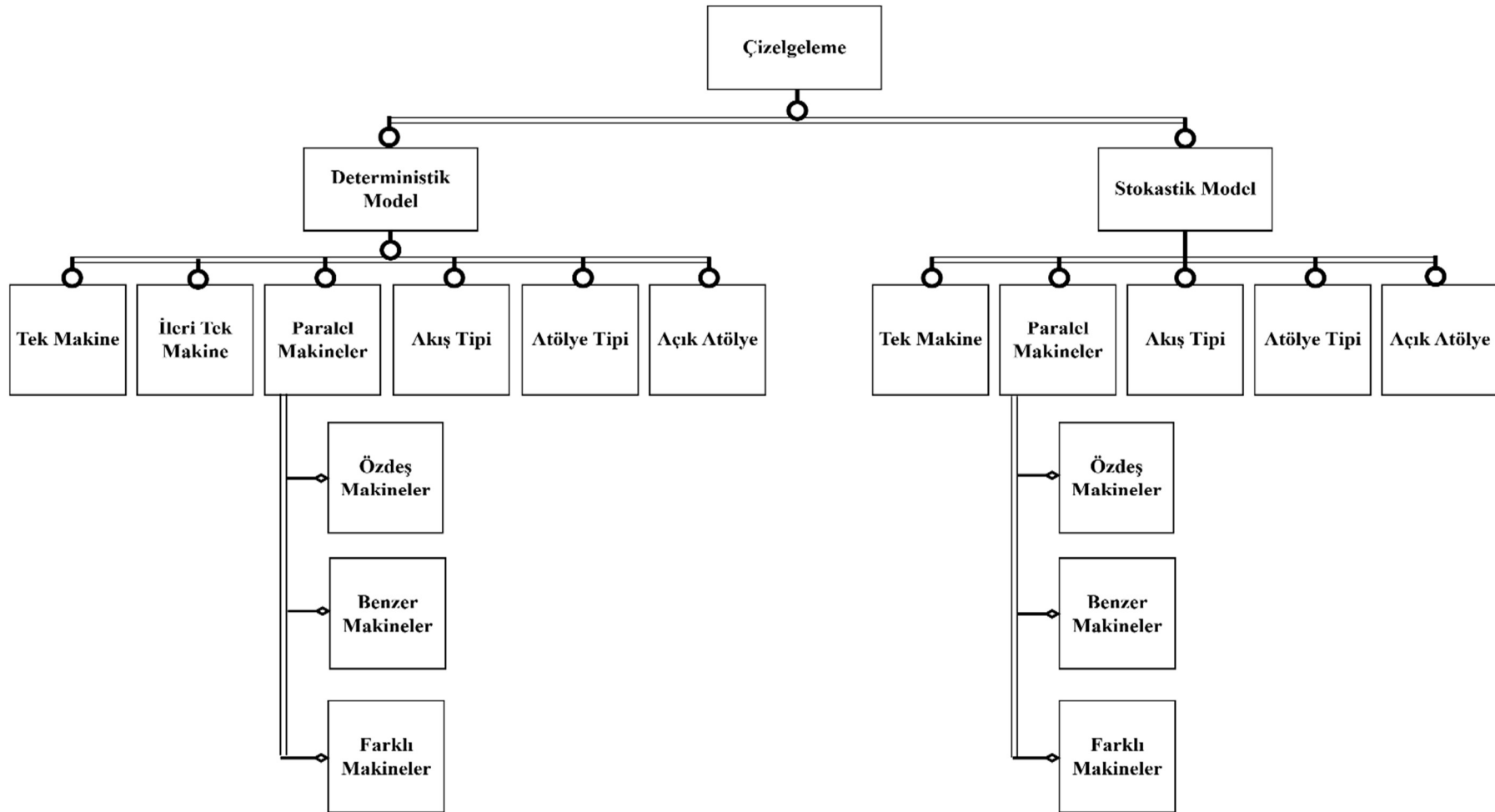
(Pinedo, 2016) çizelgeleme problemlerini iki temel gruba ayırmaktadır: deterministik ve stokastik.

- Deterministik çizelgeleme problemleri: İşlerin atölyeye geliş durumları, teslim tarihleri, sıraları, işlem süreleri ve makinelerin kullanılabilirliği gibi tüm problem parametrelerinde belirsizlik bulunmadığı ve bu parametrelerin önceden tamamen bilindiği durumları ifade eder.
- Stokastik problemlerde ise parametrelerin tam değerleri öngörülemez ve parametrelerden en az birinde belirsizlik veya rassallık bulunmaktadır. (Bkz. Şekil 2.2).

Ayrıca, ilerleyen süreçte problemi belirleyen parametrelerde değişim olup olmamasına göre üretim çizelgeleme şu iki grupta incelenmektedir:

- Statik üretim çizelgeleme.
- Dinamik üretim çizelgeleme.

Üretim çizelgelemede başlangıçta belirlenen parametreler süreç boyunca sabit kalıyorsa bu durum statik üretim çizelgeleme olarak adlandırılır. Ancak, zaman içerisinde parametrelerde değişiklik meydana geliyor ve buna göre güncelleniyorsa bu durumda dinamik üretim çizelgeleme söz konusudur.



Şekil 2.2. Pinedo'ya göre çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması (Pinedo, 2016).

2.6. Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi

Atölye tipi çizelgeleme problemi (ATÇP), üretim çizelgeleme problemlerinin en temel ve en zorlu sınıflarından birini temsil etmektedir. ATÇP, her biri belirli bir operasyon sırasından oluşan çok sayıda işin, önceden tanımlanmış teknolojik rotalara sahip bir makine kümesi üzerinde işlenmesi gerektiği ortamlarda ortaya çıkmaktadır. Problemin zorluğu, operasyon sıraları ve makine atamaları için ortaya çıkan olasılıkların kombinatoryal olarak hızla artmasından kaynaklanmakta, bu yönüyle ATÇP'yi yöneylem araştırması ve üretim yönetimi alanlarında temel bir karşılaştırma problemi haline getirmektedir.

Bu alt bölümde, ATÇP'nin tanımı ve altında yatan varsayımlar sunulacak, ardından problemin biçimsel matematiksel gösterimi yapılacaktır. Sonrasında, ATÇP'nin doğasında bulunan hesaplama güçlükleri tartışılarak, neden NP-zor bir problem sınıfına girdiği açıklanacaktır. Son olarak, farklı ATÇP türleri sunulacaktır.

2.6.1. ATÇP'nin tanımı ve varsayımları

Atölye tipi çizelgeleme problemi, sonlu sayıda m adet $\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$ makine üzerinde işlenecek yine sınırlı sayıda n adet $\{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ işin, önceden tanımlanmış bir işlem sırası ve kapasite sınırlamaları çerçevesinde, amaç fonksiyonunu en iyi duruma getirecek biçimde her işlemin başlama zamanının belirlenmesi olarak tanımlanır.

Bu problemde, her işin her bir makinede yalnızca bir kez işlem göreceği varsayılmaktadır. Bir işin herhangi bir makinede işlenmesine operasyon adı verilir ve i işin j makinedeki operasyonu O_{ij} ile ifade edilir. Toplam operasyon sayısı ise $n \times m$ kadardır.

İşler makinelerde belirli bir düzen içerisinde sıralanır; bu düzen teknolojik sınırlama ya da rota olarak adlandırılır.

Her işin kendine ait bir işlem sırası olup, bu sıra diğer işlerin işlem sırasından bağımsızdır. Her bir operasyon (O_{ij}), belirli bir süre içerisinde tamamlanır. Bu sürelere işlem zamanı adı verilir ve i numaralı işin j numaralı makinedeki işlem süresi p_{ij} şeklinde gösterilir.

Yukarıda belirtilen koşulların yanında atölye tipi çizelgeleme için aşağıdaki varsayımlar geçerlidir (French, 1982).

- Her bir iş tek parça olarak ele alınır. İş birden fazla operasyondan meydana gelse bile, aynı işe ait iki farklı operasyonun eşzamanlı olarak işlenmesine izin verilmez.
- Bir operasyona başladıktan sonra, aynı makinede başka bir operasyona geçilmeden önce mutlaka o operasyonun tamamlanması gerekir.
- Bütün işler sürecin en başında işlem görmeye uygun halde bulunur.
- Her iş, her bir makinede bir kez olmak üzere toplam m adet farklı operasyondan oluşur. Aynı işin bir tezgâhta iki kez işlenmesi durumu dikkate alınmaz.
- İşlem zamanları, işlemlerin sıralamasına bağlı olmaksızın sabittir.
- Çizelgeleme sürecine başlanmadan önce tüm tezgâhların boş ve kullanılabilir durumda olduğu varsayılır.
- Herhangi bir işin iptali mümkün değildir; tüm işler eksiksiz bir şekilde tamamlanana kadar işleme alınmalıdır.
- Her tezgâh türünden sistemde yalnızca bir adet bulunduğu kabul edilir ve işleme süreci boyunca aynı işi gerçekleştiren birden fazla tezgâhın mevcut olmadığı varsayılır.
- Tezgâhların, herhangi bir işlem gerçekleştirmemesi mümkündür.
- Her bir tezgâh, aynı anda yalnızca tek bir operasyon gerçekleştirebilir; eşzamanlı işlem yapma kabiliyetine sahip değildir.
- Tezgâhların arızalanmayacağı ve çizelgeleme süreci boyunca kesintisiz olarak çalışır durumda kalacağı varsayılmaktadır.
- Teknolojik sınırlamaların önceden belirlenmiş olduğu kabul edilmektedir.
- Herhangi bir rastgelelik durumu bulunmamaktadır;
- İş sayısı önceden belirlenmiş olup sabittir.
- Makinelerin sayısı önceden belirlenmiş olup sabittir.
- İşlem zamanların sayısı önceden belirlenmiş olup sabittir.
- Tüm işler aynı öncelikte değerlendirilir, herhangi bir öncelik tercihi uygulanmaz.

Sonuç olarak, ATÇP’de işlerin makinalardan geçiş sırası belirlenir. Bu sıra bulunan kısıtlarla uyumlu olmalı ve belirlenen performans kriterlerine göre optimal ya da optimal çözüme yakın sonuçlar vermelidir.

2.6.2. ATÇP'nin matematik ifadesi

Atölye tipi çizelgelemenin etkinliğini değerlendirebilmek için çeşitli performans ölçütlerinin tanımlanması gereklidir. Bu ölçütlerin matematiksel olarak ifade edilebilmesi adına, öncelikle bazı kavramlar ve notasyonlar açıklanmalıdır. İş sayısı n , tezgâh sayısı ise m olarak kabul edilirse, temel tanımlar şu şekildedir:

- r_i : i numaralı işin hazır olma zamanı, $i = 1, 2, 3, \dots, n$
- p_{ij} : i numaralı işin j numaralı makinedeki işlem süresi, $i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m$
- d_i : J_i işi için belirlenmiş teslim tarihi, $i = 1, 2, 3, \dots, n$
- W_i : J_i işinin toplam bekleme süresi
- C_i : J_i işinin tamamlanma zamanı
- $C_i = r_i + p_i$: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ için tamamlanma zamanı
- $F_i = C_i - r_i$: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ için akış süresi
- $L_i = C_i - d_i$: J_i işinin gecikme süresi, yani tamamlanma süresi ile teslim tarihi arasındaki fark ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

Eğer bir iş, belirlenen teslim tarihinden önce tamamlanmışsa, bu durumda gecikme değeri (L_i) negatif olur. Bu, işin zamanında hatta erken tamamlandığını gösterir. Buna karşılık, L_i pozitif bir değer alıyorsa, iş teslim tarihinden sonra bitmiş demektir ve bu durum pozitif gecikme olarak adlandırılır. Bu doğrultuda, iki yeni performans ölçütü tanımlanmaktadır:

T_i : i numaralı işin pozitif gecikme süresi

$$T_i = \max\{L_i, 0\}, i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Yukarıda sunulan terminoloji kapsamında, zaman kavramı iki farklı şekilde değerlendirilir: hem bir aralığı hem de belirli bir noktayı ifade edebilir. Dolayısıyla hazır bulunma zamanı ve tamamlanma zamanı, zaman eksenindeki belirli noktaları temsil ederken; işlem süresi, bekleme süresi ve akış süresi gibi kavramlar birer zaman aralığını belirtir.

Bu notasyon temelinde, performans ölçütleri iki ana kategoride sınıflandırılabilir:

a) Tamamlama zamanına dayalı ölçütler:

- Maksimum akış süresi (F_{max})
- Maksimum tamamlanma zamanı (C_{max})
- Ortalama akış süresi ($\bar{F}$)

- Ortalama tamamlanma zamanı ($\bar{C}$)
- b) Teslim tarihine dayalı ölçütler: Bu grup, işlerin planlanan teslim tarihlerine ne derece uygunluk gösterdiğini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Başlıca ölçütler şunlardır:

- Ortalama gecikme süresi
- Maksimum gecikme süresi (L_{max})
- Ortalama pozitif gecikme süresi
- Maksimum pozitif gecikme süresi (T_{max})
- Geç teslim edilen iş sayısı

Bu ölçütlerin her biri, üretim sürecinin etkinliği açısından asgari düzeyde tutulmak istenir.

Atölye tipi çizelgelemede tamamlanma zamanına (makespan) dayalı performans ölçütü, sistemdeki tüm işlerin işlenmesini tamamlamak için gerekli olan maksimum zaman dilimini ifade eder. Bu ölçüt, genellikle C_{max} ile gösterilir ve çizelgeleme etkinliğini değerlendirmede yaygın olarak kullanılır.

Bu bağlamda, notasyonlar şu şekilde tanımlanır:

C_{max} : Tamamlanma zamanının maksimum değeri (makespan),

Y_{ij} : i makinede işlenen j işin operasyonunun başlama zamanı,

P_{ij} : i makinede işlenen j işin işlem süresi,

N : Toplam iş sayısı,

M : Toplam makine sayısı.

Bu tanımlara göre makespan matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilir: (Pinedo, 2016).

$$\text{Min } f(x) = C_{max} \quad (2.1)$$

$$Y_{kj} - Y_{ij} \geq P_{ij} \quad k, i \in 1, 2, 3 \dots, m, \quad j \in 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.2)$$

$$Y_{ij} - Y_{il} \geq P_{il} \text{ veya } Y_{il} - Y_{ij} \geq P_{ij} \quad i \in 1, 2, 3 \dots, m, \quad j, l \in 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.3)$$

$$C_{max} - Y_{ij} \geq P_{ij} \quad i \in 1, 2, 3 \dots, m, \quad j \in 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.4)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad i \in 1, 2, 3 \dots, m, \quad j \in 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.5)$$

Amaç fonksiyonu denklem (2.1), çizelgeleme probleminin tamamlanma süresini minimize etmektedir. Buradaki C_{max} , tüm operasyonlar tamamlandıktan sonra elde

edilen en geç bitiş zamanını, yani makespan değerini temsil etmektedir. Denklem (2.2), öncelik kısıtlarını ifade etmektedir. Bu kısıtlarda $[i, k]$ ifadesi, aynı işe (j) ait ardışık iki operasyonu tanımlamaktadır. Başka bir deyişle, iş j 'nin i operasyonu tamamlanmadan k operasyonu başlatılamaz. Denklem (2.3), makine kapasite kısıtlarını göstermektedir. Burada $[j, l]$ ifadesi, aynı makinede (i) gerçekleştirilmesi gereken iki operasyon çiftini temsil etmektedir. Aynı makine aynı anda yalnızca bir operasyonu gerçekleştirebildiğinden, bu operasyonlardan biri mutlaka diğerinden sonra başlamak zorundadır. Bu durum, iki alternatif eşitsizlik biçiminde (ya j operasyonu l 'den sonra başlar ya da tersi) ifade edilmiştir. Denklem (2.4), tamamlanma zamanı kısıtını tanımlamaktadır. Bu kısıt ile makespan C_{max} , her operasyonun bitiş zamanından daha küçük olamayacak şekilde modellenmiştir. Böylece C_{max} , tüm işler için geçerli en uzun tamamlanma süresini temsil eden doğru bir üst sınır olarak işlev görmektedir. Son olarak denklem (2.5), başlangıç zamanı kısıtını içermektedir. Bu kısıt, tüm operasyonların başlangıç zamanlarının negatif olmamasını sağlar. Yani her operasyonun çizelgede sıfır anından önce başlaması engellenmiştir.

2.6.3. ATÇP'nin zorluk düzeyi

ATÇP, çözüm uzayının büyüklüğü açısından oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu problemde, n adet işin m adet makinede işlenmesi durumunda, oluşturulabilecek tüm olası çizelge sayısı $(n!)^m$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Bu sayı hem iş hem de makine sayısının artmasıyla birlikte üstel biçimde büyür ve dolayısıyla optimal çizelgenin belirlenmesi, hesaplama açısından ciddi bir yük oluşturmaya başlar. Özellikle problem boyutları arttıkça, çözüm için gerekli hesaplama süresi pratikte uygulanamaz seviyelere ulaşabilir.

Örneğin, 10 iş ve 10 makineden oluşan bir problem için, yaklaşık $(10!)^{10} \approx 3,96 \times 10^{65}$ adet alternatif çizelgenin incelenmesi gerektiği düşünüldüğünde, toplam işlem süresinin pratikte uygulanamaz bir süreye ulaşacağı görülmektedir. Dolayısıyla, ATÇP, NP-zor olarak sınıflandırılır (Rinnooy Kan, 1976) ve çözümü elde edebilmek adına sezgisel veya meta-sezgisel yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.6.4. ATÇP'nin çizelge türleri

(Şevkli, 2005)'e göre ATÇP de çizelge türleri üç temel kategoriye ayrılmaktadır:

- Yarı Aktif Çizelge: Tezgâh üzerindeki işlem sırasını değiştirmeden, hiçbir işlemin daha erken tamamlanamayacağı; yani işlerin ve makinelerin işlem sıraları sabit kalmak koşuluyla, her bir işlemin olabilecek en erken zamanda başlatıldığı kabul edilebilir çizelgeleme biçimine yarı aktif çizelge denilmektedir.
- Aktif Çizelge: Başka herhangi bir işlemin tamamlanmasını geciktirmeden ve makinelerin işlem sırasını değiştirerek, hiçbir işlemin daha erken bitirilemediği, yani işlemlerin birbirini bekletmeden mümkün olan en erken zamanda planlandığı çizelgeye aktif çizelge denir.
- Gecikmesiz Çizelge: makine önünde işlenmeye hazır bir işlem bulunmasına rağmen makinenin boş bekletilmediği çizelgeye gecikmesiz çizelge denir.

Gecikmesiz bir çizelge, aktif ya da yarı aktif çizelge olmalıdır, ancak aktif veya yarı aktif çizelge olmanın, mutlaka gecikmesiz çizelge olmayı gerektirdiği söylenemez.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM ÇİZELGELEME

Geleneksel üretim çizelgeleme yaklaşımları, çoğunlukla üretim maliyetlerini düşürmek, teslimat sürelerini kısaltmak ve kaynak kullanımını en verimli şekilde gerçekleştirmek gibi dar kapsamlı ekonomik amaçlara odaklanmaktadır. Ancak günümüzün artan çevresel kaygıları, enerji tüketimindeki artış, karbon emisyonu, doğal kaynakların tükenmesi ve sosyal sorumluluk gereklilikleri, üretim çizelgelemenin yalnızca ekonomik boyutla sınırlı kalamayacağını göstermektedir. Bu nedenle sürdürülebilir üretim çizelgeleme, ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarını eş zamanlı dikkate alan, çok boyutlu bir optimizasyon alanı haline gelmiştir.

Bu bölümde öncelikle sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir üretim kavramları tanımlanmakta, ardından sürdürülebilir üretim göstergeleri ele alınmaktadır. Ardından, sürdürülebilir üretim çizelgelemenin temel özellikleri ve farklı boyutları (ekonomik, çevresel ve sosyal) ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

3.1. Sürdürülebilirlik Kavramı ve Tanımı

“Sürdürülebilirlik” kavramı, köken olarak İngilizce “sustainability” sözcüğünden türetilmiştir. Bu kelimenin etimolojik temeli Latince’de “elde tutmak, muhafaza etmek” anlamına gelen “tenere” fiiline dayanmaktadır. Aynı bağlamda İngilizce “sustain” sözcüğü de “devam ettirmek” veya “sürdürmek” şeklinde kullanılmaktadır (Kuhlman ve Farrington, 2010).

Günümüzde sürdürülebilirlik kavramının pek çok farklı alanda yaygın biçimde yer aldığı gözlemlenmektedir. İnsan için gerekli görülen bu kavram, tarımsal faaliyetlerden şehir planlamasına, turizmden teknolojik gelişmelere kadar pek çok alanda “sürdürülebilir tarım” veya “sürdürülebilir şehirler” örneklerinde olduğu gibi farklı biçimlerde kendini göstermektedir. Sürdürülebilirlik, yapısı gereği zaman içerisinde değişen koşullar ve yeni yaklaşımlar doğrultusunda sürekli gelişim göstermesi nedeniyle, bu kavram için tek bir tanım ortaya koymak zordur.

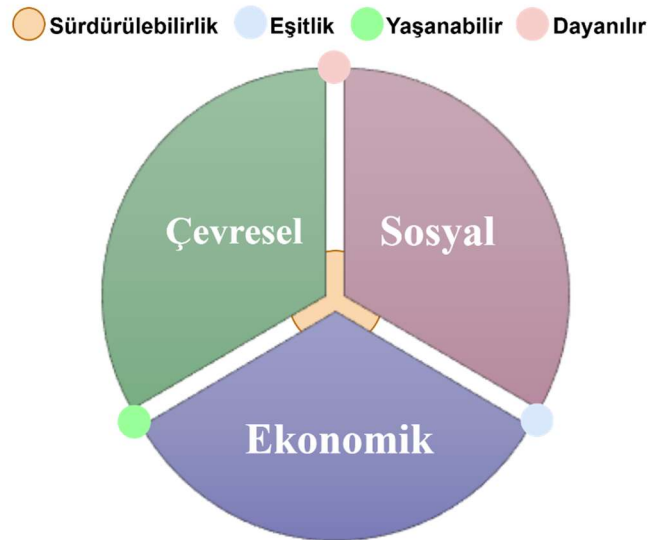
Sürdürülebilirlik kavramı, ilk kez 1713 yılında Alman ormancı Hans Carl Von Carlowitz’in “Sylvicultura Oeconomica” adlı eserinde, ormanların uzun vadede nasıl yönetilmesi gerektiğini açıklamak amacıyla dile getirilmiştir (von Carlowitz, 2013). Ancak bu yaklaşım, uzun yıllar boyunca geniş çapta kabul görmemiştir. 1980’lerde

kavramın resmî bir tanıma kavuşmasıyla birlikte, akademik literatürde de yer bulmaya başlamış ve günümüze kadar ciddi bir gelişim süreci yaşamıştır.

1987 yılında, Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu, tarafından yayımlanan “Ortak Geleceğimiz” başlıklı Brundtland Raporu’nda sürdürülebilirliği, günümüzün ihtiyaçlarını karşılarken gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılama imkânlarını riske atmayan bir kalkınma modeli olarak açıklanmıştır (WCED, 1987). Bu tanım, sürdürülebilirliğin yalnızca bugünü değil, geleceği de kapsayan uzun vadeli bir bakış açısı içerdiğini; kuşaklar arası adaletin sağlanması ve etik değerlerin korunmasının temel amaçlar arasında yer aldığını ortaya koymaktadır.

2005 yılında Birleşmiş Milletler tarafından gerçekleştirilen Dünya Zirvesi’nde, sürdürülebilir kalkınma üç temel boyut altında tanımlanmıştır: ekonomik kalkınma, sosyal kalkınma ve çevresel kalkınma. Bunun için sürdürülebilirlik performansı da bu üçlü yapı üzerinden değerlendirilmeye başlanmıştır (Altuntuğ ve Dergisi, 2009).

Ekonomik sürdürülebilirlik, doğal kaynakların etkin ve verimli kullanımıyla ilgilidir. Sosyal sürdürülebilirlik ise, çevresel farkındalığa sahip bireylerden oluşan bir toplum yapısını ve bu bilince uygun tüketim davranışlarını kapsamaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik ise, doğal çevrenin korunması ve bozulan ekosistemlerin onarılması ya da yeniden dengelenmesi sürecine odaklanmaktadır. Bu üç boyut, sürdürülebilirlik kavramının grafiksel temsili açısından sıklıkla kullanılan “üçlü daire modeli” ile görselleştirilmektedir. (Bkz. Şekil 3.1)



Şekil 3.1. Sürdürülebilirlik kavramının şematik gösterimi.

Sonuç olarak Sürdürülebilirlik, çevresel ya da ekonomik bir mesele olmanın ötesinde, toplumun yeniden biçimlendirilmesine yönelik bir yaklaşım değerlendirilmesi olarak tanımlanabilir. Sadece doğal kaynakların korunmasını değil, aynı zamanda ekonomik kalkınma, paydaş memnuniyeti, kurumsal itibarın güçlendirilmesi, müşteri bağlılığı ile ürün kalitesinin artırılmasını da kapsamaktadır.

3.2. Sürdürülebilir Üretim Kavramı ve Tanımı

Sürdürülebilir üretim yaklaşımı, köklerini Sanayi Devrimi'nden almakta olup, 18. yüzyılda makineleşmeye dayalı seri üretimin yaygınlaşmasıyla doğal kaynak kullanımının artması ve çevresel etkilerin ortaya çıkması süreciyle şekillenmiştir. 1960'lı yıllarda Toyota tarafından geliştirilen ve üretim süreçlerindeki israfı azaltmayı amaçlayan yalın üretim yaklaşımı, 1990'lı yıllarda Batı ülkelerinde yaygınlaşmıştır. Daha sonra teknolojinin çevresel odaklı uygulamalara entegrasyonu ile yeşil üretim kavramı gelişmiş ve günümüzde sürdürülebilir üretim sistemleri, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla bütünlük bir yaklaşımla kullanılmaktadır. Sürdürülebilir üretimin tarihsel gelişimi Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Sürdürülebilir üretimin tarihi gelişimi (Aracıoğlu, 2010)

Paradigma	Başlangıç Yılı	Toplum İhtiyaçları	Pazar Özellikleri	İş Modeli	Teknolojiyi Mümkün Kılan	Süreci Mümkün Kılan
Zanaatkârlığa Dayalı Üretim	1850	Kişiselleştirilmiş ürünler	Ürün başına düşük miktar	Çekme Sat-tasarla-üret-monte et	Elektrik	İmalat tezgâhları
Kitlesel Üretim	1913	Düşük maliyetli ürünler	Talep> Arz (Sürekli talep)	İtme Tasarla-üret-monte et-sat	Değiştirilebilir parçalar	Hareketli montaj parçaları
Esnek Üretim	1980	Ürün Çeşitliği	Arz> Talep (Ürün başına düşük miktarlar)	İtme-çekme Tasarla-üret- sat-monte et	Bilgisayarlar	FMS robotlar
Kitlesel Kişiyeye Özgü Üretim	2000	Kişiselleştirilmiş ürünler	Küreselleşme Değişken talep	Çekme Tasarla-sat-üret-monte et	Bilgi teknolojileri	Yeniden ayarlanabilir üretim sistemleri
Sürdürülebilir Üretim	2020	Temiz ürünler	Çevre	Çekme Çevre için tasarla-sat-üret-monte et	Nano/bio/madde teknolojileri	Üretim artışı

Türkiye’de sürdürülebilir üretim düşüncesi ilk kez 1999 yılında, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ile Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı tarafından düzenlenen bilim-teknoloji-sanayi tartışma platformu çerçevesinde gündeme getirilmiş, “ulusal bir temiz üretim politikası” gerekliliği vurgulanmıştır. Bu kavram, sonrasında Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu’nun stratejik öncelikleri arasında yer alarak, ulusal ölçekte bilimsel ve teknolojik amaçların belirlenmesinde önemli bir konum kazanmıştır.

Bununla birlikte, sürdürülebilir üretim yaklaşımı kamuoyunda genellikle yalnızca enerji tasarrufu boyutuyla sınırlı şekilde algılanmakta; çevresel ve sosyal katkıları yeterince tanınmamakta ve uygulamada sınırlı düzeyde hayata geçirilmektedir.

(Gürül, 2019)’e göre, sürdürülebilir üretim kavramı literatürde farklı perspektiflerden ele alınmış ve çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Bu tanımlardan öne çıkan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

Tanım 1: Sürdürülebilir üretim; çevresel kirlenmeye yol açmayan, enerji tasarrufu sağlayan ve hem doğal kaynakları hem de çalışanları, toplulukları ve tüketicileri dikkate alan güvenli ve ekonomik süreçlerle ürün elde etme süreci olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, günümüzde giderek daha fazla önem kazanan sürdürülebilir üretim, geleneksel olarak yalnızca makine verimliliğine odaklanan üretim anlayışından farklı olarak, daha kapsamlı ve bütünleşmiş bir yaklaşımı temsil etmektedir (Chun ve Bidanda, 2013).

Tanım 2: En sade biçimiyle sürdürülebilir üretim, uzun vadede çevresel faktörleri ve insan sağlığını gözetten uygulamalar bütünüdür. Bu yaklaşımın temel amacı, doğal kaynakların etkin korunması yoluyla gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakmak ve aynı zamanda ekonomik katkının devamlılığını sağlamaktır (De Ron, 1998).

Tanım 3: Sürdürülebilir üretim, üretim süreçlerine entegre edilen yenilikçi yöntemler, teknolojiler ve uygulamalar aracılığıyla çevresel etkileri azaltmayı; ürünlerin ise çevre dostu bir yaşam döngüsüne sahip olmasını amaçlayan teknik ve yapısal çözümler bütünüdür.

Ayrıca sürdürülebilir üretim, çevreci ürün tasarımı, çevreci tedarik zinciri, çevreci teknolojiler ve çevreci üretim uygulamaları gibi unsurları kapsamaktadır. Geleneksel üretim anlayışının yalnızca maliyet, kalite, teslimat süresi ve esneklik kriterlerine odaklanmasının aksine, sürdürülebilir üretim, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlar arasında denge kurmayı amaçlamaktadır (Dubey ve ark., 2015).

Bu sunulan tanımlamalar doğrultusunda sürdürülebilir üretim;

- Ekonomik açıdan, özellikle enerji, su ve toprak gibi doğal kaynakların daha etkin ve verimli kullanımını sağlayan,
- Çevresel açıdan, ekosistemin dengesini koruyarak olumsuz çevresel etkileri en aza indiren, atık oluşumunu minimuma indirmeyi amaçlayan,
- Sosyal açıdan ise, çalışanların ve tüketicilerin sağlık ve güvenliğini gözetan, süreç ve ürün kalitesini artıran, operasyonel güvenliği destekleyen ve ürünün yaşam döngüsü boyunca çevreye, canlılara ve topluma zarar vermeyen ürün ve hizmetlerin üretimini esas alan bütüncül bir yaklaşım olarak tanımlanabilir.

Özetle, sürdürülebilir üretim; ekonomik kazanımların yanı sıra çevresel sürdürülebilirliği ve toplumsal refahı gözetan bütüncül bir üretim yaklaşımıdır.

3.3. Sürdürülebilir Üretim Göstergeleri

Sürdürülebilir üretim göstergeleri üç alt başlık altında değerlendirilmektedir: ekonomik, çevresel ve sosyal.

Bu nedenle, (Elkington, 1998), bir üretim firmasının performansını bütüncül bir şekilde değerlendirebilmek için ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları içeren üçlü sorumluluk (Triple Bottom Line - TBL) yaklaşımı ortaya koymuştur. TBL'nin bu üç boyutu birlikte ele alındığında, bu boyutlarda tanımlanan amaçların birbiriyle tutarlı olmadığı açıkça görülmektedir. Örneğin, bir üretim işletmesi önemli ölçüde ekonomik kazanç sağlayabilir (ekonomik boyut), ancak bu durum hava ya da su kirliliği gibi çevresel zararlar (çevresel boyut) doğurabilir. Dolayısıyla sürdürülebilir üretim çizelgelemesi, (TBL) çerçevesinde ortaya çıkan çelişkili amaçlar arasında uyum sağlamaya çalışan bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü, sürdürülebilirlik göstergelerini kapsamlı biçimde sınıflandırarak üç temel boyuta – çevresel yönetim, ekonomik büyüme ve toplumsal refah – ek olarak iki tamamlayıcı boyutu, yani teknolojik ilerleme ile performans yönetimini de içeren toplam 212 gösterge tanımlamıştır (Brocke ve ark., 2009).

Buna karşılık, (Akbar ve Irohara, 2018) ise yalnızca imalat sektöründe uygulanabilirliği kanıtlanmış sürdürülebilir üretim göstergelerini ele almış ve bunları TBL boyutlarına göre sınıflandırmıştır. Burada, toplamda 43 gösterge tanımlanmış ve şu şekilde yapılandırılmıştır:

- Çevresel boyut, iki kategoriden oluşur: Emisyon ve kirletici kategorisi ile Kaynak tüketimi kategorisi.
- Ekonomik boyut, üç kategoriden oluşur: Finansal performans kategorisi, Üretim maliyeti kategorisi ve Teslimat güvenilirliği kategorisi.
- Sosyal boyut, üç kategoriden oluşur: Toplum kategorisi, Çalışan kategorisi ve Müşteri memnuniyeti kategorisi.

Ayrıca, bu kategorilerin her biri farklı alt kategorilerden oluşmaktadır.

Örneğin, Emisyon ve kirletici kategorisi altı alt kategori içermektedir: sera gazı emisyonları/karbon ayak izi, su atığı deşarjı, oluşan katı atık miktarı, atık enerji salınımı, zararlı gaz salınımı ve atık ayrıştırma oranı vb. (Bkz. Çizelge 3.2).



Çizelge 3.2. Sürdürülebilir üretim için gösterge referansları (Akbar ve Irohara, 2018)

Çevresel Boyut		
Emisyon ve kirletici kategorisi	Üretim maliyeti kategorisi	
Seragazı emisyonu	Ürünlerde yeniden kullanılan / geri dönüştürülmüş malzeme	Enerji verimliliği
Atık su deşarjı	Atılan ambalaj malzemesi	Su yoğunluğu
Katı atık üretimi	Yeniden kullanılan ambalaj malzemesi	Yeniden kullanılan su
Atık enerji emisyonu	Uygulanan girişimlerden tasarruf edilen malzeme	Uygulanan girişimlerden sağlanan araç yakıt tasarrufu
Zararlı gaz salınımı	Elektrik enerjisi tüketimi	Arızalı/defolu ürünlerin yüzdesi
Atık ayrıştırma yüzdesi	Enerji yoğunluğu	Kullanılan çevre dostu/yeşil hammadde yüzdesi
-	Uygulanan girişimlerden sağlanan enerji tasarrufu	
-	Yan ürünlerden elde edilen enerji	
Ekonomik Boyut		
Mali Performans Kategorisi	Üretim Maliyeti Kategorisi	
Net kâr marjı	Malzeme maliyetleri	
Yatırımın geri dönüşü	Enerji maliyetleri	
Biriken maliyetler	İşçilik maliyetleri	
Teslimat güvenilirliği kategorisi	Operasyonel ve sermaye maliyetleri	
Ürün teslimi	Envanter/Stok maliyeti	
Sosyal Boyut		
Topluluk Kategorisi	Çalışan Kategorisi	
Sürdürülebilirlik Raporlarının Yayınlanması	Kayıp İş Günleri	Sürdürülebilirlik Konusunda Eğitilen Çalışanlar
Sürdürülebilirlik ödülleri	Çalışan devri / işten ayrılma oranı	Devamsızlık
-	Kişisel koruyucu ve güvenlik ekipmanları	Kaza oranı
-	Güvenlik nedeniyle hat duruşları	Gürültü seviyesi
-	İş gücü verimliliği	İşçi-işveren ilişkisi
-	Sürdürülebilirlik eğitimine ayrılan ortalama saat	

3.4. Sürdürülebilir Üretim Çizelgeleme

Daha önce de belirtildiği üzere, geleneksel üretim çizelgeleme, atölye düzeyinde alınan operasyonel bir karar niteliği taşımaktadır

Bu çizelgeleme, belirli bir amacın optimize edilmesi doğrultusunda bir veya birden fazla makine üzerinde gerçekleştirilecek işlerin sıralanmasını mümkün kılmaktadır.

Geleneksel üretim çizelgelemesinde yaygın olarak kullanılan amaçlar; maksimum tamamlanma süresi (*Makespan*), toplam tamamlanma süresi (*TTS*), ortalama akış süresi, gecikme gibi kriterlerin minimizasyonudur.

Buna karşın, sürdürülebilir üretim çizelgeleme yaklaşımı, geleneksel yöntemlerden farklı olarak yalnızca ekonomik amaçlara odaklanmakla kalmayıp, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarını da sürece entegre etmektedir. Başka bir ifadeyle, sürdürülebilir üretim çizelgelemesi kavramı, geleneksel üretim çizelgeleme amaçları ile üçlü sorumluluk (TBL) yaklaşımı'nda tanımlanan amaçlar arasında bir köprü kurmayı amaçlamaktadır.

Bu doğrultuda, (Abedini ve ark., 2020) sürdürülebilir üretim çizelgeleme amaçlarını üç ana küme altında sınıflandırılmıştır: (i) ekonomik odaklı çizelgeleme, (ii) çevresel odaklı çizelgeleme ve (iii) sosyal odaklı çizelgeleme. Her bir küme, alt kümelere ayrılmakta ve bu alt kümeler de ölçülebilir performans göstergeleri çerçevesinde bölünmektedir. (Bkz. Şekil 3.2)

3.4.1. Ekonomik odaklı üretim çizelgeleme

Bu alt bölümde, üretim çizelgelemesine yönelik dört tür ekonomik performans göstergesi tanımlanmaktadır: (i) Üretim maliyeti, (ii) Enerji maliyeti, (iii) İşçilik maliyeti ve (iv) Stok maliyeti.

3.4.1.1. Üretim maliyeti

Üretim maliyeti, sürdürülebilir üretim çizelgelemesinde en önemli ekonomik performans göstergelerinden biridir.

Çizelgeleme sistemlerinin temel amacı, üretilen birim başına toplam maliyeti minimize etmektedir. Bu maliyet, doğrudan üretim kaynaklarının kullanım biçimi ve

maksimum tamamlanma süresi (*Makespan*) ile ilişkilidir. Maksimum tamamlanma zamanı, ilk işin başlamasından son işin bitimine kadar geçen süre olarak tanımlanır. Bu sürenin azaltılması ($\min(Makespan)$), mevcut kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlar ve kullanım oranını ($\max(Kullanım)$) yükseltir (Pinedo, 2016).

Kullanım oranı, bir üretim sisteminin fiili çıktısı ile kaynakların tam kapasiteyle kullanılması halinde elde edilebilecek teorik çıktı arasındaki oranın ifadesidir. Dolayısıyla, daha yüksek kullanım oranına ulaşmak, aynı kaynaklarla daha fazla üretim gerçekleştirmek anlamına gelir ve bu durum birim başına üretim maliyetini doğrudan düşürür.

Sonuç olarak, çizelgeleme kararlarında maksimum tamamlanma zamanının azaltılması yalnızca kaynak kullanımında verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda üretim maliyetlerinin azaltılmasına da katkı sağlar. Bu ise, ekonomik sürdürülebilirlik çerçevesinde üretim sisteminin rekabet gücünü önemli ölçüde güçlendirir.

3.4.1.2. Enerji maliyeti

Enerji maliyeti, sürdürülebilir üretim çizelgelemesinde önemli bir ekonomik performans göstergesidir. Sanayi sektörü, toplam birincil enerjinin yaklaşık %31'ini tüketmektedir (Liu ve ark., 2017) ve enerji sağlayıcıları genellikle kademeli fiyatlandırma politikaları uygular; talebin baz yükü aşması durumunda elektrik maliyetleri önemli ölçüde artar. Bu nedenle, üretim çizelgelemesinde enerji yönetimi için sistem düzeyinde bir yaklaşım benimsemek, sürdürülebilir üretimi sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Enerji maliyetini etkileyen iki temel bileşen bulunmaktadır:

- Makinelerin boşa kalma durumlarında ortaya çıkan enerji tüketimi (Li ve ark., 2016) ve
- Stokların elleçlenmesi sırasında ortaya çıkan enerji tüketimi.

Boşa geçen sürede enerji tüketimini azaltmak, makinenin boşa kalma süresini azaltmakla eşdeğerdir ve bu da maksimum tamamlanma süresi (*Makespan*) değerinin düşürülmesiyle sağlanabilir.

Stok elleçlemeden kaynaklanan enerji tüketimi ise doğrudan planlama dönemi boyunca stok seviyesine bağlıdır. Toplam tamamlanma süresi sistemdeki stok seviyesinin

bir göstergesi olduğundan, *TTS*'nin azaltılması stok seviyesini düşürür ve dolayısıyla stokun elleçlenmesi için gereken enerji miktarını azaltır.

Buna göre, *Makespan* ve *TTS*'nin optimize edilmesi, enerji kullanımını daha verimli hâle getirir, enerji maliyetlerini düşürür ve üretim sürecinin ekonomik sürdürülebilirliğine katkı sağlar.

3.4.1.3. İşçilik maliyeti

İşçilik maliyeti, ekonomik planlamada temel unsurlardan biridir; çünkü doğrudan gerekli çalışma saatlerinin sayısı ve koşullarıyla ilişkilidir. Fazla mesai ücretleri genellikle normal ücretlerden yüksek olduğundan (Gong ve ark., 2017) , bu maliyetleri sınırlamak için üretim işlemlerinin normal çalışma saatleri içinde tamamlanması gerekir. Maksimum tamamlanma süresinin (*Makespan*) azaltılması, üretimin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlar ve böylece fazla mesai ihtiyacını ve bununla ilişkili ek harcamaları azaltır.

Buna ek olarak, işçilik maliyeti stok seviyesinden de etkilenir; stok elleçleme işlemleri (taşıma, gözetim, lojistik hizmetler gibi) ek insan kaynağı gerektirir. Toplam tamamlanma süresi sistemdeki stok seviyesinin bir göstergesi olduğundan, *TTS*'nin azaltılması stok seviyesini düşürür ve dolayısıyla stokun elleçlenmesi için gereken çalışma saatlerini azaltarak stokla ilişkili işçilik maliyetini düşürür.

Sonuç olarak, *Makespan* ve *TTS*'yi azaltmayı amaçlayan planlama iyileştirmeleri, işçilik maliyetlerini düşürmek için etkili bir strateji oluşturur ve ek insan kaynağına ihtiyaç duymadan sistemin ekonomik verimliliğini ve üretkenliğini artırır.

3.4.1.4. Stok maliyeti

Stok maliyeti, çizelgeleme süresi boyunca stok bulundurma ile ilişkili tüm giderleri kapsar. Buna, stokta bağlı olan sermayenin fırsat maliyeti, depo altyapı maliyetleri, sigorta, amortisman, vergiler ve diğer operasyonel giderler dahildir (Tiwari ve ark., 2018).

Stok seviyesi, toplam tamamlanma süresi ile doğrudan ilişkilidir; *TTS*, çizelgeleme dönemi boyunca sistemdeki ortalama stok miktarını yansıtır. Bu nedenle, *TTS*'nin minimize edilmesi, stok seviyesinin düşürülmesini sağlar ve dolayısıyla stok bulundurma maliyetlerini doğrudan azaltır.

Sonuç olarak, stok maliyetlerinin optimize edilmesi yalnızca operasyonel giderleri azaltmakla kalmaz; aynı zamanda stokta bağlanan sermayenin etkin kullanımını artırır ve üretim sisteminin ekonomik sürdürülebilirliğine katkıda bulunur.

3.4.2. Çevresel odaklı üretim çizelgeleme

Çevresel sürdürülebilirlik, sürdürülebilir üretim çizelgelemesinin temel boyutlarından biridir ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasını amaçlar. En çok incelenen çevresel performans göstergeleri arasında enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları yer almaktadır.

Enerji tüketimi, makinelerin durumu, işlem hızı ve enerji talep zirveleri ile doğrudan ilişkilidir (Che ve ark., 2017b). Çizelgeleme sürecinde enerji tüketiminin etkin yönetimi, üretim sırasında harcanan enerjiyi azaltarak çevresel etkiyi doğrudan düşürür.

Çoğu enerji, fosil yakıtlardan sağlandığı için, enerji tüketiminde sağlanan her bir birim tasarruf, sera gazı emisyonlarının azalmasına katkıda bulunur. Bu nedenle, sera gazı emisyonları genellikle enerji tüketiminin bir fonksiyonu olarak hesaplanır (Akbar ve Irohara, 2018).

İşlemlerin çizelgelenmesinin optimizasyonu, örneğin makinelerin boşa kalma sürelerinin minimize edilmesi ve üretim yükünün dengeli dağıtılması enerji kullanımını ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarını azaltarak üretim sistemlerinde çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlar.

3.4.3. Sosyal odaklı üretim çizelgeleme

Sosyal odaklı çizelgeleme, üretim süreçlerinin müşteriler ve toplum üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmeyi amaçlar. Bu kapsamda en önemli performans göstergeleri ortalama tamamlanma süresi ve tamamlanma süresi varyansı olarak öne çıkar.

Ortalama tamamlanma süresi (OTS), her bir işin sistemde geçirdiği ortalama süreyi ifade eder. OTS 'nin minimize edilmesi ($\min(OTS)$), toplam tamamlanma süresinin ($\min(TTS)$) azaltılmasına eşdeğerdir. Bu durum, müşterilerin bekleme sürelerinin kısalmasını sağlayarak hizmet erişimini hızlandırır ve müşteri memnuniyetini artırır (Bagchi, 1989).

4. ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON

Bu bölümde, çok amaçlı optimizasyon kavramı sistematik bir şekilde ele alınmaktadır. İlk olarak, çok amaçlı optimizasyonun tanımı yapılmakta ve tek amaçlı problemlere kıyasla sahip olduğu özgün özellikler ortaya konulmaktadır. Ardından, pareto optimallliği kavramı açıklanarak çok amaçlı problemlerde çözüm kümelerinin nasıl değerlendirildiği detaylandırılmaktadır. Devamında, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözüm yöntemleri sunulmakta ve bu yöntemler iki ana grupta incelenmektedir. İlk grupta kesin yöntemler yer almakta olup, bunlar tercihsiz, posteriori, priori ve etkileşimli yaklaşımlar şeklinde sınıflandırılmaktadır. İkinci grupta ise, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık problemlerin çözümünde etkinliğiyle öne çıkan metasezgisel algoritmalar ele alınmaktadır. Böylece bölüm boyunca, çok amaçlı optimizasyonun temel kavramlarından başlayarak çözüm stratejilerine kadar uzanan bütüncül bir çerçeve sunulmaktadır.

4.1. Çok Amaçlı Optimizasyonun Kavramı ve Tanımı

Optimizasyon, belirli kısıtlar altında bir problemin en uygun çözümünü bulmayı amaçlayan bir alandır. Optimal çözüm genellikle problemin doğasına ve analistin tercihine bağlı olarak bir veya birden fazla kritere göre tanımlanır. Bir çözüm, kullanıcı tarafından belirlenen ya da problemin yapısından kaynaklanan tüm kısıtları sağlıyorsa, ideal olarak kabul edilir.

Optimizasyon problemleri yapı bakımından oldukça çeşitlidir. Doğrusal olmama, süreklilik ve konvekslik gibi özellikler, her problem türü için özel çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılar. Bu nedenle, farklı optimizasyon yöntemleri ortaya konmuş ve bazı durumlarda aynı problem türüne birden fazla yaklaşım uygulanabilmiştir. Bununla birlikte, optimizasyon teorisi ve uygulamaları hâlen her bir problemin doğasına uygun, dikkatle tasarlanmış stratejiler gerektirir.

Optimizasyon problemleri genellikle amaç fonksiyonunun ve kısıtların özelliklerine göre sınıflandırılır. Örneğin, amaç fonksiyonu ve kısıtların doğrusal olduğu durumda doğrusal optimizasyondan, en az bir fonksiyonun doğrusal olmadığı durumda ise doğrusal olmayan optimizasyondan söz edilir. Amaç fonksiyonu ve uygun çözüm kümesi konveks olduğunda konveks optimizasyon, amaç fonksiyonunun kuadratik ve kısıtların doğrusal olması durumunda ise kuadratik optimizasyon ortaya çıkar. Eğer

parametreler veya kısıtlar rastgele değişkenlere bağlıysa, bu durumda stokastik optimizasyon uygulanır.

Bu sınıflandırmalar çoğunlukla tek amaçlı problemlere odaklanmaktadır. Ancak gerçek dünyadaki birçok problemde aynı anda birden fazla amacın dikkate alınması gerekir ve bu amaçlar çoğu zaman birbirleriyle çelişir. Yani bir amacı iyileştirmek, en az bir diğer amacı kötüleştirmeden mümkün değildir. Bu tür problemler, çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak adlandırılır (López Jaimes ve ark., 2011).

Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde hangi çözümün daha iyi olduğu kolayca belirlenebilir ve süreç genellikle tek bir optimal çözüme ulaşır. Buna karşın, çok amaçlı optimizasyonda amaçlar farklı birimlerle ölçüldüğünden, çözümleri doğrudan karşılaştırmak mümkün değildir. Bu gibi durumlarda en yaygın yaklaşım pareto dominasyon kavramına dayalıdır (Pareto, 1896). Bu yaklaşım tek bir optimal çözüm yerine, amaçlar arasında denge kuran bir çözüm kümesi üretir. Bu çözümler pareto optimal çözümler veya domine edilmeyen çözümler olarak adlandırılır.

Pareto optimalitesi bu alandaki temel kavramlardan biridir. Bir çözüm, bu çözümdeki herhangi bir amacı kötüleştirmeden diğer bir amacı iyileştirmenin mümkün olmadığı durumda pareto optimal kabul edilir. Bu kavram, amaçlar arasındaki çatışmaların ve denge durumlarının etkin bir biçimde değerlendirilmesini sağlar. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyon, mühendislikten ekonomiye, yöneylem araştırmasından yapay zekâya kadar pek çok alanda geniş uygulama bulmuş ve hem teorik hem de uygulamalı çalışmalarda yoğun ilgi görmüştür.

Bununla birlikte, matematiksel olarak tüm pareto optimal çözümleri eşdeğer olsa da pratikte yalnızca tek bir çözüm seçilmesi gerekir. Dolayısıyla çok amaçlı optimizasyon süreci iki temel aşamadan oluşur: (1) pareto optimal çözüm kümesinin oluşturulması ve (2) bu kümeden en uygun çözümün seçilmesi. Tüm pareto çözümleri matematiksel olarak eşdeğer kabul edildiğinden, karar verme süreci aslında ikinci aşamada başlar. Burada karar verici, öznel tercih bilgilerini kullanarak nihai kararı belirler.

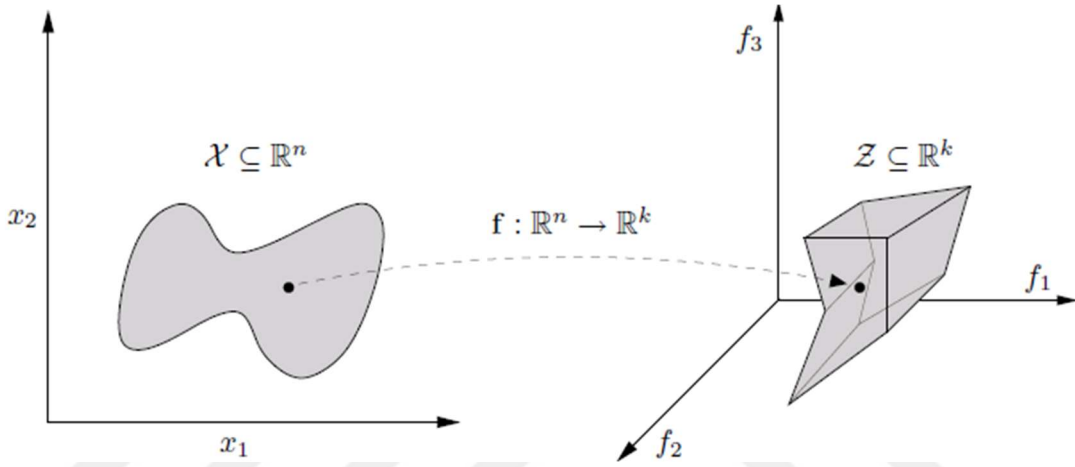
Bu çerçeveyi açıklamak için (López Jaimes ve ark., 2011) , çok amaçlı optimizasyon problemini şu şekilde tanımlamıştır:

$$\min f(x_1) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (6.1)$$

$$x \in X \quad (6.2)$$

Burada $x \in R_n$, değerleri belirlenmesi gereken n adet karar değişkenini temsil eder; X ise problem kısıtları tarafından belirlenen uygun çözüm kümesini gösterir.

Amaç fonksiyonları, $f: R_n \rightarrow R_k$ biçiminde tanımlanan ve $f_i: R_n \rightarrow R$ ($i = 1, \dots, k$) şeklinde ifade edilen k adet skaler fonksiyondan oluşan bir vektör fonksiyonunu meydana getirir. Çok amaçlı optimizasyonda, R_n karar değişkenleri uzayı, R_k ise amaç fonksiyonları uzayı olarak adlandırılır. Karar değişkenleri uzayındaki uygun çözüm kümesi X 'in f fonksiyonu altındaki görüntüsü, $Z = f(X)$ ile gösterilir ve amaç fonksiyonları uzayında elde edilebilir çözümler kümesini oluşturur (Bkz. Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde arama alanları. (López Jaimes ve ark., 2011).

Öte yandan (Zitzler, 1999), çok amaçlı optimizasyon problemini şu şekilde tanımlamıştır:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x \in X \quad (6.3)$$

$$y = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)], y \in Y \quad (6.4)$$

$$e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_m(x)) \leq 0 \quad (6.5)$$

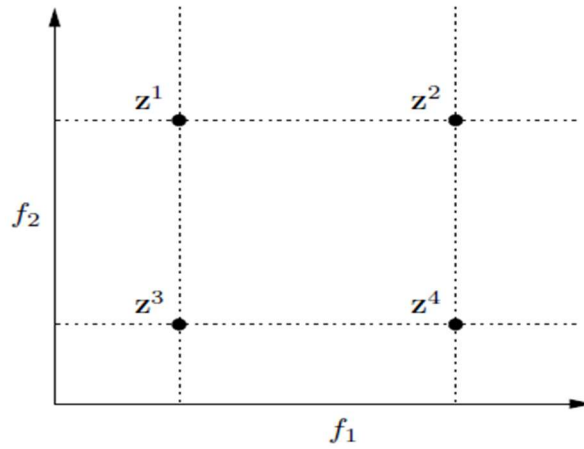
Burada, n adet karar değişkeni x , k adet amaç fonksiyonu $f_i(x)$ ve m adet kısıt $e_j(x)$ içeren problemi tanımlanmaktadır. Amaç fonksiyonları ve kısıtlar karar değişkenlerinin fonksiyonlarıdır. Uygun çözüm kümesi X , kısıtları sağlayan tüm x değerlerini kapsar.

Genel olarak, çok amaçlı optimizasyon problemlerindeki amaçlar arasındaki çatışmalar nedeniyle tüm amaçları aynı anda iyileştiren tek bir çözüm mevcut değildir. Bunun yerine, amaçlar arasında denge sağlayan çözümler belirlenir ve bu çözümler pareto optimalitesi kavramına göre tanımlanır.

4.2. Pareto Optimallığı Kavramı

Pareto optimalite kavramı, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde genellikle Francis Ysidro Edgeworth tarafından 1881 yılında önerilen pareto dominasyonu ilişkisi temel alınarak kullanılır (Edgeworth, 1881). Bu kavram daha sonra, İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto tarafından 1896 yılında geliştirilmiştir (Pareto, 1896). Pareto optimalite, Pareto'nun refah teorisinin temel taşlarından biri olarak, farklı ülkelerdeki ekonomik denge koşullarını incelerken geliştirilmiştir. Zamanla, pareto optimalitesi, optimal çözümlerin analizinde merkezi bir rol oynamış ve daha sonra evrimsel algoritmalar kapsamında çok amaçlı optimizasyon problemlerine uyarlanmıştır.

Çok amaçlı optimizasyon bağlamında, pareto çözümü, herhangi bir başka mevcut çözüm tarafından tüm amaçlarda domine edilmeyen ve en az bir amaçta diğer alternatiflerden daha iyi olan çözümdür. Gerçek dünya problemleri genellikle birbirleriyle çelişen birden fazla amaç içerir; bu nedenle pareto yaklaşımı, bu amaçlar arasında dengeyi sağlayan bir çözüm kümesi oluşturur. Bu çözümler, pareto optimal çözüm kümesi olarak adlandırılır. Karar verici, problemin doğasını bilen kişi olarak, bu kümeden en uygun çözümü seçer. Pareto optimal küme içindeki herhangi bir çözüm, başka hiçbir mevcut alternatif tarafından tüm amaçlarda geçilemeyecek şekilde “dominasyon gösterir” ise pareto optimal kabul edilir (Chen, 2001). Şekil 4.2, dört adet iki boyutlu vektör örneği üzerinden pareto dominasyonu ilişkisini göstermektedir. Bir z^1 vektörünün z^2 vektörüne pareto bakımından dominant olduğunu söyleriz ve bunu $z^1 <_{pareto} z^2$ ile gösteririz, eğer ve ancak eğer: $i \in \{1, \dots, k\} : z_i^1 \leq z_i^2$ ve $i \in \{1, \dots, k\} : z_i^1 < z_i^2$



Şekil 4.2. Pareto dominasyonu ilişkisi kavramının gösterimi.

Yani, z^1 tüm amaçlar bakımından z^2 'den daha kötü değildir ve en az bir amaçta daha iyidir. z^3 , her iki amaçta da z^2 'den daha küçüktür, dolayısıyla $z^3 <_{pareto} z^2$.

Ayrıca, z^3 , f_1 açısından z^1 ile eşit, fakat f_2 açısından daha küçük olduğundan z^1 'i de domine eder. Ancak pareto ilişkisi tam bir sıralama değildir; bu nedenle bazı vektörler kıyaslanamaz, örneğin z^1 ile z^4 .

Çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü, uygun çözüm kümesi X içindeki tüm çözümlerden, görüntüsü $z = f(x)$ başka hiçbir vektör tarafından domine edilmeyen çözümleri bulmaktır. Bu çözümler domine edilmeyen çözümler olarak adlandırılır.

Pareto Optimalitesi ise, Bir çözüm $x^* \in X$, eğer başka bir $x \in X$ çözümü bulunmuyorsa ve bu çözüm için $f(x) <_{pareto} f(x^*)$ koşulu sağlanmıyorsa, pareto optimal olarak tanımlanır.

4.3. Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinin Yöntemleri

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin doğasında bulunan zorluk, geniş bir çözüm yaklaşımı yelpazesinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu tür problemler, birbiriyle çelişen amaçları içerdiğinden genellikle tek bir optimum yerine bir dizi ödünleşim çözümüne ulaşılır. Dolayısıyla, bu problemleri çözmek için kullanılan yöntemler hem felsefe hem de hesaplama stratejisi açısından farklılık göstermektedir. Literatürde bu yöntemler genel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: kesin yöntemler ve meta-sezgisel algoritmalar.

4.3.1. Kesin yöntemler

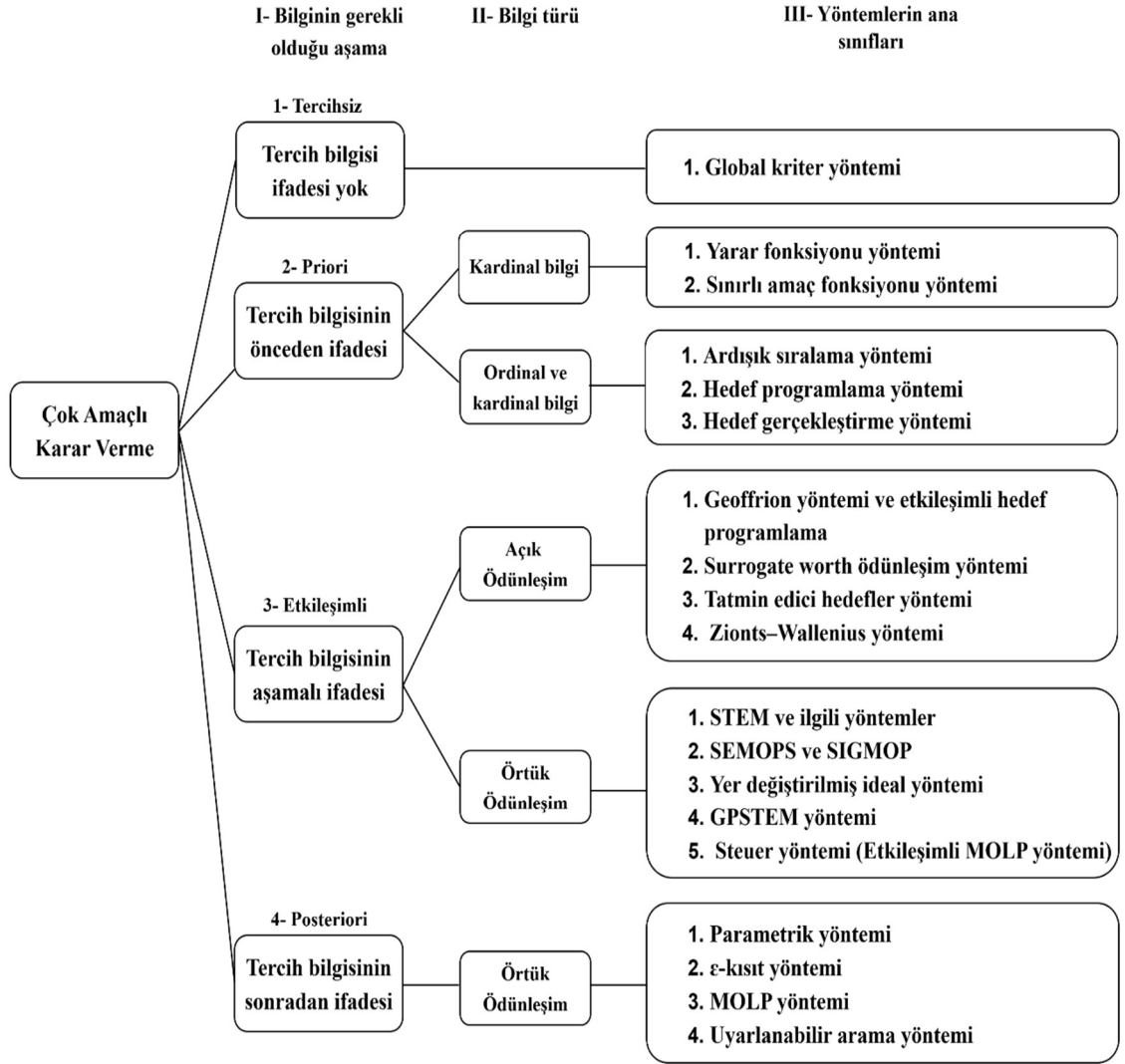
Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde ilerleme kaydedebilmek için öncelikle pareto yüzeyinde yer alan çözüm kümesinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çözüm kümesinden, karar verici kendi tercihlerini ve kriterlerini en uygun biçimde karşılayan alternatifleri seçmektedir. Gerçek yaşamın farklı alanlarında çok amaçlı problemlerin yaygın olarak ortaya çıkması, bu tür problemlere yönelik çeşitli çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

(Hwang ve Masud, 1979), çok amaçlı matematiksel programlama için çözüm tekniklerini, tercih bilgisine ne zaman ihtiyaç duyulduğuna bağlı olarak sınıflandırmıştır.

Bu sınıflandırmaya göre, karar vericinin tercih yapısını açıklığa kavuşturmayı amaçlayan temel yaklaşımlar şu şekilde özetlenebilir (Hwang ve Masud, 1979)

- 1- Tercihsiz yöntemler: Tercih bilgisi kullanılmadan yürütülür.
- 2- Priori yöntemler: Tercihler sürecin öncesinden belirlenir.
- 3- Etkileşimli yöntemler: Tercihler süreç boyunca kademeli olarak şekillenir.
- 4- Posteriori yöntemler: Tercihler sonuçlar elde edildikten sonra açıklanır.

Bu yöntemler arasındaki ilişkiler daha net bir biçimde Şekil 4.3'te özetlenmiştir.



Şekil 4.3. Çok amaçlı karar alma yöntemlerinin sınıflandırılması (Hwang ve Masud, 1979)

4.3.1.1. Tercihsiz yöntemler

Optimizasyon problemlerinde kullanılan yaklaşımlar arasında önemli bir yeri olan tercihsiz yöntemler, karar sürecine başlangıçta KV'nin görüşlerini katmaz; bunun yerine

KV'ye, elde edilen çözüm kümesi içinden seçim yapma imkânı sunar. Bu kategoriye örnek olarak global kriter yaklaşımı ve çok amaçlı yakınsal yığın yöntemi verilebilir.

Bu yöntemler, bazı durumlarda etkileşimli yaklaşımlarla da birleştirilebilir. Tercihsiz yöntemler içinde en bilinen ve en basit olanı Global Kriter Yaklaşımıdır. Bu yöntemde, ağırlıklandırma yapılmaz ve tüm amaç fonksiyonları eşit önemde kabul edilir (Miettinen, 1999).

4.3.1.2. Priori yöntemler

A-priori yöntemler, KV'nin çözüm arayışına başlamadan önce kendi tercihlerini, önceliklerini ve beklentilerini tanımladığı yaklaşımlardır. Ancak, problemin çözümü tamamlanmadan elde edilecek sonuçların kesin olarak bilinmemesi, bu yöntemin en kritik zorluklarından biridir. Dolayısıyla, başlangıçta belirlenen tercihlerin olabildiğince gerçekçi şekilde oluşturulması gerekir. Bu tipte yer alan yöntemlerden bazıları yarar fonksiyonu yöntemi, ardışık sıralama ve hedef programlama ve hedef gerçekleştirme yöntemlerdir (Miettinen, 1999). Pratikte genellikle KV, çok sayıda amaç fonksiyonunu tek bir maliyet fonksiyonu altında toplar. Böylelikle çok amaçlı fonksiyonu, tek amaçlı bir problem haline getirilir ve çözüm için herhangi bir optimizasyon yöntemiyle çözülür (Lampinen, 2000). Bu kategori içinde öne çıkan yöntemlerden biri yarar fonksiyonu yöntemidir. Bu yaklaşımda KV'nin, tercihlerini yansıtan fonksiyonun matematiksel formunu açık ve eksiksiz biçimde kurması gerekir. Yarar fonksiyonu, amaç uzayında KV'nin tüm olası seçenekleri nasıl sıraladığını gösterir. Bu yöntem, tek amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılarak çözülebilir. Ancak, teoride kolay görünmesine rağmen, fonksiyonun doğru biçimde modellenmesi oldukça güçtür.

4.3.1.3. Etkileşimli yöntemler

Dört temel sınıflandırma içinde en gelişmiş yaklaşım olarak kabul edilen grup interaktif yöntemlerdir. Bu yöntemler, KV'ye bilgisayar destekli bir çözüm süreci sunar ve genellikle daha tatmin edici sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Çözüm arayışı adım adım ilerler; her adımda (iterasyonda) elde edilen sonuç, KV'ye yeni bilgiler kazandırır ve sonraki aşamada yönlendirici bir rol oynar. Böylece süreç, belirli sayıda yineleme sonunda, KV'nin beklentilerini karşılayan bir çözümle sonuçlanır (Miettinen, 1999).

Bu yöntemlerin tipik işleyiş adımları şu şekilde özetlenebilir:

- Başlangıç için kabul edilebilir bir çözüm üretilir.
- KV sürece dahil edilerek değerlendirmeler yapılır.
- Elde edilen geri bildirim doğrultusunda yeni bir çözüm ya da çözüm kümesi oluşturulur.

Eğer üretilen çözüm (ya da mevcut çözüm kümelerinden biri) KV tarafından yeterli bulunursa süreç sonlandırılır. Ancak kabul edilebilir görülmezse, ikinci adıma geri dönülerek arayış devam eder.

Etkileşimli tipinde üç ana durdurma koşulu söz konusudur. En ideal senaryoda, KV aradığı çözüme ulaşır ve süreci bitirir. Başka bir olasılık ise, KV'nin artık daha fazla yineleme yapmak istememesiyle sürecin sona ermesidir. Üçüncü ihtimalde ise, önceden belirlenmiş algoritmik sınırlandırmalar devreye girer. Bu durumda, durdurma koşulu sağlandığında KV'nin çözümü tamamlayıp tamamlamayacağına karar vermesi gerekir (Ehrgott ve Gandibleux, 2002).

Etkileşimli yöntemler; yapısal özellikleri, kullandıkları bilgi türleri ve çok amaçlı problemlerin tek amaçlı forma dönüştürülmesinde yararlandıkları dönüşüm mekanizmaları açısından birbirinden ayrılır.

Bu kapsamda literatürde en çok ele alınan yöntemler arasında Geoffrion-Dyer-Feinberg yöntemi, ardışık vekil (proxy) yöntemi, Tchebycheff yöntemi, adım yöntemi, Light Beam Arama Yöntemi, referans noktası yöntemi ve NIMBUS yöntemi yer almaktadır (Miettinen, 1999).

4.3.1.4. Posteriori yöntemler

Pareto-optimal çözümler üreten posteriori yöntemler, çok amaçlı problemlerde sıkça kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda KV, elde edilen pareto-optimal çözüm kümesi içinden kendi kriterlerine en uygun alternatifi seçer. Burada, amaç fonksiyonlarının sayısı ve matematiksel yapısı çözüm sürecini doğrudan etkiler. Fonksiyon sayısı arttıkça çözüm daha karmaşık hale gelir. Ayrıca, oluşturulan çözüm kümesinin pareto-optimal niteliği, amaç fonksiyonlarının konveks olup olmamasıyla yakından ilişkilidir. A-posteriori yaklaşımlar arasında en bilinen yöntemler;

- Ağırlıklı Toplam Yöntemi
- Epsilon Kısıt Yöntemi

- Ağırlıklı Ölçü Yöntemi
- Ağırlıkların Doğrusal Kombinasyonu
- Normal Sınır Kesişimi

4.3.2. Meta-sezgisel algoritmalar

Çok amaçlı optimizasyon problemleri, birden fazla amaç fonksiyonunun aynı anda optimize edilmesi gereken yapısı nedeniyle, yöneylem araştırmaları ve hesaplamalı zekâ alanlarında karşılaşılan en karmaşık problem türlerinden biridir. Bu tür problemlerde tek bir çözüm yeterli olmayıp, bir amacın iyileştirilmesi genellikle diğer bir amacın bozulmasına yol açtığından, farklı ve çoğu zaman çelişkili amaçlar arasındaki dengeyi temsil eden bir çözüm kümesinin oluşturulması gerekir; söz konusu çözüm kümesi pareto-optimal çözüm kümesi olarak adlandırılır ve bu kümenin amaçlar uzayındaki görselleştirilmiş temsili ise pareto yüzeyi olarak bilinmektedir. Bu yüksek düzeydeki karmaşıklığa yanıt olarak, meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, problemten bağımsız, yüksek seviyede iyileştirme çerçeveleri sunarak, büyük ve karmaşık çözüm alanlarını etkin bir şekilde araştırmak suretiyle optimal veya optimale yakın çözümler elde etmeyi amaçlamaktadır. Kesin çözüm yöntemlerinin aksine, bu algoritmalar tüm çözüm alanını tarayarak veya matematiksel prosedürler uygulayarak kesin optimal çözüm garanti etmez; bunun yerine, mevcut umut verici çözümleri geliştirme ile çözüm alanının yeni bölgelerini keşfetme arasında dengeli bir yaklaşım sunar. Bu süreç, rastgele işlemler, adaptif stratejiler ve yinelemeli iyileştirme teknikleri kullanılarak yürütülür. Özellikle yüksek derecede doğrusal olmayan, çok modlu, kesintili veya analitik gradyan bilgisine sahip olmayan problemler için bu algoritmalar son derece etkilidir ve geleneksel optimizasyon tekniklerinin hesaplama açısından zor veya maliyetli olabileceği durumlarda öne çıkar. Meta-sezgisel algoritmaların tasarımı genellikle biyolojik evrim süreçlerinden, hayvan sürülerinin kolektif davranışlarından veya fiziksel doğa olaylarından esinlenir. Bu algoritmalar mutlak optimal çözüme yakınsama garantisi vermese de sağladıkları esneklik ve ölçeklenebilirlik hem tek amaçlı hem de çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmalarını sağlamıştır. Çok amaçlı optimizasyon bağlamında, bu algoritmalar, onları tek amaçlı durumlardaki kullanımlarından ayıran ek özellikler ve mekanizmalar kazanır. Bunun için, meta-sezgisel algoritmalar çözüm seçimi ve sıralama süreçlerine yönelik çeşitli mekanizmalar geliştirmiştir. Bazı algoritmalar bireyleri üstünlük derecelerine göre seviyelere ayırır ve

bu dominasyon tabanlı sıralama olarak bilinir. Örneğin NSGA-II algoritmasında bu sıralama uygulanır (Deb, 2001). Diğer algoritmalar ise çözüm kümesinin kalitesini ölçmek için gösterge tabanlı yöntemler kullanır; örneğin, mevcut pareto yüzeyinin kapladığı alanı tahmin eden Hiperhacim (HV) göstergesi. Bu mekanizmalar, çözümleri sadece ideal pareto yüzeyine yakınlaştırmakla kalmaz, aynı zamanda çeşitliliği koruma mekanizmaları aracılığıyla yüzeyin tamamına dengeli bir dağılım sağlar. Çeşitliliğin korunması, bu algoritmaların temel unsurlarından biridir. Eğer arama süreci herhangi bir kontrol olmadan yürütülürse, çözümler çözüm yüzeyinin dar bir kısmında yoğunlaşabilir ve yüzeyin diğer önemli bölgelerini temsil edemeyebilir. Bu nedenle, çeşitliliği korumak için farklı teknikler geliştirilmiştir. Örneğin, NSGA-II algoritmasında çözümler arasındaki yakınlığı belirlemek için yoğunluk mesafesi (crowding distance) hesaplanır (Deb, 2001). Ayrıca, özellikle PESA-II gibi algoritmalarda ızgara tabanlı Niching stratejileri veya klasik GA tabanlı MOEA’larda kullanılan uygunluk paylaşımı (fitness sharing) yaklaşımı uygulanabilir (Knowles ve Corne, 2000). Buna karşılık, MOEA/D algoritmasında olduğu gibi çok amaçlı problem, daha basit tek amaçlı alt problemlere bölünerek işlenebilir (Zhang ve Li, 2007). Çoğu meta-sezgisel algoritma arşivleme kavramını kullanır. Arama süreci boyunca, domine edilmeyen çözümlerden oluşan harici bir arşiv tutulur ve bu arşiv, keşfedilen en iyi çözümleri kademeli olarak koruyan kümülatif bir bellek görevi görür. Bu arşiv, popülasyonlar evrimleştikçe veya dağılımlar değiştikçe iyi çözümlerin kaybolmamasını sağlar. Böylelikle, arama sürecinin sonunda elde edilen çözüm yüzeyi, yalnızca anlık bir sonuç yerine, bütünsel bir evrimsel süreci yansıtabilir. Bu alanda başarı sağlamış başlıca meta-sezgisel algoritmalar şunlardır:

- NSGA-II ve NSGA-III: Dominasyon tabanlı sıralama ve gelişmiş çeşitlilik koruma mekanizmalarına sahiptir. Çok amaçlı problemlerde pareto öncül çözümlerini etkin şekilde üretirler Deb ve ark. (2002) (Deb ve Jain, 2013).
- SPEA2: Çözümlerin kalitesini ölçmek için güç kavramını kullanır ve dış bir arşiv ile en iyi çözümleri saklar. (Zitzler ve ark., 2001)
- MOEA/D: Çok amaçlı problemi daha basit alt problemlere dönüştürme prensibine dayanır (Zhang ve Li, 2007).
- MOPSO: Parçacık sürüsü optimizasyonunun çok amaçlı versiyonudur; hızlı keşif ve iyi yakınsama yeteneğine sahiptir (Moore, 1999).
- PAES: Etkili bir evrim stratejisidir; evrimsel mekanizmalar ile pareto arşivleme yöntemini birleştirir (Knowles ve Corne, 2000).

- MOGWO: Doğadaki gri kurtların davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiştir. Bu algoritma, liderlik ve grup halinde avlanma mekanizmalarını kullanarak çözümler arasında gezinir ve çok amaçlı problemler için keşif ile sömürü arasında etkin bir denge sağlar Mirjalili ve ark. (2016).

Bu algoritmalar, mühendislik tasarımından üretim planlamasına ve doğal kaynak yönetimine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde etkinliğini kanıtlamıştır. Önde gelen çok amaçlı meta-sezgisel algoritmaların temel mekanizmalarını ve avantajlarını açık bir şekilde karşılaştırmak amacıyla, bunlar Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı çok amaçlı meta-sezgisel algoritmaların temel mekanizmaları ve özellikleri

Algoritma	Temel mekanizma	Temel özellik
NSGA-II Deb ve ark. (2002) tarafından geliştirilmiş.	Dominasyon tabanlı sıralaması + yoğunluk mesafesi	Pareto yüzeyine yakın iyi yakınsama sağlar ve çözümlerin çeşitliliğini korur.
NSGA-III, (Deb ve Jain, 2013) tarafından geliştirilmiş.	Dominasyon tabanlı sıralaması + Referans noktaları	Özellikle çok amaçlı problemler için tasarlanmıştır.
SPEA2 , (Zitzler ve ark., 2001) tarafından geliştirilmiş.	Güç + Dış arşiv	Yüksek kaliteli çözümleri korur ve keşif ile sömürü arasındaki dengeyi sağlar.
MOEA/D , (Zhang ve Li, 2007) tarafından geliştirilmiş.	Problemi alt tek amaçlı problemlere bölme	Çok sayıda amaç içeren problemleri bölerek etkili bir şekilde çözer.
MOPSO, (Moore, 1999) tarafından geliştirilmiş.	Parçacık sürüşü optimizasyonu + arşiv	Hızlı keşif sağlar ve iyi yakınsama yeteneğine sahiptir.
PAES, (Knowles ve Corne, 2000) tarafından geliştirilmiş.	Tek bireyli evrim stratejisi + arşiv	Basit ve etkili bir mekanizmadır, küçük ve orta ölçekli problemler için uygundur.
MOGWO, Mirjalili ve ark. (2016) tarafından geliştirilmiş.	Liderlik ve avlanma mekanizmaları + Dış arşiv	Keşif ve sömürü arasında etkin denge sağlar ve pareto yüzeyinde çeşitliliği korur.

Çizelge 4.1, her bir algoritmanın kullandığı arama, seçim ve çeşitliliği koruma mekanizmalarının kapsamlı bir özeti olarak değerlendirilebilir. Çizelge, algoritmaların çok amaçlı optimizasyon problemleriyle nasıl farklı şekilde başa çıktığını; pareto yüzeyine yakınsama, çözümlerin çeşitliliğini koruma ve çok sayıda amaçla başa çıkma etkinliği açısından göstermektedir. Böylece, araştırmacı veya karar verici, bu algoritmalar arasındaki temel farkları hızlıca anlayarak, uygulaması için en uygun olanı seçme konusunda referans bir araç elde etmiş olur.

5. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, enerji odaklı üretim çizelgeleme (EOÜÇ) problemine ilişkin literatür kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Öncelikle, açma/kapama stratejisi, hız ölçekleme stratejisi ve off-peak stratejisi gibi çeşitli enerji odaklı üretim çizelgeleme stratejilerine genel bir tanıtım yapılmaktadır. Ardından, EOÜÇ' ile ilgili çalışmalar 2014–2024 yılları arasında kronolojik olarak sunulmakta olup, üretim ortamının özellikleri, amaç fonksiyonları, kullanılan enerji odaklı stratejiler ve uygulanan çözüm yöntemleri açısından değerlendirilmektedir. Son olarak, bu dönemde EOÜÇ literatürüne ilişkin genel bir değerlendirme sunulmaktadır.

5.1. Enerji Odaklı Üretim Çizelgeleme (EOÜÇ) Stratejileri

EOÜÇ kavramı 1990'lı yıllardan itibaren incelenmekte olsa da (Akbar ve Irohara, 2018) ; (Gahm ve ark., 2016); (Gao ve ark., 2020) araştırmalarda ancak son dönemlerde sistematik bir ilgi görmeye başlamıştır. Üretim çizelgeleme ortamlarında enerji tüketimini optimize etmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiş olup, bunlar arasında öne çıkan üç yaklaşım bulunmaktadır: açma/kapama stratejisi, hız ölçekleme stratejisi ve off-peak üretim stratejisi.

Açma/kapama stratejisi, düşük kullanımda olan makinelerin tamamen kapatılıp kapatılmaması ya da boşta bırakılmasının mı daha fazla enerji tasarrufu sağlayacağına odaklanır. Makinelerin âtıl kaldıkları sürelerde kapatılması enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Ancak sık açma-kapama işlemleri, aşınmayı artırabilir ve yeniden başlatma maliyetlerini yükseltebilir. Bu nedenle karar vericilerin, enerji kullanımı ile operasyonel istikrar arasında dengeli ve verimli bir kapatma stratejisi uygulayabilmek için boşta kalma sürelerini dikkatle değerlendirmeleri gerekir.

Hız ölçekleme stratejisi ise, enerji kullanımı ile işleme verimliliği arasında denge kurmak amacıyla makine çalışma hızlarının değiştirilmesini içerir. Yüksek hızlar, işlerin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlarken enerji tüketimini artırır; düşük hızlar ise enerjiyi korur ancak işlem sürelerini uzatır. Uygun hız seviyelerinin dinamik olarak seçilmesi sayesinde karar vericiler, üretim çizelgelemesini operasyonel etkinlikten ödün vermeden enerji maliyetlerini minimize edecek şekilde optimize edebilirler.

Son olarak, Off-peak üretim stratejisi, gün içerisindeki elektrik fiyatlarındaki dalgalanmalar dikkate alınarak çizelgelemenin optimize edilmesine dayanır. Enerji

maliyetleri genellikle yoğun saatlerde belirgin şekilde daha yüksek olduğundan, üretim çizelgelerinin yoğun olmayan dönemlere kaydırılması önemli maliyet tasarrufları sağlayabilir. Üretim faaliyetlerinin stratejik olarak elektrik şebeke talebinin düşük olduğu zamanlara kaydırılması, işletmelerin genel enerji giderlerini azaltmalarına imkân tanırken verimliliğin korunmasına da olanak tanır. Bu yaklaşım yalnızca işletme maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda daha dengeli bir enerji dağılımına katkıda bulunarak hem sanayiye hem de enerji sektörüne fayda sağlar.

Çizelge 5.1, 2013 ile 2024 yılları arasında EOÜÇ konusu üzerinde gerçekleştirilen araştırmaları, üretim ortamının özellikleri, amaç fonksiyonları, kullanılan enerji odaklı stratejiler ve uygulanan çözüm yöntemleri açısından sınıflandırmaktadır. Bu çalışmalar, üretim süreçlerini optimize ederken enerji tüketimini minimize etmeyi amaçlayan farklı yaklaşımları incelemektedir. Bu yaklaşımların incelenmesi sayesinde araştırmacılar ve sektör profesyonellerine sürdürülebilir üretim konusunda daha derinlemesine bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Çizelge 5.1. Çeşitli stratejiler kullanılarak EOÜÇ üzerine yapılan araştırmaların genel görünümü.

Kaynak	Üretim ortamı	Amaç fonksiyonları	Enerji odaklı çizelgeleme strateji			Çözüm yöntemi
			Off-Peak	Hız ölçekleme	Açma / Kapama	
Wang ve ark. (2024)	Esnek atölye tipi	TEC, C_{max}	✓			INSGA-II
Bouzegag ve Kesen (2024)	Atölye tipi	TEC, TT		✓	✓	Epsilon-kısıt yöntemi
Zhong ve ark. (2024)	Permütasyonlu akış tipi	TEC, TFT		✓		MOIGA
Wang ve ark. (2023)	Hibrit/Esnek akış tipi	$TEC, C_{max}, TSTD$		✓		FA, VNS, NSGA-II, IG
Goli ve ark. (2023)	Permütasyonlu akış tipi	TEC, C_{max}		✓		MOALO, MOKA, MOKSEO
He ve ark. (2022)	Açık atölye	TEC, C_{max}, MT		✓		AMODE
Shao ve ark. (2022)	Esnek akış tipi	TEC, TWT		✓		MMMA
Dong ve Ye (2022)	Hibrit/Esnek akış tipi	TEC, C_{max}, TCE			✓	SSA + NSGA III
Lu ve ark. (2022b)	Dağıtılmış akış tipi	TEC, C_{max}			✓	MOHIG
Lu ve ark. (2022a)	Permütasyonlu akış tipi	TEC, C_{max}		✓		CMOA
Xu ve ark. (2022)	Atölye tipi	TEC	✓		✓	Mevcut değil
Füchtenhans ve Glock (2022)	Atölye tipi	TEC, TWT		✓		Bilinmeyen
Gong ve ark. (2021)	Atölye tipi	TEC, C_{max}, NMR			✓	Bilinmeyen
Kurniawan ve ark. (2021)	Atölye tipi	TEC, TWT	✓			NSGAI
Li ve ark. (2021)	Atölye tipi	$TEC, C_{max}, TT, TIT, TWC$		✓		moEA
Wei ve ark. (2021)	Atölye tipi	$NPEC, C_{max}, TWET$			✓	NSGAIII
Wu ve Che (2020)	Akış tipi	TEC, C_{max}		✓		VNS
Abedi ve ark. (2020)	Atölye tipi	TEC, TWT		✓		MA, PLS
Luo ve ark. (2020)	Atölye tipi	TEC, TT, RD		✓		GA
Jiang ve ark. (2020)	Dağıtılmış atölye tipi	TEC, C_{max}		✓		moEA
Geng ve ark. (2019)	Hibrit akış tipi	$C_{max}, T_{max}, SEC_{min}$			✓	IMOMVO
Jiang ve ark. (2019)	Atölye tipi	ECC, PC		✓		WOA
Chen ve ark. (2019)	Dağıtılmış akış tipi	TEC, C_{max}		✓		COA
Luo ve ark. (2019)	Esnek atölye tipi	TEC, C_{max}		✓		MOGWO
Jiang ve ark. (2018)	Atölye tipi	ECC, C_{max}		✓		İyileştirilmiş WOA
Lee ve ark. (2017)	Tek makine	ECC, ETP			✓	DIATC Sezgisel
Yin ve ark. (2017)	Atölye tipi	TEC, C_{max}, NE		✓		GA
Che ve ark. (2017a)	Tek makine	TEC, C_{max}		✓		Epsilon-kısıt yöntemi
Giglio ve ark. (2017)	Atölye tipi	EC, PC		✓		moGA, ILS

Ding ve ark. (2016)	Permütasyonlu akış tipi	C_{max}, TCE		✓		NEH, IG
Escamilla ve ark. (2016)	Atölye tipi	TEC, C_{max}		✓		GA
Zhang ve Chiong (2016)	Atölye tipi	TEC, TWT		✓		moGA, ILS
Tang ve Dai (2015)	Atölye tipi	TEC, C_{max}		✓		GA, SA
May ve ark. (2015)	Atölye tipi	TEC, C_{max}			✓	moGA; SPEAII
Liang ve ark. (2015)	İlişkisiz paralel makineli	TEC, TT			✓	AOA
Liu ve ark. (2014)	Atölye tipi	TEC, TWT	✓			NSGA
Fang ve Lin (2013)	Paralel makineli	TEC, TTP		✓		PSO
Bizim çalışma	Atölye tipi	TEC, TT		✓	✓	Augmecon, NSGA II, MOGWO

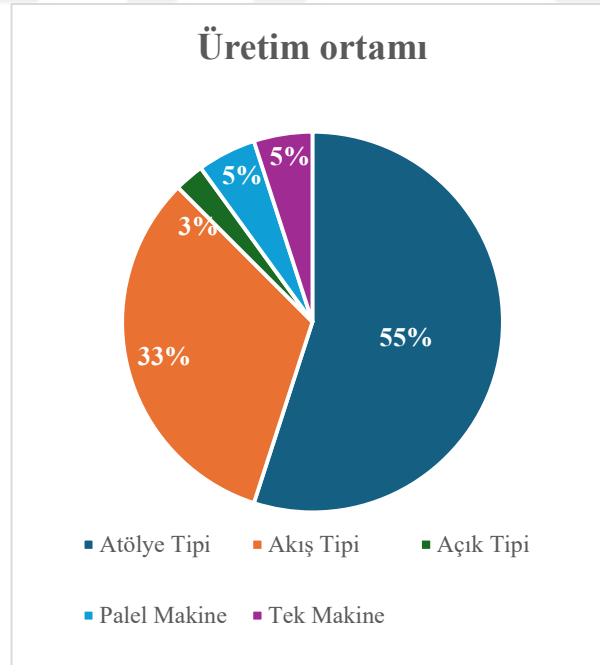
TEC: Toplam Enerji Tüketimi (Total Energy Consumption), **INSGA-II:** İyileştirilmiş Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma III (Improved Non-Dominated Genetic Algorithm III), **TFT:** Toplam Akış Süresi (Total Flow Time), **MOIGA:** Çok Amaçlı Yinelemeli Açgözlü Algoritma (Multi-Objective Iterated Greedy Algorithm), **TTSD:** Toplam Başlangıç Zamanı Sapması (Total Starting Time Deviation), **FA:** Ateşböceği Algoritması (Firefly Algorithm), **VNS:** Değişken Komşuluk Araması (Variable Neighborhood Search), **NSGA-II:** Domine Edilmeyen Sıralama Genetik Algoritma II (Improved Non-Dominated Genetic Algorithm II), **IG:** İyileştirilmiş Genetik Algoritma (Improved Genetic Algorithm), **MOALO:** Çok Amaçlı Karınca Aslanı Optimizasyon Algoritması (Multi-Objective Ant Lion Optimization Algorithm), **MOKA:** Çok Amaçlı Keshtel Algoritması (Multi-Objective Keshtel Algorithm), **MOKSEO:** Çok Amaçlı Keshtel ve Sosyal Mühendislik Optimizatörü (Multi-Objective Keshtel and Social Engineering Optimizer), **MT:** Ortalama Gecikme (Mean Tardiness), **AMODE:** Uyarlanabilir Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim Algoritması (Adaptive Multi-Objective Differential Evolution Algorithm), **TWT:** Toplam Ağırlıklı Gecikme Süresi (Total Weighted Tardiness), **MMMA:** Çok Mahalli Tabanlı Çok Amaçlı Memetik Algoritma (Multi Neighborhood Based Multi-Objective Memetic Algorithm), **TCE:** Toplam Karbon Emisyonu (Total Carbon Emission), **SSA:** Salp Sürüsü Algoritması (Salp Swarm Algorithm), **MOHIG:** Çok Amaçlı Yinelemeli Açgözlü Algoritma (Multi-Objective Iterated Greedy Algorithm), **TNMR:** Toplam Makine Yeniden Başlatma Sayısı (Total Number of Machine Restarts), **TT:** (Toplam Gecikme Süresi) Total Tardiness, **TIT:** Toplam Boşta Kalma Süresi (Total Idle Time), **TWC:** Toplam İşçi Maliyeti (Total Worker Cost), **moEA:** (Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma) multi-objective evolutionary algorithm, **NPEC:** İşlem Dışı Enerji Tüketimi (Non-Processing Energy Consumption), **TWTE:** Toplam Ağırlıklı Gecikme ve Erken Tamamlama (Total Weighted Tardiness and Earliness), **CMOA:** İşbirlikçi Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritması (Collaborative Multi-Objective Optimization Algorithm), **MA:** Memetik Algoritma (Memetic Algorithm), **PLS:** Periyodik Yerel Arama (Periodic local search), **SEC_{min}:** Boşta Enerji Tüketimi (Idle Energy Consumption), **IMOMVO:** Çok Amaçlı Çok Evren Optimize Edici Algoritma (Multi-Objective Multi-Verses Optimizer Algorithm), **ECC:** Enerji Tüketim Maliyeti (Energy Consumption Cost), **WOA:** Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm), **MOGWO:** Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Multi-Objective Grey Wolf Optimization Algorithm), **ETP:** Erken Tamamlama ve Gecikme Cezası (Earliness and Tardiness Penalty), **NE:** Gürültü Emisyonu (Noise Emission), **GA:** Genetik Algoritma (Genetic Algorithm), **SA:** Benzetimli Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm), **AOA:** Karınca Optimizasyon Algoritması (Ant Optimization Algorithm), **TTP:** Toplam Gecikme Cezası (Total Tardiness Penalty), **PSO:** Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

5.2. EOÜÇ Literatürünün Genel Değerlendirilmesi

Çizelge 5.1’de gösterildiği üzere, EOÜÇ ‘deki problem modellerini ve çözüm yöntemlerini ayırt eden birkaç temel unsur bulunmaktadır. Bunlar arasında, üretim ortamı, iyileştirmeyi yönlendiren amaç fonksiyonları ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla uygulanan enerji odaklı stratejileridir. Bu unsurların açık bir şekilde anlaşılması, incelenen problemin doğru tanımlanmasına ve ona uygun çizelgeleme yöntemlerinin seçilmesine yardımcı olmaktadır.

- **Üretim ortamı:** Atölye tipi ve esnek atölye tipi çizelgeleme çalışmaların en büyük kısmını oluşturmaktadır (%55 civarında, Bkz. Şekil 5.1). Bunu akış tipi çizelgeleme yaklaşık %32,5 ile takip etmektedir. Açık atölye çizelgelemesi ise yalnızca %2,5 ile en az incelenen alandır. Tek makine ve paralel makine çizelgelemesi ise toplamda %10 civarında yer tutmaktadır.

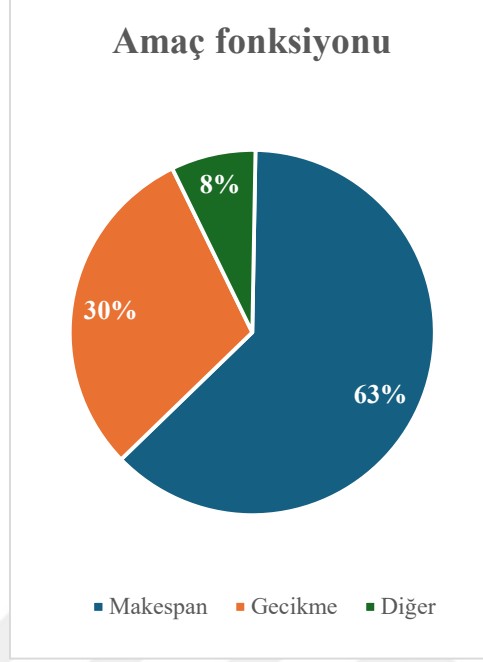
► Bu dağılım, araştırmacıların daha karmaşık ve değişken ortamlara (Atölye tipi ve esnek atölye tipi) yoğunlaştığını göstermektedir. Bunun nedeni bu ortamların gerçek endüstriyel sistemleri daha iyi yansıtabilmesidir. Daha basit ortamlar (örneğin tek makine) ise endüstrideki büyük boyutlu problemlere sınırlı katkı sundukları için daha az öncelik taşımaktadır.



Şekil 5.1. Üretim ortamına göre EOÜÇ üzerine yapılan çalışmaların dağılımı

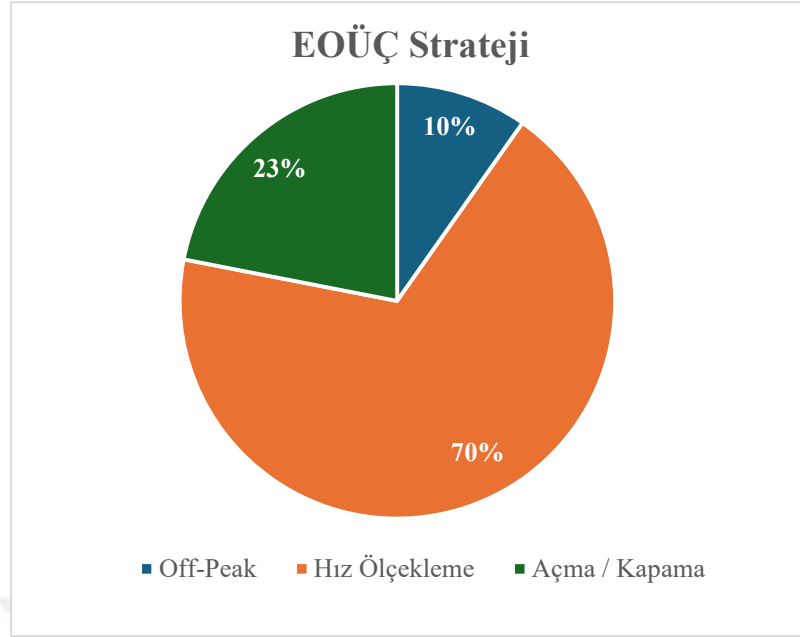
- **Amaç fonksiyonları:** Enerji tüketimiyle birlikte maksimum tamamlanma süresi (makespan) minimizasyonu kriteri çalışmaların çoğunda odak noktası olmuştur (%56, Bkz. Şekil 5.2). Çalışmaların %35'i ise enerji kriterine ek olarak gecikmeyi de dikkate

almıştır. Geriye kalan yaklaşık %5’lik bölümde ise enerjiyle birlikte farklı amaçlar ele alınmıştır.



Şekil 5.2. Amaç fonksiyonlarına göre EOÜÇ üzerine yapılan çalışmaların dağılımı

- Bu durum, enerji tüketimiyle birlikte hem makespan süresinin hem de gecikme süresinin endüstriyel gerekliliklerle en yakından ilişkili kriterler olduğunu göstermektedir. Enerji tüketimi sürdürülebilirlik açısından temel bir unsur olsa da bunun teslim süreleriyle dengelenmesi müşteri memnuniyetini sağlamak ve operasyonel verimlilik ile pazar beklentileri arasında denge kurmak için öncelikli bir gerekliliktir.
- **Enerji odaklı çizelgeleme stratejileri:** Çalışmaların çoğunda yalnızca tek bir strateji uygulanmıştır. Bunlardan hız ölçekleme stratejisi en yaygın kullanılanıdır (%67, Bkz. Şekil 5.3). Açma/kapama stratejisi %22 ile ikinci sırada yer alırken, Off-Peak stratejisi %10 ile en az çalışılan alandır.



Şekil 5.3. EOÜÇ üzerine yapılan çalışmaların enerji odaklı stratejilerine göre dağılımı

► Bu sonuçlar, hız ölçekleme stratejisinin esnekliği ve modern üretim sistemlerine kolayca entegre edilebilmesi sayesinde öncelikli tercih edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, off-peak üretim stratejisine yönelik sınırlı araştırmalar, özellikle yenilenebilir enerji ve akıllı şebekelere artan ilgi göz önüne alındığında, önemli bir araştırma boşluğunu işaret etmektedir.

Dolayısıyla, bu çalışma, diğer araştırmalardan birkaç temel noktada farklılaşmaktadır. Önceki çalışmalardan farklı olarak, burada aynı anda açma/kapama stratejisi ve hız ölçekleme stratejisini birleştiren bütünlük yeni bir yaklaşım önermektedir. Ayrıca, çalışmada iki çelişen optimizasyon amacı ele alınmaktadır: toplam enerji tüketiminin minimize edilmesi ve toplam gecikmenin minimize edilmesi.

Mevcut literatüre göre, enerji odaklı birden fazla stratejiyi aynı anda iki amaçlı klasik atölye tipi çizelgeleme ortamında inceleyen ilk çalışma olma özelliğini taşımakta olup, bu alana özgün ve değerli bir katkı sunmaktadır.

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇOK AMAÇLI ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME (SÇA-ATÇ) PROBLEMİ

Üretim çizelgeleme problemleri, üretim maliyeti, üretim verimliliği ve müşteri memnuniyeti üzerindeki doğrudan etkileri nedeniyle endüstri yönetiminde merkezi bir öneme sahiptir. Özellikle atölye tipi çizelgeleme problemi, çok sayıda işlemin farklı makinelerde belirli bir sırayla koordinasyonunu gerektirdiğinden son derece zordur ve karmaşık çizelgeleme stratejilerini incelemek için tipik bir ortam sunar.

Önceki bölümde, enerji odaklı üretim çizelgeleme literatürü incelendiğinde, çalışmaların çoğunluğunun karmaşık ortamlar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir; bunlar arasında klasik atölye tipi ve esnek atölye tipi çizelgeleme problemi öne çıkmakta, ardından da akış tipi çizelgeleme ortamlarının geldiği görülmektedir. Bu durum, araştırmacıların daha karmaşık ve çeşitli ortamları tercih ettiğini, çünkü bunların gerçek endüstri sistemlerini daha iyi yansıttığını ve enerji stratejilerinin zorlu senaryolarda test edilmesine imkân verdiğini göstermektedir. Daha basit ortamlar (tek makine, paralel makineler veya açık atölye) ise daha sınırlı bir ilgi görmüştür; bunun nedeni, geniş ölçekli endüstriyel uygulamalar açısından katkılarının sınırlı olmasıdır.

Literatürde, çevresel ve ekonomik boyutları (enerji tüketiminin azaltılması) operasyonel amaçlarla birleştiren çalışmalar önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da sürdürülebilirliğin tüm boyutları hâlâ tam olarak ele alınmamıştır. Çoğu çalışma, enerji ile geleneksel operasyonel kriterler arasındaki ödünleşmelere odaklanmış, sosyal amaçlar (örn. gecikmelerin azaltılması, müşteri memnuniyeti) yeterince kapsamlı biçimde incelenmemiştir.

Ayrıca, literatürdeki enerji stratejileri çoğunlukla tek bir yöntemle sınırlı kalmıştır; ya dur-kalk stratejisi ya da hız genişletme stratejisi uygulanmış, her iki yaklaşımın entegre edildiği bir çerçeve mevcut değildir. Bu durum, enerji kullanım verimliliğini artırma potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır.

Bu çalışma, sürdürülebilir çok amaçlı atölye tipi çizelgeleme (SÇA-ATÇ) adı verilen bir versiyonu ele almakta ve önceki çalışmalardan iki temel yönden ayrılmaktadır:

- İki eşzamanlı enerji-odaklı stratejisinin entegrasyonu: açma/kapama ve hız ölçekleme stratejileri, daha gerçekçi ve uygulanabilir bir senaryo sunacak şekilde tek bir çerçevede birleştirilmiştir.
- Çok amaçlı formülasyonun doğrudan TBL çerçevesiyle ilişkilendirilmiştir:

- ✓ **Çevresel-ekonomik boyut:** Toplam enerji tüketiminin minimize edilmesi, emisyonların ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.
- ✓ **Sosyal boyut:** Toplam gecikmenin minimize edilmesi, üretim sisteminin teslim sürelerine bağlı kalmasını ve müşteri memnuniyetini yansıtmalarını sağlamaktadır.

Bu çelişkili amaçların tek bir modelde ele alınması, geleneksel çizelgeleme problemini zenginleştirmekte ve onu daha gerçekçi bir bağlama taşımaktadır. Böylece operasyonel verimlilik, çevresel koruma ve toplumsal gereklilikler bir araya gelir. Bu yaklaşım, problemi sadece klasik üretim çizelgelemenin bir uzantısı olmaktan çıkarıp, bütünselik sürdürülebilir çok amaçlı üretim çizelgeleme örneği hâline getirmektedir.

Bundan hareketle, bu bölüm öncelikle incelenen SÇA-ATÇ probleminin temel özelliklerini ve karmaşıklığını daha iyi kavrayabilmek için küçük boyutlu bir sayısal örnek sunmaktadır. Ardından, problemin yapısı ve kısıtları ayrıntılı olarak tanımlanmakta ve karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli ile matematiksel olarak formüle edilmektedir. Son olarak, önerilen çözüm yaklaşımları ele alınmakta ve bu yaklaşımlar arasında arttırılmış epsilon-kısıt yöntemi (AEKY, Augmecon), domine edilmeyen sıralama genetik algoritma-II (NSGA-II) ve çok amaçlı gri kurt optimizasyon algoritması (MOGWO) yer almaktadır.

6.1. SÇA-ATÇ Probleminin Tanımı

İlk olarak, bu bölümde problemin temel yönlerini açıklığa kavuşturmak ve karmaşıklığını daha iyi anlamak amacıyla küçük boyutlu sayısal bir örneğe yer verilmiştir. Ardından, problemin yapısını ve kısıtlarını ortaya koymak için kesin bir biçimsel tanım sunulmuştur. Son olarak, optimizasyon çerçevesini kapsamlı bir şekilde ifade eden matematiksel bir model ortaya konulmuştur.

6.1.1. SÇA-ATÇ problemi için açıklayıcı sayısal bir örnek

Problemin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla, bu bölümde bir atölye tipi çizelgeleme ortamında küçük boyutlu bir sayısal örnek sunulmaktadır. Senaryo, üç farklı hız seviyesinde (Düşük, Orta ve Yüksek) çalışabilen üç makine üzerinde işlenen dört işi kapsamaktadır. Her iş, üç ardışık operasyondan oluşmaktadır. Çizelge 6.1, atölye tipi

ortamında çalışan makinelerin farklı hız seviyelerindeki yeteneklerini detaylandırarak spesifik parametrelerini göstermektedir. Çizelge 6.2 ise, her bir işin atandığı makineler, gereken işlem süreleri ve tanımlanmış teslim tarihleri gibi temel parametreleri içeren bilgileri sunmaktadır.

Çizelge 6.1. Makineler ile ilgili parametreler.

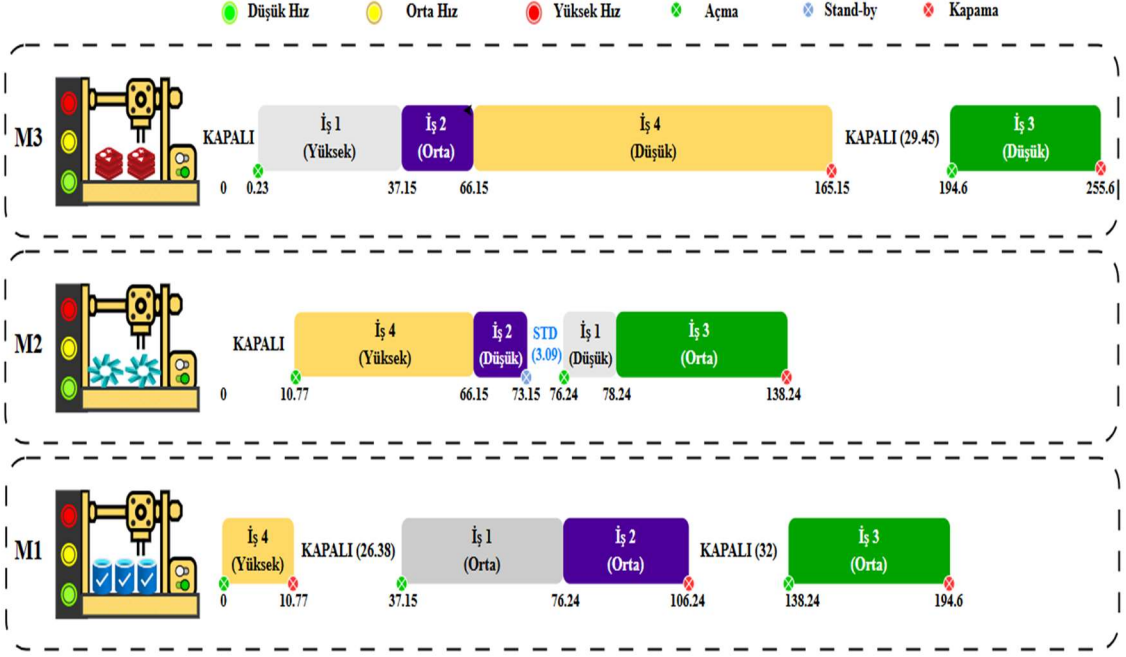
Hız Seviyesi	Anlık İşleme Gücü (kW/zaman birimi)			Bekleme (kW/zaman birimi)	MB Değeri
	Düşük	Orta	Yüksek		
Makinalar					
M1	6	8	13	3	7
M2	4	5	9	2	10
M3	8	11	18	4	8

Çizelge 6.2. İşler ile ilgili parametreler.

İşler	Teslim Tarihi	İşlerin Makinelere ziyaret sırası	İşleme Fiili Süresi (Hız Seviyesi / Makina)								
			Düşük			Orta			Yüksek		
			M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
J1	101	M3→M1→M2	43	2	48	39,09	1,82	43,64	33,08	1,54	36,92
J2	66	M3→M2→M1	33	7	29	30	6,36	26,36	25,38	5,38	22,31
J3	182	M2→M1→M3	62	66	61	56,36	60	55,45	47,69	50,77	46,92
J4	145	M1→M2→M3	14	72	99	12,73	65,45	90	10,77	55,38	76,15

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de sunulan veriler, çizelgeleme sürecindeki temel bir ödünleşimi ortaya koymaktadır: Makine hızı arttıkça enerji tüketimi yükselmekte, ancak işlem süresi kısalarak işlerin daha hızlı tamamlanmasına olanak sağlanmaktadır. Buna karşılık, makinelerin daha düşük hızlarda çalıştırılması enerji tüketimini azaltmakta, ancak işlem sürelerini uzaması nedeniyle işlerin tamamlanma sürelerinin uzamasına ve birtakım işlerin teslim tarihlerinden sonra tamamlanmasına (gecikmesine) neden olabilmektedir. Enerji tüketimini en aza indirme ile gecikmeleri azaltma arasındaki bu çelişki, bu çalışmanın ele aldığı temel zorluğu oluşturmaktadır.

Sunulan verilere dayanarak, Şekil 6.1 bu küçük boyutlu sayısal örneğin çizelgeleme yapısını görsel olarak göstermek amacıyla işlerin zaman içerisindeki yürütümünü ortaya koyan bir gantt şeması sunmaktadır. Bu şema, işlerin zaman içerisindeki yürütülme sırasını, makine atamalarını, farklı hız seviyelerine göre işlem sürelerini açık bir şekilde göstermekte ve ayrıca işlem hızı, enerji tüketimi, boşta kalma sürelerinin yönetimi ile iş tamamlama zaman çizelgeleri arasındaki etkileşimi vurgulamaktadır.



Şekil 6.1. Bir çizelgeleme şemasını gösteren gantt şeması.

Makine 1’de işler (4-1-2-3) sırasıyla ve hız seviyeleri (3-2-2-2) olacak şekilde işlenmektedir. Makine 2, işleri (4-2-1-3) sırasıyla ve hızlar (3-1-1-2) olacak şekilde işlerken, Makine 3 işleri (1-2-4-3) sırasıyla ve hız ayarları (3-2-1-1) ile çalıştırmaktadır.

Makine boşa kalma süreleri açısından iki farklı durum gözlemlenmektedir: Açma/Kapama modu ve bekleme modu. Makine 3’te, (4 ve 3) operasyonları arasında 29,45 zaman birimi süren bir boşa kalma süresi oluşmakta ve bu süre, makinenin 8 zaman birimi olan eşik değerini aştığı için makine kapatılmaktadır. Benzer şekilde, Makine 1’de (4 ve 1) ile (2 ve 3) operasyonları arasındaki boşa kalma süreleri de eşik değeri aşmakta ve bu nedenle makine kapatılmaktadır. Buna karşılık, Makine 2’de (2 ve 1) operasyonları arasında 3,09 zaman birimi süren boşa kalma süresi meydana gelmekte ve bu süre makinenin 10 zaman birimi olan eşik değerinin altında olduğundan makine bekleme modunda kalmaktadır. Son olarak, bu örnek uygulamada optimize edilen amaçlara ilişkin sonuçlar Çizelge 6.3 ve 6.4’te ayrıntılı olarak verilmektedir.

Çizelge 6.3. Toplam enerji tüketimi için elde edilen sonuçlar.

	M1	M2	M3	TEC (kw)
J1	$39,09 \times 8 = 312,72$	$2 \times 4 = 8$	$36,92 \times 18 = 664,56$	985,28
J2	$30 \times 8 = 240$	$7 \times 4 = 28$	$29 \times 8 = 232$	500
J3	$56,36 \times 8 = 450,88$	$60 \times 5 = 300$	$61 \times 8 = 488$	1238,88
J4	$10,77 \times 13 = 140,01$	$55,8 \times 9 = 498,42$	$99 \times 8 = 792$	1430,43
STB	-	$3,09 \times 2 = 6,18$	-	6,18
TET (kW)	1143,61	840,6	2176,56	4160,77

Çizelge 6.4. Toplam gecikme için elde edilen sonuçlar.

İşler	Tamamlama Zamanı (zaman birimi)	Teslim Tarihi (zaman birimi)	Gecikme (zaman birimi)
J1	78,24	101	-
J2	106,24	66	$106.24 - 66 = + 40,24$
J3	255,6	182	$255.6 - 182 = + 73,6$
J4	165,15	145	$165.15 - 145 = + 20,15$
Toplam Gecikme (zaman birimi)			133,99

6.1.2. SÇA-ATÇ probleminin formal tanımı

Bu bölümde ele alınan SÇA-ATÇ problemi, her biri farklı hız seviyelerinde çalışabilen m makineye n işin atanmasını içermekte olup, enerji tüketimini ve toplam gecikmeyi optimize etme amacını taşımaktadır. Her iş, belirli makinelerde katı bir şekilde önceden tanımlanmış bir sırayı izleyerek işlenmesi gereken m operasyondan oluşmaktadır. Her bir k makinesi, h ($h = 1, \dots, h_k$) ile gösterilen farklı hız seviyelerinde çalışabilmekte olup, seçilen hız seviyesi operasyon tamamlanana kadar değişmeden kalmakta ve doğrudan hem işlem süresini hem de enerji tüketimini etkilemektedir. Başka bir deyişle, eğer iş i 'nin herhangi bir operasyonu makine k üzerinde işleniyorsa, işlem hızı h ($h = 1, \dots, h_k$) kümesinden seçilir ve işlem tamamlanana kadar değiştirilemez. Buna göre, iş i yi işlemek üzere makine k 'nin hızı h olarak ayarlandığında, fiili işlem süresi şu şekilde hesaplanır: $AT_{ikh} = AT_{ik} / v_h$

Burada AT_{ik} , iş i 'nin makine k üzerindeki fiili işlem süresini, AT_{ik} standart hız seviyesinde kabul edilen temel işlem süresini, v_h ise makine k 'nin seçilen hız seviyesini ifade etmektedir.

Gerçekçi ve pratik bir varsayım olarak, bir operasyon belirli bir makinede daha yüksek bir hız seviyesinde işlendiğinde, ilgili operasyonu tamamlamak için gereken süre azalmakta, ancak operasyonu tamamlamak için gerekli enerji artmaktadır.

Ayrıca, boşta kalma süresi boyunca makine, bir sonraki operasyonların gelmesini bekler. Burada, makine için iki olası mod dikkate alınmaktadır.

- **Açma/Kapama Modu:** Eğer boşta kalma süresi önceden tanımlanmış eşik değer MB 'yi aşarsa, enerji tüketimini durdurmak için makine tamamen kapatılır. Bir sonraki planlanan operasyon başlamadan hemen önce makine tekrar açılır.
- **Bekleme Modu:** Eğer boşta kalma süresi MB eşik değerinin altında kalırsa, makine tamamen kapatılmak yerine düşük seviyede bekleme enerjisi tüketerek bekleme modunda kalır.

Sonunda, tüm atanan operasyonlar tamamlandıktan sonra, gereksiz enerji kullanımını önlemek için makine kapatılmaktadır.

Ek olarak, gerçekçi çizelgeleme koşullarını sağlamak için aşağıdaki kısıtlamalar uygulanmaktadır:

- Her iş, sıkı bir sıralı düzende işlenmesi gereken birden fazla operasyondan oluşmaktadır.
- Bir operasyon, kendisinden önceki operasyon tamamlanmadan başlayamaz. Yani, aynı anda birden fazla makinede aynı işin farklı operasyonları yapılamaz.
- Her makine aynı anda yalnızca bir operasyon işleyebilir ve aynı anda birden fazla iş arasında paylaşılabilir.
- Bir operasyon işlenmeye başladıktan sonra, tamamlanana kadar kesintiye uğratılamaz veya başka bir makineye atanamaz.
- Her makine kendisine atanan ilk operasyona başlamadan önce kapalı (OFF) durumdadır.
- Her i işi için teslim süresi dd_i önceden bilinmektedir.
- Beklenmedik makine arızaları veya kesintilerin olmadığı, istikrarlı bir üretim ortamı varsayılmaktadır.

6.1.3. İncelenen SÇA-ATÇ probleminin avantajları ve ilişkili zorluklar

İncelenen sürdürülebilir çok amaçlı atölye tipi çizelgeleme (SÇA-ATÇ) problemi karmaşık bir üretim ortamında enerji, operasyonel verimlilik ve sosyal boyutlar dikkate alınarak bütüncül bir yaklaşım geliştirilmesine yönelik önemli bir adım teşkil etmektedir. Bu çerçeve yalnızca teknik bir çözüm sunmakla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda araştırmacılara ve üreticilere makine işletim politikalarını optimal şekilde belirleme olanağı sağlamaktadır. Bununla birlikte, problem doğası gereği bazı temel zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Dolayısıyla, bu bölüm, problemin hem pratik avantajlarını hem de uygulama sürecinde araştırmacıların karşılaşılabileceği zorlukları tartışmak için bir platform sunmakta olup, problemin sürdürülebilir üretim bağlamındaki araştırma ve uygulama değerine dair bütüncül bir anlayış kazandırmaktadır.

6.1.3.1. İncelenen SÇA-ATÇ probleminin avantajları

İncelenen SÇA-ATÇ probleminin pratik ve bilimsel avantajları şu şekilde özetlenebilmektedir:

- **Makinelerin aşırı açma ve kapama işlemlerinin azaltılması:** Çözüm yaklaşımlarına entegre edilen açma/kapama stratejisi, kısa ve uzun süreli boşa kalma dönemlerini hassas şekilde ayırt etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, makinelerin gereksiz yere tekrar tekrar çalıştırılması veya durdurulmasının önüne geçmekte, mekanik aşınmayı azaltmakta ve arıza olasılıklarını minimize etmektedir. Pratik açıdan, bu durum ekipman güvenilirliğini artırmakta ve işletme ömrünü uzatmakta olup, önemli bir ekonomik ve endüstriyel kazanç sağlamaktadır.
- **Bekleme modu enerji tüketiminin azaltılması:** Geleneksel endüstriyel ortamlarda enerji israfının temel unsurlarından biri, makinelerin uzun süre bekleme modunda tutulmasıdır. İncelenen problem, kısa boşa kalma süreleri (makinenin düşük enerji tüketimli bekleme modunda tutulduğu durumlar) ile uzun boşa kalma süreleri (makinenin tamamen kapatıldığı durumlar) arasında ayrım yapan kısıtlar ve denklemler sunulmaktadır. Bu ayrım, üretken olmayan enerji tüketimini azaltmakta ve elektrik tüketiminin gerçek üretim faaliyetlerine daha yakın olmasını sağlamaktadır.
- **Hızı değiştirilebilir makinelerin kullanımıyla enerji tasarrufu:** Bu problem, işlem süresini azaltma ile enerji tüketimini dengeleyecek şekilde işletme seviyelerinin ayarlanmasına olanak tanımaktadır. Makine hızlarının çeşitliliği, üretim gereksinimleri ve zaman kısıtlamaları ile çizelgelemeyi uyarlamada yüksek bir esneklik sunmakta; böylece atölye genelinde toplam enerji tüketimini azaltmakta ve operatörlere enerji verimliliği ile teslim süresi arasındaki dengeyi kontrol etme olanağı sağlamaktadır.

6.1.3.2. İncelenen SÇA-ATÇ problemi ile ilişkili zorluklar

Problemin sunduğu avantajlara rağmen, dikkate alınması gereken bazı temel zorluklar bulunmaktadır:

- **Amaçlar arasındaki çelişki:** Bu tür çok amaçlı problemlerde, enerji verimliliği kriterleri ile teslim sürelerine uyum gereklilikleri arasında açık bir çelişki ortaya çıkmaktadır. İşlem hızının artırılması, işleme süresini kısaltmakta ve teslim tarihlerine uyumu kolaylaştırmakta ancak enerji tüketimini artırmaktadır. Buna karşılık, hızı azaltmak enerji tüketimini düşürmekte ancak işlem süresini uzatarak gecikme olasılığını artırmaktadır. Bu yapısal gerilim, fabrikanın stratejik önceliklerine (çevresel, ekonomik veya sosyal) göre en uygun dengeyi seçebilmesi için pareto ölçümlerinin kullanımı gibi uzlaşmalar aramak için gelişmiş mekanizmalara ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.
- **Çözüm uzayının genişliği:** Geleneksel şekliyle bile, atölye tipi çizelgeleme problemi her makine için operasyon sıralamalarına ilişkin kararların karmaşıklığı nedeniyle en zor çizelgeleme problemleri arasında (NP-hard) yer almaktadır. Her operasyon için uygun hız seviyesinin seçilmesi boyutu eklendiğinde, çözüm uzayı önemli ölçüde genişlemekte ve daha karmaşık hale gelmektedir. Çözüm, aynı anda (a) her makine için operasyon sıralamalarını ve (b) her operasyon için uygun hız seviyesini belirlemeyi gerektirmektedir. Bu kararlar, geleneksel çizelgelemeye kıyasla çözüm uzayını katlamakta ve saf analitik yöntemlerin büyük boyutlu durumlarda uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Dolayısıyla, bu geniş çözüm uzayını etkin şekilde tarayabilecek güçlü meta-sezgisel algoritmalar geliştirme ihtiyacı doğmaktadır; böylece hesaplama kalitesi ile çözüm süresi arasında optimal bir denge sağlanabilmektedir.

6.1.4. SÇA-ATÇ problemi için önerilen KTDP modeli

Bu altbölümde, incelenen SÇA-ATÇ problemini formüle etmek için Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli sunulmaktadır. Matematiksel formülasyonu tanıtmadan önce, kullanılan notasyonlar, parametreler ve değişkenler aşağıdaki Çizelge 6.5 de gösterilmiştir:

Çizelge 6.5. Önerilen çok amaçlı KTDP modeli modelinde kullanılan notasyonlar

Notasyon	Açıklama
İndisler	
i, l	: iş indeksi, $i, l = 1, 2, 3, \dots, n$.
k, q	: makine indeksi, $k, q = 1, 2, 3, \dots, m$.
k'_i	: i işinin son operasyonun yapılacağı makine indeksi
h	: Makine hız seviyesi indeksi, $h = 1, \dots, H_k$

Parametreler

P_{kh}	: k makinesinin h hızı için anlık gücü.
SM_k	: k makinesinin bekleme modundaki anlık gücü.
MB_k	: k makinesinin kapalı (<i>OFF</i>) moduna geçmeden bekleme modunda kalabileceği maksimum süre.
AT_{ikh}	: i işinin k makinesi üzerinde h hız seviyesinde işlenmesi için gereken gerçek süre
dd_i	: i işinin teslim süresi.
M	: Büyük sayı
ε	: Küçük sayı
Karar değişkenleri	
X_{ikh}	: 1 eğer i işi k makinesinde h hızıyla işlenirse, aksi durumda 0.
Z_{ilk}	: 1 eğer k makinesinde i işi l işinden hemen önce işlenirse, aksi durumda 0.
Y_{ilk}	: 1 eğer k makinesinde ardışık işlenen i ile l işlerinin arasında OFF/ON uygulanırsa, aksi durumda 0.
S_{ik}	: k makinesinde i işinin başlama zamanı.
$IdleTime_{ilk}$	: k makinesinde ardışık işlenen i ile l işlerinin arasındaki boşta kalma süredir.
$StandbyTime_{ilk}$	: k makinesinde ardışık işlenen i ile l işleri arasındaki boşta kalma periyotta bekleme modunda geçen süredir.
T_i	: i işinin gecikme süresi.

Amaç fonksiyonları

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} P_{kh} AT_{ikh} + \sum_{k=1}^m SM_k \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n StandbyTime_{ilk} \quad (6.1)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i=1}^n T_i \quad (6.2)$$

s.t.

$$\sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} = 1 \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (6.3)$$

$$S_{iq} - S_{ik} - \sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} AT_{ikh} \geq 0 \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m; \\ (i, k) \rightarrow (i, q) \end{matrix} \quad (6.4)$$

$$S_{lk} - S_{ik} - \sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} AT_{ikh} + M(1 - Z_{ilk}) \geq 0 \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n Z_{ilk} = n - 1 \quad k = 1, \dots, m \quad (6.6)$$

$$\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n Z_{ilk} \leq 1 \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (6.7)$$

$$\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n Z_{lik} \leq 1 \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (6.8)$$

$$IdleTime_{ilk} \leq S_{lk} - S_{ik} - \sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} AT_{ikh} + M(1 - Z_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.9)$$

$$IdleTime_{ilk} \geq S_{lk} - S_{ik} - \sum_{h=1}^{H_k} X_{ikh} AT_{ikh} - M(1 - Z_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.10)$$

$$IdleTime_{ilk} \leq M(Z_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.11)$$

$$IdleTime_{ilk} \leq MB_k - \varepsilon + M(Y_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.12)$$

$$IdleTime_{ilk} \geq MB_k - M(1 - Y_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.13)$$

$$StandbyTime_{ilk} \leq IdleTime_{ilk} + M(Y_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.14)$$

$$StandbyTime_{ilk} \geq IdleTime_{ilk} - M(Y_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.15)$$

$$StandbyTime_{ilk} \leq M(1 - Y_{ilk}) \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; i \neq l; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.16)$$

$$T_i \geq S_{ik'_i} + \sum_{h=1}^{H_{k'_i}} X_{ik'_ih} AT_{ik'_ih} - dd_i \quad i = 1, \dots, n \quad (6.17)$$

$$S_{ik}, IdleTime_{ilk}, StandbyTime_{ilk}, T_i \geq 0 \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (6.18)$$

$$X_{ikh}, Z_{ilk}, Y_{ilk} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} i, l = 1, \dots, n; k \\ = 1, \dots, m; h = 1, \dots, H_k \end{matrix} \quad (6.19)$$

Denklem (6.1) ve (6.2)'de formüle edilen amaç fonksiyonları, ele alınan çizelgeleme problemin iki temel yönünü optimize etmeyi amaçlamaktadır: makinelerin hem işlem hem de bekleme süreleri boyunca toplam enerji tüketiminin minimize edilmesi ve toplam gecikmenin minimize edilmesi. Denklem (6.3), makine k 'ye iş i 'yi işlemek

için belirli bir hız seviyesi atandığında, bu hızın işin tamamlanmasına kadar değişmeden kalmasını garanti eder. Denklem (6.4), aynı işe ait operasyonların ardışık olarak işlenmesini zorunlu kılarak, aynı işin iki operasyonunun eşzamanlı olarak yürütülmesini engeller. Denklem (6.5), her bir makinenin aynı anda yalnızca tek bir işlemi gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Bu kısıt, çizelgeleme literatüründe kapasite kısıtı olarak adlandırılmaktadır. Denklem (6.6), (6.7) ve (6.8), i ve l işlerinin makine k üzerinde ardışık olarak işlenip işlenmediğini belirleyen ikili değişken Z_{ilk} 'yi tanımlar. Denklem (6.9), (6.10) ve (6.11), belirli bir k makinesi üzerinde ardışık olarak işlenen i ve l işleri arasındaki boşta kalma sürelerinin nasıl hesaplandığını tanımlamaktadır. Özellikle, Denklem (6.9) ve (6.10), işler art arda çizelgelendiğinde boşta kalma süresini hesaplar. Eğer $Z_{ilk} = 1$ ise, yani iş l 'nin makine k üzerinde işi i 'yi doğrudan takip ettiğini gösteriyorsa, boşta kalma süresi iş i 'nin tamamlanma zamanı ile iş l 'nin başlama zamanı arasındaki fark olarak hesaplanır. Buna karşılık, Denklem (6.11), $Z_{ilk} = 0$ olduğunda, yani i ve l işleri aynı makinede ardışık olarak işlenmediğinde, bu iki iş arasındaki boşta kalma süresinin sıfır olarak atanmasını garanti eder. Bu formülasyon, işler arasında boşlukların bulunduğu durumlar ile işlerin art arda çizelgelendiği durumları etkin biçimde ayırt eder.

Denklem (6.12) ve (6.13), enerji odaklı çizelgeleme için açma/kapama stratejisinin temel ilkesini tanımlar. Özellikle, Denklem (6.12), $Y_{ilk} = 0$ olduğunda uygulanır ve bu durumda i ve l iş arasındaki boşta kalma süresinin önceden belirlenmiş eşik değerin altında kalmasını garanti eder. Bu da makinenin bekleme modunda kaldığını ve azaltılmış bir enerji tüketimiyle çalışmaya devam ettiğini gösterir. Öte yandan, Denklem (6.13), $Y_{ilk} = 1$ olduğunda devreye girer. Bu, boşta kalma süresinin eşik değere ulaştığını veya onu aştığını ifade eder ve makinenin bu süre boyunca enerji tüketimini ortadan kaldırmak amacıyla tamamen kapatılmasını sağlar.

Denklem (6.14), (6.15) ve (6.16), k makinesi üzerinde ardışık olarak işlenen i ve l işleri için bekleme süresi hesaplamasını tanımlar. Denklem (6.14) ve (6.15), $Y_{ilk} = 0$ olduğunda, $StandbyTime_{ilk}$ 'in $IdleTime_{ilk}$ 'e eşit olmasını sağlar; bu da makinenin kapanmak yerine düşük enerjili bekleme modunda kaldığını gösterir. Buna karşılık, Denklem (6.16) $Y_{ilk} = 1$ olduğunda, $StandbyTime_{ilk}$ 'in sıfır olmasını zorunlu kılar; bu da makinenin boşta kalma süresi boyunca tamamen kapatıldığını ifade eder. Denklem (6.17), her bir i işi için gecikme süresini tanımlamakta ve önceden belirlenmiş teslim tarihini aşan tüm gecikmelerin çizelgeleme modelinde hesaplanmasını sağlamaktadır.

Denklem (6.18) ve (6.19) ise negatif olmama kısıtlarını ifade eder. Böylece işlem süreleri, boşa kalma süreleri, bekleme süreleri ve gecikme değerleri dâhil olmak üzere tüm karar değişkenlerinin negatif olmaması garanti altına alınır.

6.2. SÇA-ATÇ Problemi için Önerilen Çözüm Yaklaşımları

Çalışma konusu olan SÇA-ATÇ probleminin karmaşık doğası gereği, uygun çözüm yöntemlerine başvurulması pratik açıdan uygulanabilir sonuçlar elde etmek için zorunlu hale gelmektedir. Problem yalnızca her makinedeki operasyon sıralamalarının atanmasını içermekle kalmayıp, aynı zamanda her operasyon için optimal hız seviyelerinin belirlenmesini de kapsamaktadır. Bu durum problemin yüksek bir karmaşıklık düzeyine sahip olmasına yol açmaktadır. Bu karmaşıklık, hem optimal çözümler sunan ancak büyük boyutlu problemlerde uygulanabilirliği sınırlı kalan kesin yöntemlerin kullanımını hem de kabul edilebilir hesaplama süreleri içinde yüksek kaliteli yaklaşık çözümlere erişimi mümkün kılan meta-sezgisel yaklaşımların uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Buna bağlı olarak, bu bölüm her iki yönü de birleştiren ve farklı boyuttaki problemlerin ele alınmasına elverişli olan birtakım yöntemlerin sunulmasına odaklanmaktadır. İlk olarak, çok amaçlı optimizasyon problemleri için özel olarak tasarlanmış bir kesin yöntem olan artırılmış epsilon kısıt yöntemi tanıtılmaktadır. Buna karşın, hesaplama karmaşıklığı ve büyük boyutlu problemlerin çözümündeki güçlükler nedeniyle, sezgisel analiz için iki gelişmiş çok-amaçlı algoritma da önerilmektedir: Domine edilmeyen sıralama genetik algoritma-II (NSGA-II) ve Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (MOGWO). Bu meta-sezgisel algoritmalar, kesin yöntemlerin pratik olmadığı büyük boyutlu problemler için yüksek kaliteli ve domine edilmeyen çözümleri etkin bir biçimde üretmek amacıyla uygulanmaktadır.

6.2.1. Artırılmış epsilon kısıt yaklaşımı (Augmecon)

Daha önce dördüncü bölümde belirtildiği üzere, çok amaçlı optimizasyon problemlerine etkin çözümler üretmek amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. (Hwang ve Masud, 1979) bu yöntemleri dört ana kategoriye ayırmış ve bunları tercihsiz yöntemler, posteriori yöntemler, priori yöntemler ve etkileşimli yöntemler olarak sınıflandırmıştır.

Epsilon kısıt yöntemi, esnekliği ve basitliği nedeniyle çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde en yaygın kullanılan posteriori yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin geleneksel versiyonu ilk kez (Haimes, 1971) tarafından geliştirilmiştir.

Bu yöntem, amaç fonksiyonlarından birinin doğrudan iyileştirilmesi üzerine kurulmakta, diğer amaçlar ise sınır değerler (ε) ile kısıtlara dönüştürülmektedir. Genel olarak, bu yöntem kullanılarak bir minimizasyon problemi şu şekilde formüle edilmektedir:

$$\min f_1(x) \quad (6.20)$$

$$f_i(x) \leq \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.21)$$

$$x \in S \quad (6.22)$$

Burada p , amaç fonksiyonlarının sayısını; S , uygun çözüm kümesini; ε_i ise diğer amaçlar için izin verilen üst sınır değerlerini temsil etmektedir.

Bu yöntemin doğru şekilde uygulanabilmesi için öncelikle her bir amaç fonksiyonunun pareto yüzeyi üzerindeki uygun değer aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Minimum değerlerin elde edilmesi genellikle her bir amacın tek başına optimize edilmesiyle kolaylıkla sağlanabilmekte iken, maksimum değerlerin tespiti daha karmaşık bir süreç oluşturmaktadır.

Dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, diğer amaçlara ilişkin kısıtların bağlayıcı nitelikte olması gerekliliğidir. Aksi takdirde, elde edilen çözüm etkin çözüm olarak kabul edilmemekte, zayıf etkin çözüm olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla, yapay değişkenler s_i kullanılmakta ve amaç fonksiyonu kısıtları şu şekilde eşitliklere dönüştürülmektedir:

$$f_i(x) + s_i = \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.23)$$

$$x \in S, s_i \in R^+ \quad (6.24)$$

Amaç fonksiyonu ise şu şekilde yeniden formüle edilmektedir:

$$\min (f_1(x) - \delta(s_2 + s_3 + \dots + s_p)) \quad (6.25)$$

Burada δ , ikincil bir terim olarak kullanılan küçük bir katsayı olup genellikle $10^{-3} \leq \delta \leq 10^{-6}$ aralığında seçilmektedir.

Ancak bu formülasyon, s_i toplamı doğrudan amaç fonksiyonuna dahil edildiğinde değişkenlerin ölçeklenmesiyle ilgili sorunlara yol açabilmektedir. Epsilon kısıt yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları olmasına rağmen, bu tür dezavantajları da mevcuttur.

Bu eksikliği gidermek amacıyla Mavrotas (2009), artırılmış epsilon kısıt yöntemini önermiştir. Bu yöntemde her yapay değişken, ödünleşme matrisi (payoff matrix) kullanılarak elde edilen kendi aralığı r_i 'ye bölünmekte, böylece daha kesin çözümler elde edilmektedir.

Bu şekilde, geleneksel epsilon kısıt yöntemine yapılan bu iyileştirme ile artırılmış epsilon kısıt yöntemi (Augmecon) şu şekilde ifade edilmektedir Mavrotas (2009):

$$\min (f_1(x) - \delta(s_2/r_2 + s_3/r_3 + \dots + s_p/r_p)) \quad (6.26)$$

$$f_i(x) + s_i = \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$x \in S, s_i \in R^+$$

Bu yöntem, zayıf pareto-optimal çözümlerin önlenmesi yoluyla çözüm kalitesini artırmakta, aynı zamanda gereksiz tekrarların ortadan kaldırılması sayesinde hesaplama yükünü azaltmakta ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde daha verimli bir alternatif oluşturmaktadır.

Augmecon yöntemi aşağıda belirtilen mekanizma doğrultusunda çalışmaktadır:

Öncelikle, yalnızca etkin çözümlerin dikkate alındığı bir ödünleşim tablosu ardışık sıralama yöntemi (Lexicographic Optimization) kullanılarak oluşturulmaktadır.

Bu ardışık sıralama süreci, diğer amaçlar göz ardı edilerek ilk amaç fonksiyonunun minimize edilmesi (veya maksimize edilmesi) ile başlamaktadır.

Optimal bir değer elde edildikten sonra, bu değer üst (veya alt) sınır olarak belirlenmekte ve modele ek bir kısıt olarak dahil edilmektedir.

Optimizasyon süreci daha sonra ikinci amaç fonksiyonu için aynı yaklaşımı izleyerek devam etmektedir.

Bu sıralı prosedür, tüm diğer amaç fonksiyonları için uygulanmakta ve ödünleşim tablosu tamamen oluşturulana kadar sürdürülmektedir.

Ödünleşim tablosunun oluşturulmasının ardından, Augmecon yönteminde bir sonraki adım, herhangi bir amaç fonksiyonunun aralığını hesaplamak ve bunu ızgara noktaları olarak bilinen eşit aralıklara bölmektir.

Bu ızgara noktaları, bağlayıcı bir kısıtın sağ tarafının parametrik bir şekilde sistematik olarak ayarlanması için referans değerler olarak kullanılmaktadır.

Kullanıcı tarafından seçilen ızgara noktası sayısı hem çözüm kalitesini hem de hesaplama verimliliğini etkilemektedir. Izgara noktalarının sayısı arttıkça, daha yoğun bir pareto yüzeyi elde edilebilmekte, ancak buna bağlı olarak hesaplama süresi de artırmaktadır.

Dolayısıyla, uygun sayıda ızgara noktası seçimi, pareto yüzeyinin üretilmesinde hem verimliliği hem de doğruluğu korumak açısından kritik öneme sahiptir.

Önerilen algoritmada, çözüm süresini azaltmak amacıyla, sağ taraf kısıtları ızgara noktalarının sırasına göre ardışık olarak eklenmektedir; en gevşek değerlerle başlanmakta ve en sıkı değerlerle sonlandırılmaktadır.

Böylece, verilen sağ taraf sabiti ile uygun olmayan bir çözüm elde edilirse, algoritma durdurulur, çünkü döngünün kalan iterasyonlarını çözmek anlamsız hale gelmektedir.

Bu adımlar CPLEX optimizasyon çözücüsü içinde uygulanarak, Augmecon yöntemi etkin bir şekilde iyi dağıtılmış bir pareto yüzeyi üretmekte, zayıf pareto-optimal çözümlerden kaçınmakta ve hesaplama yükünü azaltmaktadır.

6.2.2. Augmecon yönteminin örnek test verisine uygulanması

Bu bölümde, Bölüm 6.1.1’de sunulan açıklayıcı örneğin verilerine dayanılarak Augmecon yöntemi uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar adım adım gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, Augmecon yönteminin ilk adımı ardışık sıralaması yöntemi kullanılarak ödünleşim tablosunun oluşturulmasıdır. Buna göre süreç, ikinci amaç göz ardı edilerek birinci amaç fonksiyonunun minimize edilmesi ile başlamaktadır. Elde edilen optimal değer üst sınır olarak belirlenmekte ve modele ek bir kısıt şeklinde dahil edilmektedir. Optimizasyon süreci aynı yaklaşımla ikinci amaç fonksiyonuna ilerlemektedir. Elde edilen ödünleşim tablosu Çizelge 6.6 ’de verilmiştir.

Çizelge 6.6. Elde edilen ödünleşim tablosu

	f_1	f_2
$\min f_1$	3396	202
$\min f_2$	5649,69	67,38

Ödünleşim tablosu oluşturulduktan sonra, tablonun kısıtlar bölümünde herhangi bir amaç fonksiyonunun aralığının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu örnekte yalnızca ikinci amaç f_2 bir kısıt olarak dahil edilmiştir.

Buna göre ödünleşim tablosundan $r_2 = 202 - 67,38 = 134,62$ değeri türetilmiştir. Daha sonra r_2 , her biri bir ızgara noktası olarak adlandırılan 10 eşit aralığa bölünmüştür.

Izgara noktaları, bağlayıcı bir kısıtın sağ taraf değeri ε_i parametrik olarak değiştirilirken referans değerler olarak kullanılmaktadır.

Bu nedenle, $Step2 = 13,462$ ile Augmecon yöntemi süreci şu şekilde uygulanmaktadır:

$i = 0'dan 10'a kadar$

$$\varepsilon_2 = 202 - (i \times 13,462)$$

Çöz (1)

Sonraki (i)

Elde edilen ızgara noktaları aşağıdaki Çizelge 6.7 'de listelenmektedir.

Çizelge 6.7. Elde edilen ızgara noktaları.

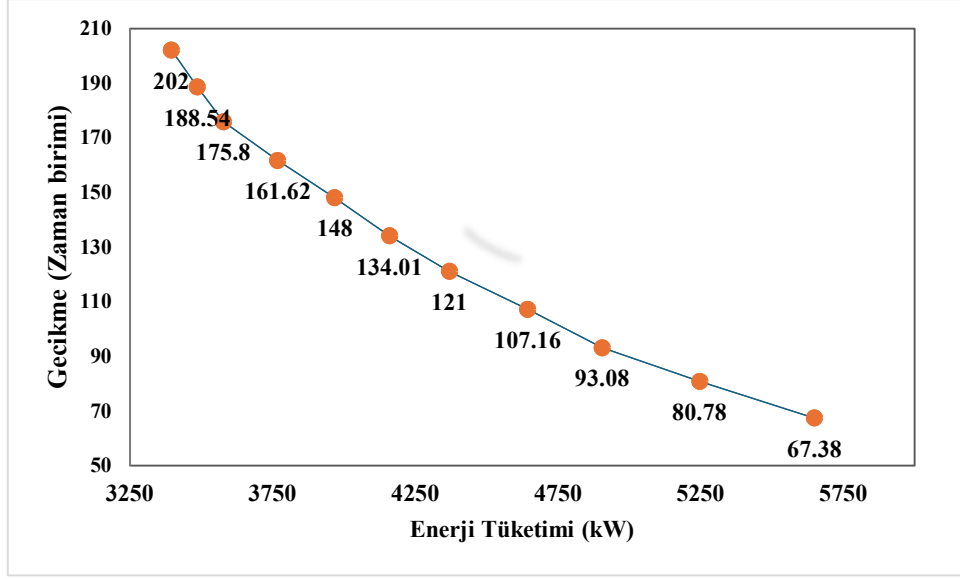
Izgara noktaları											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_2	202	188,54	175,08	161,61	148,15	134,69	121,23	107,77	94,3	80,84	67,38

Bu noktalar, ilgili amaç fonksiyonu için sağ taraf sabitleri olarak modele en gevşekten en sıkıya doğru sırayla eklenmiş; her bir nokta çevresinde çözümler taranmış ve sonuçta 11 farklı pareto-optimal çözüm elde edilmiştir.

Son olarak, bu örnekte elde edilen 11 pareto-optimal çözüm Çizelge 6.8 'de sunulmuş ve pareto yüzeyi, Şekil 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Elde edilen pareto-optimal çözümlerin değerleri.

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}
TEC	3396	3487,10	3578,65	3768,69	3968,46	4160,9	4370,46	4644,73	4906,46	5247,52	5649,69
TT	202	188,54	175,08	161,62	148	134,01	121	107,16	93,08	80,78	67,38



Şekil 6.2. Elde edilen pareto yüzeyi

Şekil 6.2’de gösterildiği üzere, “elde edilen pareto yüzeyi”, makinelerle ait toplam enerji tüketimi ile işlerin toplam gecikme davranışını açıklamak amacıyla elde edilen pareto optimal çözümlerle temsil edilmektedir. Bu sonuçlar, makinelerle ait toplam enerji tüketiminin 3396 ’dan 5649,69’a doğru bir artış göstermekte olduğunu ortaya koymaktadır; buna karşılık işlerin toplam gecikmesi 202’den 67,38’e düşmektedir. Bu davranışlar, makine hız modlarının değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır; makine daha hızlı bir hız moduna ayarlandığında işi daha kısa sürede tamamlamakla birlikte daha fazla enerji tüketmekte, tersi durumda ise daha az enerji tüketmekte ancak işlem süresi uzamaktadır.

6.2.3. Domine edilmeyen sıralama genetik algoritma-II (NSGA-II)

Genetik Algoritmalar, doğal evrim ilkelerinden esinlenen ve genişçe kullanılan meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinden biridir. Öncelikle, GA aday çözümleri kromozomlar şeklinde kodlayarak işlemektedir.

Seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel süreçler aracılığıyla GA, ardışık nesiller boyunca bir çözüm popülasyonunun evrilmesine neden olmakta ve optimal ya da optimale yakın çözümler bulmayı amaçlamaktadır. Çok amaçlı optimizasyon bağlamında, GA’nın çelişen amaçlarla etkin şekilde başa çıkabilmesi için vektör tabanlı bir değerlendirme stratejisini içermesi gerekmektedir. Bu amaçla, Srinivas ve Deb (1994) tarafından domine edilmeyen sıralama genetik algoritması (NSGA) tanıtılmıştır. Bu

yaklaşım, aramayı iyi dağıtılmış bir pareto yüzeyine yönlendirmek amacıyla çözümleri pareto dominasyonuna göre sınıflandırmaktadır. Ancak orijinal NSGA, sıralama sürecindeki yüksek hesaplama karmaşıklığı ve bir elitizm mekanizmasının yokluğu gibi verimliliğini sınırlayan eleştiriler barındırmakta; bu durum, elde edilen en iyi çözümlerin sonraki nesillerde elenebilmesine ve nihai çözüm kümesinin kalitesinin azalmasına yol açmıştır. Ayrıca NSGA algoritmasında çeşitlilik, uyum değerlerinin paylaşımı yoluyla sağlanır ve bu paylaşım parametresi algoritmanın performansını doğrudan etkilemektedir. (Yağmur, 2021)

Bu sorunları aşmak için, Deb ve ark. (2002) tarafından geliştirilen iyileştirilmiş versiyon NSGA-II, selefine kıyasla daha hızlı bir dominasyon tabanlı sıralama algoritması ve azaltılmış hesaplama karmaşıklığı sunarak daha büyük popülasyonların işlenmesine uygun hâle getirilmiştir. NSGA-II ayrıca açık bir elitizm mekanizması getirmekte; böylece evrimsel süreçte bulunan en iyi çözümler nesiller boyunca korunmakta ve parametreye bağımlı uyum paylaşımı mekanizması, parametreye bağımlı olmayan bir yoğunluk mesafesi yaklaşımı ile ikame edilmektedir. Bu düzenlemeler, çeşitliliğin korunmasını ve pareto yüzeyinin daha düzgün dağılımını sağlamasının yanı sıra algoritmanın genel kararlılığını ve performansını da arttırmaktadır. Bu iyileştirmeler sayesinde NSGA-II, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde en yaygın benimsenen algoritmalarından biri haline gelmiş olup, çalışmada ele alınan problem için uygun bir tercih niteliği taşımaktadır. Şekil 6.3, NSGA-II algoritmasının genel yapısını göstermektedir; algoritma aşağıdaki sekiz ana adımdan oluşmaktadır:

Birinci adım (Başlangıç popülasyonunun oluşturulması): Sürecin başında, arama uzayını mümkün olduğunca kapsayacak şekilde aday çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu rastgele olarak oluşturulmaktadır.

İkinci adım (Bireylerin değerlendirilmesi): Başlangıç popülasyonundaki her bir bireyin amaç fonksiyonu (uyum) değerleri hesaplanmaktadır.

Üçüncü adım (Pareto sınıflandırması): Popülasyondaki tüm bireyler birbirleriyle karşılaştırılmakta ve dominasyon ilkesi doğrultusunda seviyelere sınıflandırılmakta; bu işlem sonucunda F_0 , F_1 , ... biçiminde alt kümeler oluşturulmaktadır. F_0 kümesi, başka hiçbir çözüm tarafından domine edilmemiş çözümlerden oluşmakta; F_1 kümesi ise yalnızca F_0 içindeki çözümler dışında başka

hiçbir çözüm tarafından domine edilmemiş çözümleri içermektedir. Bu sınıflandırma işlemi tüm çözümleri kapsayana kadar sürdürülmektedir.

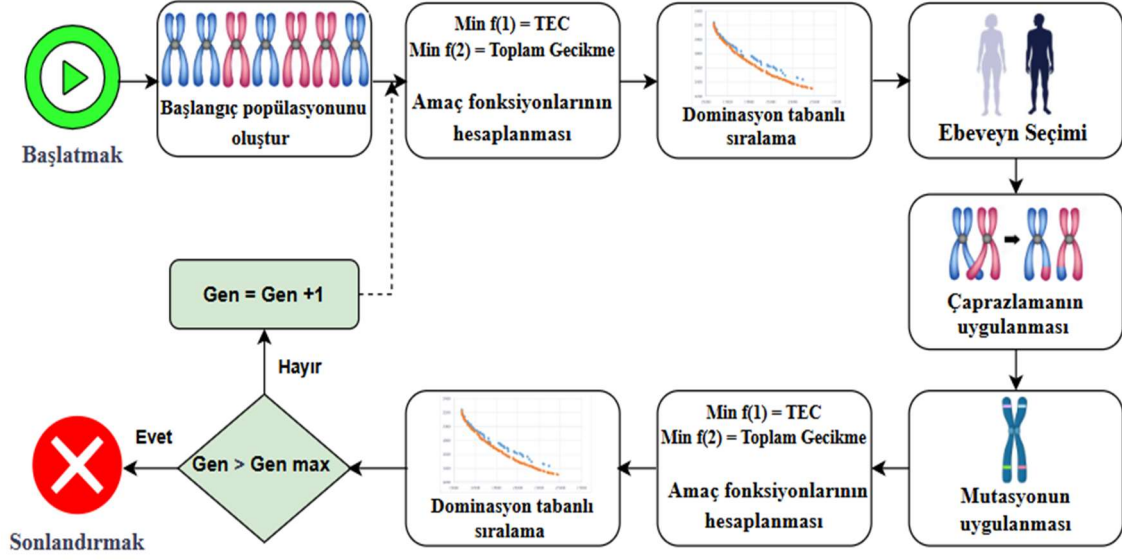
Dördüncü adım (Yeni neslin üretilmesi): Popülasyonun tüm bireyleri sınıflandırıldıktan sonra ebeveynler seçilmekte ve bunlara çaprazlama ile mutasyon operatörleri uygulanmakta; bu işlemler sonucunda yeni bir çocuk popülasyonu (alt popülasyon) üretilmektedir.

Beşinci adım (Yeniden değerlendirme): Orijinal popülasyon ile yeni üretilen çocuk popülasyon birleştirilmekte ve ardından tüm bireylerin amaç fonksiyonu (uyum) değerleri yeniden hesaplanmaktadır.

Altıncı adım (Yeniden sınıflandırma ve yoğunluk mesafelerinin hesaplanması): Önceki adımda elde edilen uyum değerlerine dayanarak, birleştirilmiş popülasyonun bireyleri tekrar pareto seviyelerine sınıflandırılmakta ve her bir bireyin yoğunluk mesafesi hesaplanmaktadır.

Yedinci adım (Popülasyonun güncellenmesi): Bir sonraki jenerasyon için daha uygun bireylerin seçilmesi suretiyle popülasyon güncellenmekte; seçim, daha düşük pareto seviyesinden başlayarak ve daha yüksek yoğunluk mesafesine sahip bireyler önceliklendirilerek yapılmaktadır. Popülasyon, en düşük pareto puanına ve en yüksek yoğunluk mesafesine sahip bireylerden başlayarak bir sonraki iterasyon için en uygun bireyler seçilerek güncellenmektedir.

Sekizinci adım (Durdurma kriteri): Önceden belirlenmiş nesil sayısına (veya başka bir sonlandırma kriterine) ulaşıldığında, domine edilmeyen çözümler raporlanmakta ve nihai çözüm kümesi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 6.3. NSGA-II algoritmasının genel yapısı

Bu bölümde NSGA-II algoritmasının genel yapısı sunulduktan sonra kromozom gösterimi, başlangıç popülasyonunun nasıl oluşturulduğu, seçim mekanizması ve önerilen algorithmada kullanılan diğer genetik operatörler ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

6.2.3.1. Kromozom gösterimi

Evrimsel algoritmaların etkinliği açısından uygun bir çözüm gösterimi son derece önemlidir; çünkü bu gösterim, arama uzayının ne denli etkili keşfedilebileceğini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, operasyonların sıralanması ile her operasyon için makine hız seviyelerinin seçimi olmak üzere problemin iki temel yönü eşzamanlı olarak ele alınmaktadır. Buna göre her bir kromozom iki satırlı bir matris olarak kodlanmakta; ilk satır operasyon sırasını gösterirken, ikinci satır her bir operasyon karşılık gelen hız seviyesini belirtmektedir. Dolayısıyla her bir satır $N \times M$ adet gen içerecek şekilde yapılandırılmakta olup burada N iş sayısını, M ise makine sayısını ifade etmektedir. İlk satır, her bir iş numarasının kendi işlemleri için M kez tekrarlanması yoluyla operasyon sıralamasını yakalamakta; böylelikle her iş gerekli tüm makineler üzerinde sırayla atanmış olmaktadır. Örneğin, Şekil 6.4'te 4 iş ve 3 makine içeren bir problemin oluşturulmuş kromozomu gösterilmiştir; burada iş 1'in pozisyon 1'deki ilk görünümü onun birinci operasyonuna karşılık gelmekte, iş 1'in pozisyon 4 ve 9'daki sonraki görünümleri sırasıyla ikinci ve üçüncü operasyonlarını temsil etmektedir. Bu

yapılandırılmış tekrar, her bir işin tam operasyon dizisinin kromozom üzerinde doğru şekilde temsil edilmesini sağlayarak gerekli operasyon sırasını korumakta ve çizelgeleme çerçevesinde etkin bir şekilde çözümlenmesine imkân vermektedir. İkinci satır doğrudan birinci satıra eşlenmekte ve karşı operasyona seçilen hız seviyesini kodlamaktadır; her bir değer, atanan makine için izin verilen hız seviyeleri kümesinden seçilmektedir. Örneğin, ikinci satırın 1. pozisyonundaki değer 3 ise, bu durum iş 1'in birinci operasyonunun hız seviyesi 3 ile gerçekleştirileceğini ifade eder.

Son olarak, her operasyonun hangi makinede yapılacağı, işin önceden belirlenmiş yönlendirme sırasına göre sabittir. Bu nedenle çözüm gösterimi, operasyon sırasını ve hız seçimini esnek şekilde temsil ederken, makine atamalarını değişken olarak ele almaz.

$N \times M = 12$

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Operasyon Sırası	1	4	2	1	3	3	4	2	1	3	4	2
Hız Seviyesi	3	3	2	1	1	2	1	1	3	2	3	3

Şekil 6.4. Çift sıralı matris kullanılarak kromozom gösterimi.

Bu çift katmanlı yapı, evrimsel süreç içerisinde hem çizelgeleme hem de enerji verimliliğine ilişkin kararların kapsamlı biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Bu kromozomun çözümlenmesi sırasında, operasyonlar kromozom üzerinde soldan sağa doğru sırayla taranarak makinelerde çizelgelenmektedir. Birinci satırdaki her gen (bir operasyonu temsil eden) için ikinci satırdaki karşılık gelen hız seviyesi değeri kullanılarak fiili işlem süresi belirlenmektedir. Ardından operasyon, ilgili makineye atanır ve aynı işe ait önceki operasyonların tamamlanmasından ve o makinede hâlihazırda atanmış olan operasyonların bitiminden sonraki en erken uygun zaman aralığına yerleştirilir.

6.2.3.2. Başlangıç popülasyonu

NSGA-II, her biri bir kromozom olarak temsil edilen potansiyel çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Her kromozomun birinci satırı, operasyon sıralamasına karşılık gelir ve çizelgeleme yapılarını geniş çapta keşfetmek amacıyla rastgele üretilir. Her operasyonun makine hız seviyelerini belirleyen

ikinci satır için ise, çeşitliliği artırmak ve aramayı pareto yüzeyinin uç bölgelerine yönlendirmek amacıyla değerler dört eşit olasılıklı senaryoya göre başlatılır:

- (1) Tüm hız değerleri seviye 1'e (en düşük) ayarlanır, bu genellikle enerji tüketimini minimize etme amacını destekler;
- (2) Tüm hız değerleri seviye 2'ye (orta) ayarlanır;
- (3) Tüm hız değerleri seviye 3'e (en yüksek) ayarlanır, bu da daha hızlı işlemeyi teşvik ederek gecikmeye bağlı amaç değerini düşürür; ve
- (4) Hız seviyeleri mevcut seçenekler arasından rastgele atanır.

Bu stratejik başlatma yöntemi, algoritmanın amaçlar uzayının sınırlarında yer alan çözümleri verimli bir şekilde tanımlamasını ve korumasını sağlayarak, ortaya çıkan pareto yüzeyinin genel yayılımını ve kalitesini artırır.

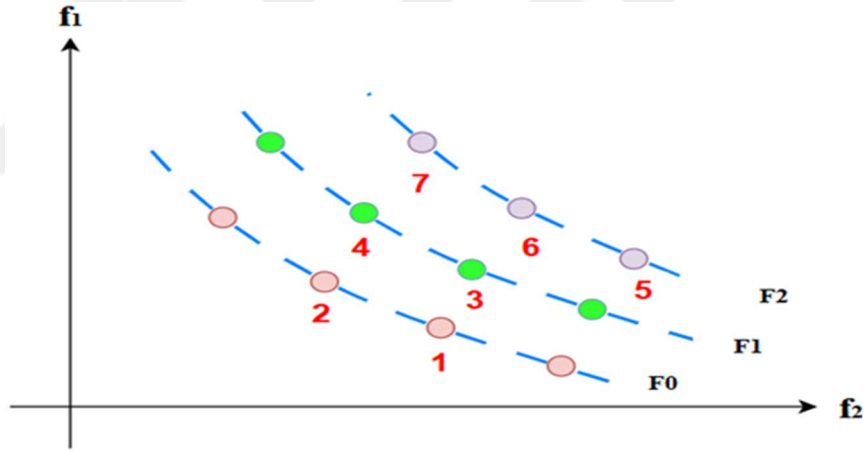
6.2.3.3. Amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi

Bu aşamada, popülasyondaki her birey, diğer bireylerle karşılaştırıldığında kalitesi ve rekabet gücünü belirlemek için değerlendirilir. Değerlendirme süreci iki ana adımdan oluşur: dominasyon tabanlı sıralama ve yoğunluk mesafesi hesaplaması.

a) Dominasyon tabanlı sıralama

Dominasyon tabanlı sıralama süreci, popülasyondaki bireylerin kalitesini birbirleriyle karşılaştırarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İlk adımda, her bireyin dominasyon ilişkisine göre pareto yüzeyinin belirlenmesidir. Bir birey, popülasyondaki hiçbir diğer birey tarafından tüm amaç fonksiyonlarda aynı anda geçilemiyorsa domine edilmeyen olarak kabul edilir ve ilk pareto yüzeyine (yüzey 0) atanır. Yüzey 0'de yer alan bireyler belirlendikten sonra, bunların yüzey 1'in bireylerinin belirlenme sürecini etkilememesi amacıyla geçici olarak popülasyondan çıkarılmaktadır. Daha sonra, yüzey 1, popülasyondaki diğer bireyler tarafından domine edilmeyen (yüzey 0 bireyleri hariç) kalan bireylerle doldurulur. Bu işlem, yüzey 2 için de aynı şekilde sürdürülür. Yüzey 0 ve yüzey 1 kümelerindeki bireyler geçici olarak popülasyondan çıkarılır ve domine edilmeyen kalan bireyler yüzey 2'ye eklenir. Benzer şekilde, her adımda mevcut yüzeyin bireyleri dışarı alınarak takip eden yüzeyin tayini sürdürülmekte ve böylece popülasyondaki tüm bireyler ardışık pareto yüzeylerine dağıtılmaktadır. Tüm bireylerin pareto yüzeylerine atanmasının ardından, bireyler yüzey sıralarına göre artan şekilde

sıralanır; yani, daha düşük numaralı yüzeylerde (örneğin, yüzey 0) yer alanlar, çözüm kalitesi açısından daha üstün kabul edilir. Ancak bu mekanizma özel durumlarla karşılaşabilmekte ve daha ayrıntılı bir açıklama gerektirmektedir. Bazen, iki çözüm arasında seçim yapılırken dominasyon tabanlı sıralama mekanizması belirleyici olur. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere, çözüm 1 ile çözüm 4 arasında doğrudan bir dominasyon ilişkisi yoktur; yani, bu iki çözümden herhangi biri, diğerini domine etmemektedir. Bu tip durumlarda öncelik tayininde yüzey indeksi belirleyici olmaktadır; daha küçük yüzey numarasına sahip olan çözüm daha yüksek öncelik taşımakta, dolayısıyla yüzey 0'da yer alan çözüm 1, yüzey 1'de yer alan çözüm 4'e göre daha tercih edilebilir olmaktadır. Diğer yandan, bazı durumlarda birden fazla çözüm aynı pareto yüzeyine düşmekte ve aralarında dominasyon ilişkisi bulunmamaktadır; örneğin çözümler 5, 6 ve 7 aynı yüzeyde (yüzey 2) yer almakta ve hiçbirisi diğerlerini domine etmemektedir. Bu durum, yalnızca dominasyon tabanlı sıralamanın ayırım yapmaya yetmediğini gösterir ve bu durumda ek bir kriter olarak yoğunluk mesafesi kullanılmaktadır.



Şekil 6.5. Dominasyon tabanlı sıralama sürecini açıklayan örnek

b) Yoğunluk mesafesi hesaplaması

Yoğunluk Mesafesi, aynı pareto yüzeyi içinde yer alan belirli bir bireyin etrafındaki çözümlerin yoğunluğunu, onların amaç fonksiyon değerleri temel alınarak ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu ölçümün temel amacı, çözüm uzayında daha az yoğun bölgelerde bulunan bireyleri tercih ederek popülasyondaki çeşitliliğin korunmasını sağlamaktır. Belirli bir yüzeydeki her bir bireyi için yoğunluk mesafesi, bireylerin her bir amaç fonksiyonu açısından ayrı ayrı sıralanmasıyla hesaplanmaktadır. Herhangi bir amaçta en düşük veya en yüksek değere sahip olan bireylere, seçim sürecinde muhafaza

edilmelerinin garanti altına alınması için yoğunluk mesafesi olarak sonsuz değer atanmaktadır.

Kalan bireyler için ise, bir birey j 'nin amaç m 'ye ilişkin kısmi yoğunluk mesafesi, kendisine komşu olan çözümler arasındaki fark esas alınarak hesaplanmaktadır; bu durum (6.27) numaralı denklemde gösterildiği şekilde gerçekleştirilmektedir.

$$d_m^j = \frac{f_m^{j+1} - f_m^{j-1}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad \forall m \in P; j \in S \quad (6.27)$$

Burada f_m^{max} ve f_m^{min} , sırasıyla amaç m 'nin maksimum ve minimum değerlerini göstermekte olup, pay kısmı birey j 'nin aynı amaçtaki bir sonraki ve bir önceki çözüm değerleri arasındaki farkı temsil etmektedir.

Bu mesafe her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı hesaplandıktan sonra elde edilen değerler toplanmakta ve bireyin toplam yoğunluk mesafesini vermektedir; bu durum (6.28) numaralı denklemde ifade edilmektedir.

$$d^j = \sum_m d_m^j \quad \forall j \in S \quad (6.28)$$

Böylece bireyler, yüzeyin içindeki yoğunluk mesafesi değerlerine göre azalan sırada sıralanır. Daha yüksek değerlere sahip bireylere öncelik verilir, çünkü bu değerler onların daha az kalabalık bölgelerde konumlandığını yansıtır ve onları daha belirgin hâle getirerek bir sonraki nesle aktarılmak üzere seçilme olasılıklarını artırmaktadır.

Buna karşın, bireyler farklı pareto yüzeylerinde dağıldığında, temel karşılaştırma ölçümü her zaman ilgili yüzeyin sıralamasıdır. Yoğunluk mesafesi ise yalnızca sıralama eşitliği durumunda kullanılmaktadır.

6.2.3.4. Ebeveyn seçimi

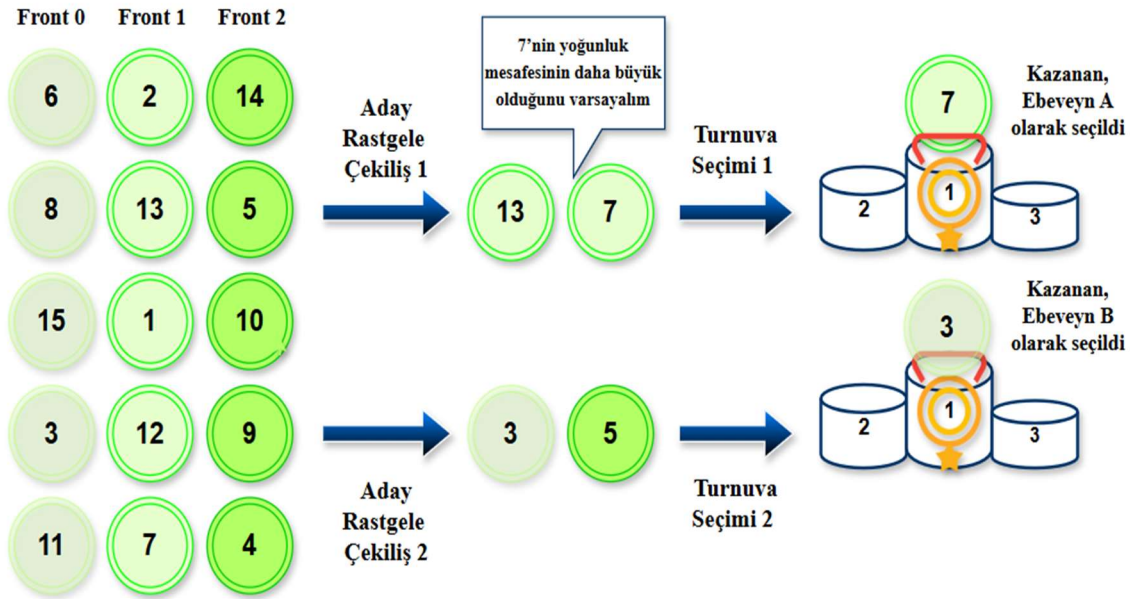
NSGA-II algoritmasında seçim aşaması, popülasyonun nesiller boyunca evriminin kalitesini belirleyen temel aşamalardan biridir. Bu aşamanın temel fikri en uygun bireylerin seçilerek genlerinin bir sonraki nesle aktarılmasını sağlamakta ve böylece çözümlerin sürekli iyileşmesi ile pareto yüzeyine daha yakınlaşması temin

edilmektedir. Bu aşamada temel bir değerlendirme konusu, her bir nesilde üretilmesi gereken çocuk sayısının belirlenmesidir.

Uygulanan çaprazlama operatörü (Bkz. Bölüm 6.2.3.5) her ebeveyn çiftinden iki yeni çocuk üretmekte olduğundan, her nesilde üretilcek çocuk sayısına karşılık gelecek şekilde ebeveyn sayısının ayarlanması gerekmektedir. Önerilen algoritma, seçim mekanizması olarak ikili turnuva seçimini benimsemektedir; bu yöntem, genetik algoritmalarda en yaygın ve etkili seçim tekniklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Bkz. Şekil 6.6).

Bu yöntemde iki aday rastgele popülasyondan seçilerek küçük bir rekabete tabi tutulmakta ve turnuvanın galibi öncelikle ait olduğu pareto yüzeyinin derecesine göre belirlenmektedir; daha düşük sıra numarasına sahip bireylere kalite bakımından üstünlük atfedilmekte ve dolayısıyla öncelik verilmektedir. Ancak, iki yarışan birey aynı yüzeyin üyesi olduğunda, belirleyici kriter olarak yoğunluk mesafesi devreye girmektedir. Bu süreç, her nesilde planlanan tüm çaprazlama operasyonları için yeterli sayıda ebeveyn seçilene kadar sırayla tekrarlanır.

Öte yandan, algoritma seçime ek bir kısıtlama getirmektedir. Daha önce ebeveyn olarak seçilmiş veya aynı nesil içinde önceki turnuvalara aday olarak katılmış bireyler, sonraki seçim turlarından hariç tutulmaktadır. Bu önlem, tekrarlanan seçimleri önlediği ve gen havuzundaki keşif kapsamını genişleterek daha çeşitli ve yüksek kaliteli çözümler keşfetme şansını artırdığı için büyük önem taşımaktadır.



Şekil 6.6. Turnuva seçim mekanizmasının gösterimi.

6.2.3.5. Çaprazlama prosedürü

Ebeveynlerin seçimi tamamlandıktan sonra, bu algorithmada çeşitlendirme mekanizmalarından biri olarak çaprazlama aşaması gelmektedir. Bu aşamanın amacı, seçilmiş ebeveynlerden elde edilen genetik bilgilerin birleştirilmesi yoluyla yeni bireyler (çocuklar) üretmekte; böylece üstün özelliklerin nesiller arasında aktarılması sağlanmakta ve daha verimli bileşimlerin ortaya çıkmasına imkân tanınmaktadır.

Önerilen NSGA-II algoritmasında, aşağıdaki üç çaprazlama stratejisinden biri eşit olasılıkla rastgele seçilerek uygulanır.

a) Çaprazlama stratejisi 1 (Uyarlanmış GPX)

Bu strateji, Bierwirth (1995) tarafından önerilen iyi bilinen genelleştirilmiş konum çaprazlaması (GPX) operatörünün uyarlanmış bir biçimini teşkil etmektedir. Klasik GPX operatöründe, ilk olarak bir alt dizi birinci ebeveyninden (yani Ebeveyn A) seçilir ve bu alt dizi, Ebeveyn A'daki pozisyonuna göre bire bir aynı pozisyonda çocuk bireye kopyalanır. Ardından, alt dizideki operasyonlarla aynı görünme sırasına sahip olan operasyonlar ikinci ebeveyninden (Ebeveyn B) silinir. Ebeveyn B'de kalan genler ise sırasıyla çocuk bireyin boş pozisyonlara sırasıyla yerleştirilir. Ancak böyle bir çaprazlama operatörüyle ebeveynlerin genetik bilgileri yalnızca tek bir vektör (ör. operasyon sırası) için çocuğa aktarılabilir.

Oysa çalışmada çözüm gösterimi operasyon sırası ve hız seviyesi olmak üzere iki vektörden oluştuğundan, anılan GPX operatörü ebeveyn genlerinden hız bilgilerini de çocuğa aktaracak şekilde revize edilmiştir ve bu operatöre Uyarlanmış GPX (UGPX) olarak adlandırılmıştır. UGPX operatöründe, yukarıda belirtilen GPX mantığı kullanılarak çocuk bireyin operasyon sırası belirlendikten sonra, operasyonların görünme sıraları da tespit edilir. Daha sonra, çocuk bireydeki her bir gen için, ilgili iş numarası hangi ebeveyninden geldiyse, o ebeveynde aynı iş numarasına ve aynı sıra numarasına sahip genin hız değeri çocuk bireye aktarılır. Örneğin Şekil 6.7 'de gösterildiği üzere, Ebeveyn A'da görünme sıraları sırasıyla 2, 1 ve 2 olan operasyonlar 1, 3 ve 2 bir alt dizi olarak seçilir ve bu operasyonlar çocuk bireye aynı pozisyonlarda kopyalanır. Ardından, Ebeveyn B'den, Ebeveyn A'nın alt dizisindeki operasyonlarla aynı görünme sıralarına sahip operasyonlar silinir ve geriye kalan operasyonlar—3, 2 ve 1— çocuk bireyinin boş pozisyonlarına aynı sıra ile yerleştirilir. Bu adımdan sonra, çocuk bireydeki

operasyonların görünme sıraları elde edilen yeni operasyon sırasına göre yeniden atanır. Çocuk bireyin hız değerleri ise şu şekilde belirlenir: örneğin, çocuk bireyin birinci genindeki operasyon numarası olan 3 Ebeveyn B'den kaynaklanmış ise ve bu operasyonun çocuk bireydeki görünme sırası 1 ise, bu gene atanan hız değeri, Ebeveyn B'de operasyon numarası 3 ve görünme sırası 1 olan genin hız değeridir, yani 3'tür. Yukarıda açıklanan UGPX operatörü ile her iki ebeveynden bir çocuk birey üretilmektedir. Önerilen NSGA-II algoritmasında her çaprazlama işleminden iki çocuk birey elde etmek amacıyla UGPX operatörü iki kez uygulanmaktadır; ilk olarak Ebeveyn A ve Ebeveyn B sırasıyla (A-B), ardından roller ters çevrilerek (B-A) tekrar çaprazlama gerçekleştirilir.

Ebeveyn A						
Operasyon Sırası	2	1	1	3	2	3
Görünme Sırası	1	1	2	1	2	2
Hız Seviyesi	3	1	2	1	2	2

Ebeveyn B						
Operasyon Sırası	~~3~~	3	2	~~2~~	1	~~1~~
Görünme Sırası	~~1~~	2	1	~~2~~	1	~~2~~
Hız Seviyesi	3	3	3	1	2	3

Çocuk Birey						
Operasyon Sırası	3	2	1	3	2	1
Görünme Sırası	1	1	1	2	2	2
Hız Seviyesi	3	3	1	2	2	3

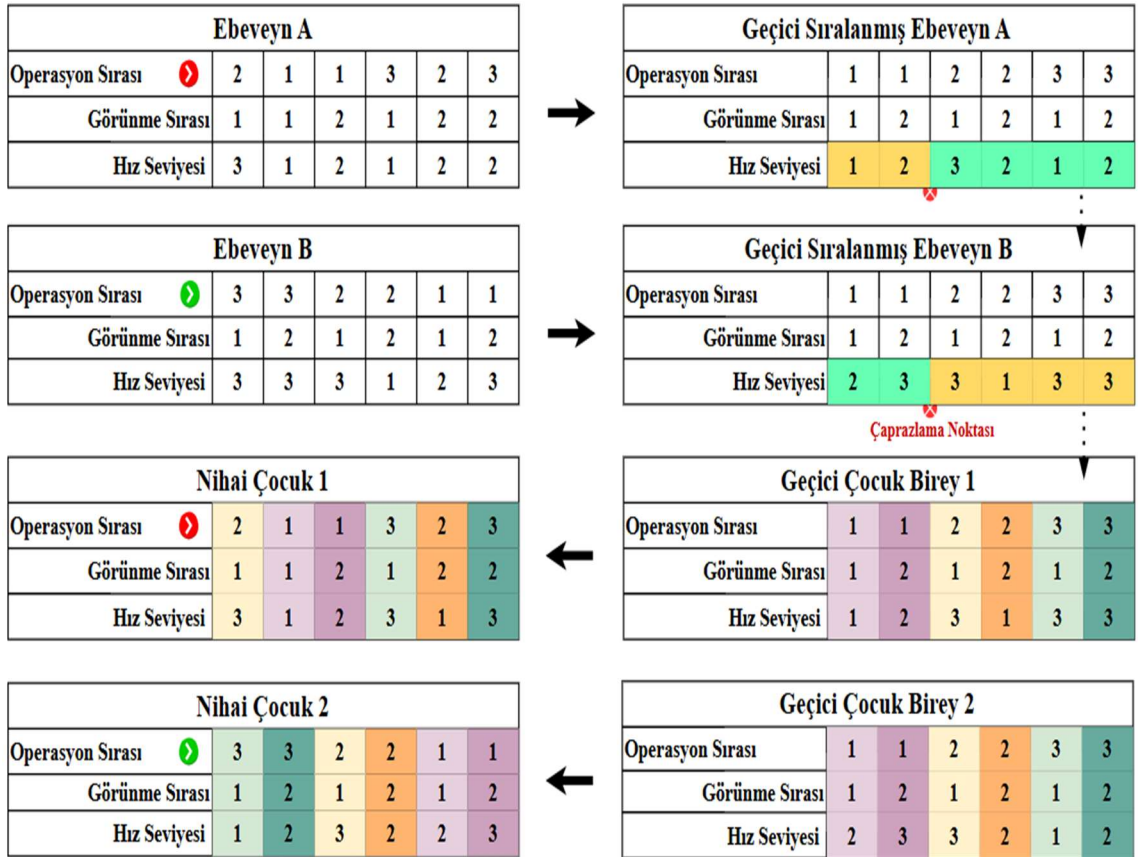
Şekil 6.7. Uyarlanmış genelleştirilmiş pozisyon çaprazlama stratejisinin gösterimi.

b) Çaprazlama stratejisi 2 (Tek noktalı hız çaprazlaması)

Bu strateji, çaprazlama sırasında ebeveynlerin operasyon sıralarını korumayı ve yalnızca hız değerleri üzerinde çaprazlama gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Ebeveynlerin hız vektörlerine konuma dayalı genetik çaprazlama operatörü doğrudan uygulandığında ciddi bir sorun ortaya çıkmaktadır. Örneğin Şekil 6.8 'de gösterilen ebeveynlerdeki ikinci pozisyonu ele alındığında; Ebeveyn A'da bu pozisyonda iş 1'in birinci operasyonu yer alırken, Ebeveyn B'de aynı pozisyonda iş 3'ün ikinci operasyonu

konumlanır. Bu pozisyonda bir ebeveynden diğerine hız değerinin aktarılması, bir işin belirli bir makinedeki operasyonuna ait hızın, muhtemelen başka bir makinede bulunan farklı bir işin operasyonuna atanması anlamına gelecektir ki bu durum genetik bilginin tutarlı bir şekilde aktarımını temsil etmemektedir. Bu nedenle, önerilen ikinci stratejide, öncelikle ebeveynlerin operasyon sırası vektörleri geçici olarak operasyon numaralarına göre artan şekilde sıralanır. Ardından görünme sırası değerleri buna uygun şekilde atanır ve hız değerleri bu sıraya uyacak şekilde yeniden düzenlenir.

Daha sonra, bu geçici olarak sıralanmış ebeveynlerin yeni düzenlenmiş hız vektörlerine klasik tek noktalı çaprazlama uygulanır. Böylelikle iki geçici çocuk birey üretilir ve her ikisi de çocuk bireyin operasyon sıraları operasyon numarasına göre sıralanırken, hız değerleri çaprazlanmış olur. Son olarak, nihai çocuklar, geçici çocuklardan alınan hız değerlerinin, ebeveynlerin özgün operasyon sıralarını koruyacak şekilde uygun pozisyonlara yeniden atanmasıyla elde edilir. Böylece, nihai çocuklar ebeveynlerin operasyon sırasını korurken, hız değerlerinin tutarlı bir genetik çaprazlamasını yansıtır.



Şekil 6.8. Tek noktalı çaprazlama stratejisinin gösterimi.

c) Çaprazlama stratejisi 3 (Her iki vektör üzerinde çaprazlama)

Strateji 3, hem operasyon sıraları hem de hız vektörleri üzerinde eşzamanlı çaprazlamalar gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır ve strateji 1 ve strateji 2'nin ardışık uygulanması şeklinde yapılandırılmıştır. İlk olarak, Strateji 1'de açıklanan GPX operatörü kullanılarak, Ebeveyn A ve Ebeveyn B, hız vektörleri dikkate alınmaksızın A-B ve B-A sıralarında çaprazlanır. Bu işlem sonucunda, operasyon sıraları elde edilmiş iki farklı çocuk birey üretilir. Ardından, aynı ebeveynlerin hız vektörleri Strateji 2'de tanımlanan tek noktalı çaprazlama ile çaprazlanır. Bu çaprazlamadan elde edilen geçici (veya sıralanmış) hız vektörleri, önceden elde edilmiş operasyon sıralarına uygun olarak çocuk bireylerin ilgili pozisyonlarına atanır ve böylece hem operasyon sıraları hem de hız değerleri uygun şekilde aktarılır. Bu yaklaşım, her iki stratejinin güçlü yönlerini birleştirerek tutarlı ve uyumlu bir genetik çaprazlamayı temin etmektedir.

6.2.3.6. Mutasyon prosedürü

Temel amacı bireyler arasındaki genetik bilgilerin birleştirilmesi ile geliştirilmiş özellikler taşıyan yeni bir nesil üretilmesi olan çaprazlama işlemi tamamlandıktan sonraki aşama olan mutasyon aşaması, süreci tamamlayan ve önem açısından geri kalmayan bir adım olarak ortaya çıkmaktadır. Zira yalnızca çaprazlamaya dayanılması, zamanla popülasyondaki bireylerin aşırı derecede benzeşmesine yol açar. Bu durum genetik çeşitliliğin azalmasına ve algoritmanın optimal olmayan yerel çözümlere takılma olasılığının artmasına neden olur. Bu noktada mutasyonun hayati bir rol üstlendiği görülür; Mutasyon, üretilen kromozomlar içindeki bazı genlere küçük ve rastgele değişiklikler uygulamakta ve böylece popülasyona yeniden çeşitlilik enjekte etme mekanizması işlevini görmektedir. Söz konusu ek çeşitlilik yalnızca arama uzayının sınırlı bölgelerinde hapsolmasını önlemekle kalmamakta, aynı zamanda pareto yüzeyine ulaşmak için yeni arama yollarının keşfedilmesine de katkı sağlamaktadır. Önerilen NSGA-II algoritmasında mutasyon, popülasyona çeşitlilik kazandıran temel bir operatördür. Bu sayede erken yakınsamadan kaçınılır ve arama uzayının kapsamlı bir şekilde keşfedilmesi sağlanır. Bu amacı gerçekleştirmek için, yeni üretilmiş bir çocuk birey üzerinde aşağıda belirtilen üç farklı mutasyon stratejisi her biri eşit olasılıkla uygulanır.

- a) Operasyon sırası vektörü üzerinde mutasyon:** Bu stratejide yalnızca operasyon sırası vektörü üzerinde mutasyon uygulanmakta olup, hız vektörü değişmeden kalmaktadır. Operasyon sırası vektöründe rastgele bir konum seçilir ve ardından bu konumdan vektörün sonuna kadar olan sıra, döngüsel olarak vektörün başına kaydırılır.
- b) Hız seviyesi vektörü üzerinde mutasyon:** Bu mutasyon stratejisi yalnızca hız seviyesi vektörüne odaklanmakta olup, operasyon sırası vektörü değişmeden kalmaktadır. İlk stratejiye benzer şekilde, hız seviyesi vektöründe rastgele bir konum seçilir ve seçilen bu konumdan vektörün sonuna kadar olan bölüm, döngüsel olarak vektörün başına kaydırılır.
- c) Her iki vektör üzerinde mutasyon:** Bu stratejide hem operasyon sırası vektörü hem de hız seviyesi vektörü eşzamanlı olarak mutasyona uğratılmaktadır. Her iki vektörde rastgele konumlar seçilir ve seçilen bu konumlardan vektörlerin sonuna kadar olan alt diziler, kendi vektörlerinin başına kaydırılır. Bu mutasyon hem operasyonların sırasını hem de bunlara karşılık gelen hız seviyelerini eşzamanlı olarak değiştirmekte ve kromozomda daha kayda değer bir değişim oluşması beklenmektedir.

6.2.3.7. Popülasyonun güncellenmesi

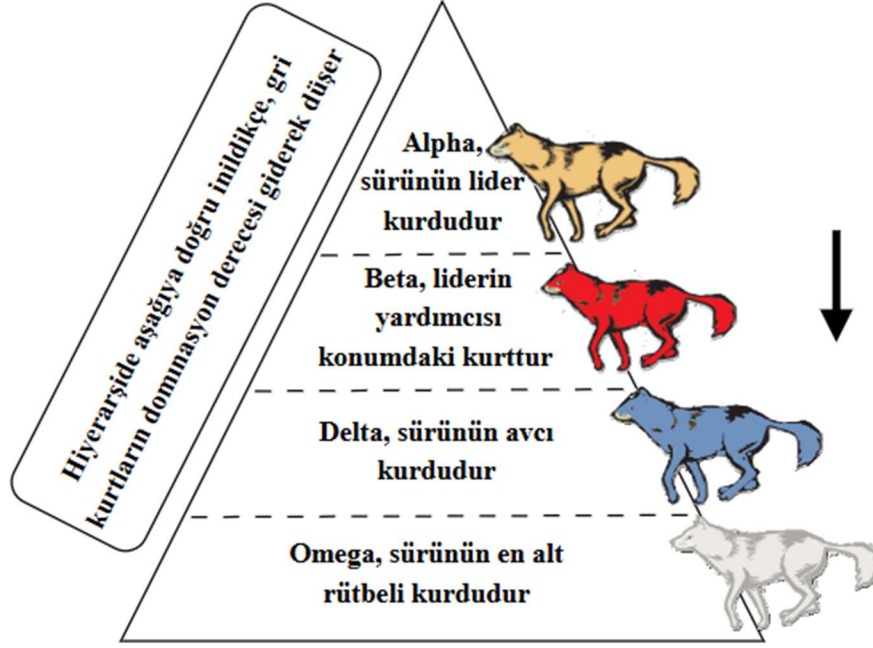
Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasını müteakiben, ebeveynler ile yeni üretilmiş çocuk bireyler birleştirilir ve iki temel kriter olan pareto yüzeyi ile yoğunluk mesafesi temelinde değerlendirilir ve sıralanır. Yeni nesli oluşturmak için bireyler öncelikle pareto rütbesinin artan sırasına göre düzenlenir. Daha sonra, her bir pareto yüzeyi içinde bireyler yoğunluk mesafesinin azalan sırasına göre sıralanır. En iyi rütbeye sahip yüzeyden başlanarak, bireyler önceden tanımlanmış popülasyon büyüklüğüne ulaşıncaya dek yeni nesle eklenir. Eğer bir yüzeyin tamamının eklenmesi söz konusu sınırı aşarsa, o yüzeyin bireyleri yoğunluk mesafesi en yüksek olanlar esas alınarak seçilmektedir. Böylelikle önerilen algoritmanın temel aşamaları incelenmiş bulunmaktadır; bu aşamalar, başlatma, değerlendirme ve seçim süreçlerinden başlayıp çaprazlama ve mutasyon uygulamaları aracılığıyla devam etmekte ve nihayet güncelleme ile yeniden değerlendirme aşamalarında sonlanmaktadır. Son olarak, aşağıdaki Çizelge 6.9 da önerilen NSGA-II algoritmasının genel yapısı adımları sunulmaktadır;

Çizelge 6.9. Önerilen NSGA-II algoritmasının genel adımları

Adım 0	Parametreleri başlat: Popülasyon büyüklüğü, nesil sayısı, çocuk popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı.
Adım 1	Başlangıç popülasyonunu oluştur.
Adım 2	Bireyleri değerlendir (amaç fonksiyonlarını hesapla)
Adım 3	Dominasyon tabanlı sıralamayı gerçekleştir.
Adım 4	Her bireyin yoğunluk mesafesini hesapla
Adım 5	$i = 1$ 'den nesil sayısına kadar aşağıdaki adımları uygula.
Adım 5.1	$j = 1$ 'den çocuk popülasyon büyüklüğünün yarısına kadar aşağıdaki adımları uygula
Adım 5.1.1	İki ebeveyn seç.
Adım 5.1.2	Üç çaprazlama stratejisinden birini eşit olasılıkla rastgele seç.
Adım 5.1.3	Seçilen çaprazlama stratejisini uygula ve iki çocuk oluştur.
Adım 5.1.4	Her bir çocuk için aşağıdaki adımları uygula.
	- Eğer rastgele sayı ($U [0,1]$) $<$ mutasyon oranı ise.
	- Üç mutasyon stratejisinden birini eşit olasılıkla rastgele seç.
	- Seçilen mutasyon stratejisini çocuğa uygula.
Adım 5.2	Çocukları Değerlendirin
Adım 5.3	Ebeveyn ve çocuk popülasyonlarını birleştirin.
Adım 5.4	Dominasyon tabanlı sıralamayı gerçekleştir.
Adım 5.5	Her bireyin yoğunluk mesafesini hesapla
Adım 5.6	Popülasyonu güncelle.
Adım 6	En iyi pareto yüzeyi raporla.

6.2.4. Çok amaçlı gri kurt optimizasyon algoritma (MOGWO)

Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisinden ve iş birliğine dayalı avlanma davranışlarından ilham alan, popülasyon tabanlı, akıllı bir meta-sezgisel algoritmadır. Diğer sürü zekâsı algoritmalarına benzer şekilde, GWO sosyal liderlik ve kolektif karar alma süreçlerini taklit ederek arama sürecinde keşif ile sömürü arasında denge sağlar. GWO, aday çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu ile başlar ve bu aday çözümler mecazi olarak kurtlar olarak adlandırılır. Bilindiği üzere, gri kurtlar doğada çoğunlukla sürüler halinde yaşar ve tipik olarak alfa (α), beta (β), delta (δ) ve omega (ω) olmak üzere dört ana kategoriye dayalı bir sosyal hiyerarşi sergilerler (Bkz. Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Gri kurtların liderlik hiyerarşisi (Mirjalili ve ark., 2014)

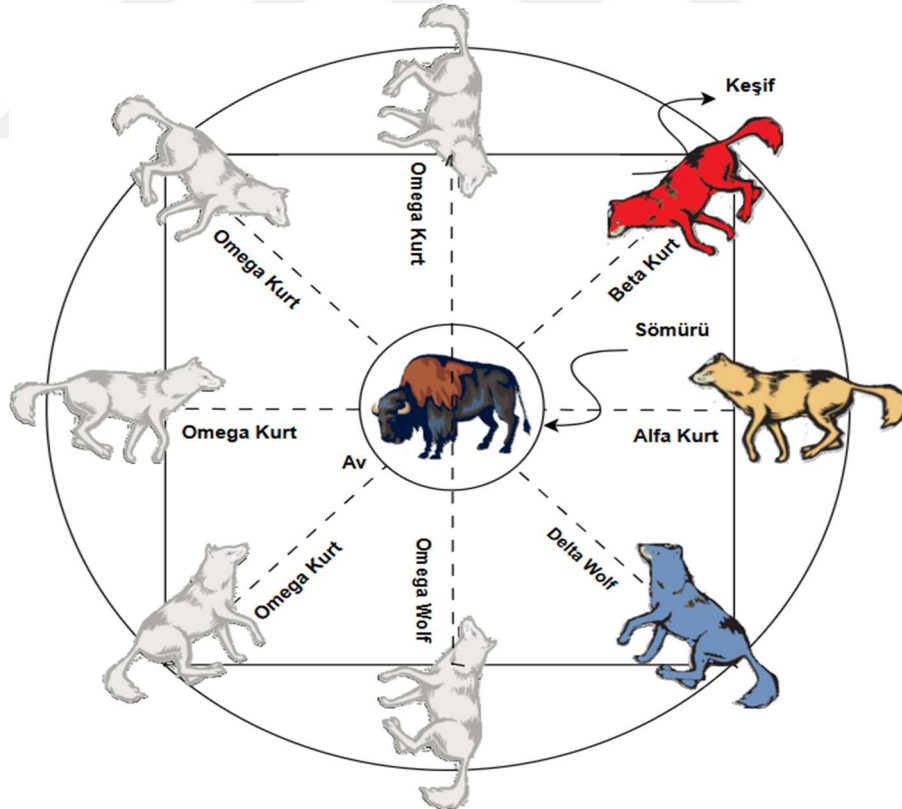
Alfa kurt (α) sürünün lideri olup diğer üyeleri yönlendirmede en yetkin birey olarak öne çıkmaktadır; av zamanları, dinlenme yerleri ve uyku saatleri gibi kararların alınmasında genellikle alfa (α) söz sahibidir. Beta kurt (β) hiyerarşide ikinci konumda yer almakta, alfa (α)'ya liderlikte yardım etmekte ve gerektiğinde lideri ikame edecek en uygun aday niteliğini taşımaktadır. Beta (β) aynı zamanda alfa (α) dan gelen talimatları uygular, alt rütbeli kurtları yönlendirmekte ve alfa (α) ile ilgili haberleşmeyi sağlamaktadır. Delta kurtlar (δ) hiyerarşinin üçüncü basamağını temsil eder; alfa (α) ve beta (β)'nın altında, fakat omega (ω)'lardan üstün bir konumda bulunmaktadır. Bu grup, keşifçileri, nöbetçileri, yaşlıları, avcılar ve bakıcıları içermektedir. Keşifçiler bölge sınırlarını izleyerek sürüyü tehlikelere karşı uyarmakta; nöbetçiler sürüyü korumakta, yaşlı kurtlar daha önce alfa (α) veya beta (β) rollerini üstlenmiş deneyimli bireyler olabilmektedir; avcılar alfa (α) ve beta (β)'ya yiyecek temininde yardımcı olmakta; bakım görevlileri ise hasta, yaralı veya zayıf kurtlarla ilgilenmektedir (Kaçtı, 2021)

Omega kurtlar (ω), hiyerarşide en düşük konumda bulunur ve sürünün çoğunluğunu oluşturur; onların başlıca rolü grup içi sosyal ilişkileri düzenlemek ve yavruların esenliğini sağlamaktır.

(Mirjalili ve ark., 2014) bu davranış modelini matematiksel bir çerçeveye dönüştürmüş olup; yapay popülasyondaki bireyler (kurtlar) uygunluk değerlerine göre

sıralanmış ve en iyi üç birey sırasıyla *alfa* (α), *beta* (β) ve *delta* (δ) kurtlar olarak belirlenmiştir.

Alfa kurtu (α) mevcut en iyi çözümü temsil eder ve karar verme sürecine liderlik eder. Beta (β) ve delta (δ) kurtlar, aramayı yönlendirmede alfa (α)'ya yardımcı olurken, diğer kurtlar (Omega, ω) bu üç üstün kurdun rehberliğini izler. GWO algoritması, kurtların avlanma davranışını üç ana aşama ile simüle etmektedir: avı arama, kuşatma ve saldırıya geçme (Mirjalili ve ark., 2014). Arama aşamasında kurtlar, çözüm uzayını farklı yönlerde keşfederek çeşitlilik sağlar ve bu durum keşif sürecini destekleyerek erken yakınsamayı önler. Kuşatma aşamasında kurtlar, alfa (α), beta (β) ve delta (δ) kurtların konumlarına göre pozisyonlarını ayarlar ve böylelikle arama uzayında umut vadeden bölgelere daha yakınlaşabilir. Son olarak, saldırı aşamasında kurtlar keşif aralığını daraltarak optimal çözüme doğru yakınsar ve en iyi bilinen çözümler etrafındaki aramayı hassaslaştırır. Bu yapılandırılmış ve uyarlanabilir avlanma davranışı, GWO'nun keşif ile sömürü arasında etkili bir denge kurmasını sağlar ve onu karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde güçlü bir araç haline getirir (Bkz. Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Gri kurt sürüsü için sosyal hiyerarşinin simülasyonu örneği.

Gri Kurt Optimizasyonu algoritmasının genel yapısını özetleyen temel adımları Çizelge 6.10'da sunulmaktadır.

Çizelge 6.10. GWO algoritmasının genel adımları

Adım 0	Popülasyonu başlat.
Adım 1	Bireyleri değerlendir (amaç fonksiyonlarını hesapla).
Adım 2	$i = 1$ 'den iterasyon sayısına kadar aşağıdaki adımları uygula.
Adım 2.1	Bireyleri sınıflandır.
	- <i>Alfa kurt</i> : şimdiye kadarki en iyi çözüm.
	- <i>Beta kurt</i> : ikinci en iyi çözüm.
	- <i>Delta kurt</i> : üçüncü en iyi çözüm.
	- <i>Omega kurt</i> : kalan popülasyon.
Adım 2.2	Her bir Omega kurt için aşağıdaki işlemleri yap.
Adım 2.2.1	Kurdun konumunu, Alfa, Beta ve Delta'nın konumlarını kullanarak güncelle.
Adım 2.2.2	Kurdun yeni konumunu değerlendir.
Adım 2.3	Algoritma parametrelerini güncelle.
Adım 3	En iyi pareto çözümlerini raporla.

Çok amaçlı optimizasyona uyarlamak üzere, Mirjalili ve ark. (2016) gri kurt optimizasyonu algoritmasının iyi dağıtılmış bir pareto-optimal çözüm kümesi keşfetme yeteneğini artıran iki temel bileşen önermiştir. İlk bileşen, optimizasyon süreci boyunca tespit edilen domine edilmeyen çözümleri saklamak ve gerektiğinde geri çağırmak için kullanılan sabit boyutlu bir dış arşivdir. Bu arşiv, şimdiye kadar bulunan en iyi domine edilmeyen çözümleri korumakla kalmaz; aynı zamanda pareto yüzeyi boyunca çözüm çeşitliliğini sürdürmek amacıyla uyarlanabilir bir ızgara mekanizması kullanır. Izgara, amaç uzayını hiper-kutulara böler; bu sayede algoritma, seçim sırasında seyrek popülasyonlu bölgeleri tercih ederek çözümlerin kümelenmesini önler. İkinci bileşen, lider seçme stratejisidir. Temel GWO'da lider kurtlar (α , β ve δ) mevcut popülasyondan seçilirken, MOGWO algoritmasında bu liderler arşivden belirlenir. Bu strateji, arama sürecinin rehberliğini yüksek kaliteli, domine edilmeyen çözümlere dayandırır; bu da gerçek pareto yüzeyine yakınsamayı güçlendirir ve çözüm çeşitliliğini korur.

Bu çalışmada uygulanan MOGWO algoritmasında, Mirjalili ve ark. (2016) tarafından önerilen hem arşiv yönetimi hem de lider seçimi stratejileri benimsenmiştir. Bu güçlendirmeler, algoritmanın çok amaçlı problemleri etkili bir şekilde ele almasını sağlar; amaç uzayının keşfini teşvik ederken aynı zamanda domine edilmeyen çözümlere yakınsamayı garanti eder. Bu nedenle, incelenen problemi çözmek için uygun bir yaklaşım sunar. MOGWO algoritması çalışmada şu şekilde uygulanmaktadır:

Çözüm kodlaması, başlangıç popülasyonunun oluşturulması ve amaç fonksiyonu değerlendirmesi gibi birkaç alt süreç hem NSGA-II hem de MOGWO algoritmaları için ortaktır; bu bileşenler NSGA-II ile birlikte zaten ayrıntılı şekilde tanımlandığından burada tekrar ele alınmayacaktır.

6.2.4.1. Sabit boyutlu dış arşiv

Daha önce açıklandığı üzere, önerilen MOGWO algoritmasındaki arşiv, optimizasyon süreci boyunca üretilen domine edilmeyen çözümleri saklayan dinamik bir listedir. Arşivin amacı, pareto yüzeyinin yüksek kaliteli bir yaklaşık temsilini sürdürmektir. Her yeni çözüm üretildikten sonra algoritma, dominasyon kriterlerine göre arşive dahil edilip edilmeyeceğini belirler.

Eğer yeni çözüm, arşivde hâlihazırda bulunan herhangi bir çözüm tarafından domine ediliyorsa, bu çözüm elenir. Ancak, tüm arşivlenmiş çözümlere göre domine edilmeyen bir çözüm ise arşive eklenir. Bu durumda, yeni çözüm tarafından baskılanan mevcut arşiv üyeleri kaldırılır ve yalnızca domine edilmeyen çözümlerin korunması sağlanır. Arşiv kapasite sınırına ulaştığında ve yeni bir çözüm arşive girmeye uygun olduğunda, arşiv bir ızgara mekanizması uygular. Özellikle, yeni çözüm geçici olarak arşive eklenir ve ardından algoritma, çözüm yoğunluğunu değerlendirerek amaç uzayını her iki amacın minimum ve maksimum değerleri temel alınarak 10×10 'luk bir ızgaraya böler. Her bir ızgara hücrelerine düşen çözüm sayısı hesaplandıktan sonra, en kalabalık hücreden yani en fazla çözüme sahip ızgaradan rastgele bir çözüm seçilerek yeni gelen domine edilmeyen çözüm için yer açılır. Eğer birden fazla hücre en yüksek çözüm sayısına sahipse, bu hücrelerden biri rastgele seçilir ve ardından seçilen hücreden rastgele bir çözüm çıkarılır. Bu süreç, pareto yüzeyinin yoğun bölgelerinde aşırı kalabalığı önler ve arşivdeki çözümler arasında çeşitliliğin korunmasına katkı sağlar.

6.2.4.2. Lider kurtların (Alfa, beta, delta) seçilmesi

Önerilen MOGWO algoritmasındaki lider seçimi mekanizması, arama sürecine yön veren çeşitliliği öncelikli hale getirmek amacıyla titizlikle tasarlanmıştır. Lider kurtlar, arşivde saklanan çözüm uzayının en az kalabalık bölgelerinden seçilerek aramanın daha az keşfedilmiş alanlara yönlendirilmesi sağlanır.

İlk olarak, arşivdeki her bir i çözümü için, $Crowd_i$ olarak gösterilen bir kalabalıklık değeri atanır. Bu değer, i çözümü ile aynı ızgara hücrelerinde bulunan diğer çözümlerin sayısını ifade eder.

Tüm çözümler için $Crowd_i$ değerleri hesaplandıktan sonra liderler aşağıdaki prosedüre göre seçilmektedir:

En az kalabalık ızgara hücrelerinde bulunan, yani minimum $Crowd_i$ değerine sahip tüm çözümler, lider aday listesine dahil edilir. Eğer birden fazla ızgara hücresinde yalnızca bir çözüm bulunuyorsa, bu çözümlerin tamamı listeye eklenir. Bu bağlamda, en az kalabalık ızgara hücrelerine ilişkin üç olası durum söz konusudur:

- Durum 1: Tek aday çözüm. Lider aday listesinde yalnızca bir çözüm varsa, bu çözüm alfa kurt (α) olarak seçilir. Beta (β) kurdun belirlenmesi için, alfa (α) kurdun bulunduğu ızgara hücresi hariç tutulur ve ikinci en az kalabalık ızgara hücresinden aday seçilir. Beta kurt (β) seçildikten sonra, delta kurt (δ) için benzer bir süreç uygulanır.
- Durum 2: İki aday çözüm. Lider aday listesinde iki çözüm bulunuyorsa, bunlardan biri rastgele alfa (α), diğeri beta (β) olarak seçilir. Daha sonra, en az kalabalık ızgara hücresi veya hücreleri hariç tutularak delta kurt (δ) için adaylar belirlenir.
- Durum 3: Üç veya daha fazla aday çözüm. Aday listesi üç veya daha fazla çözüm içeriyorsa, bunlardan üçü rastgele seçilerek sırasıyla alfa (α), beta (β) ve delta (δ) kurtlar olarak atanır.

Son olarak, lider kurtların seçiminin, alfa (α), beta (β) ve delta (δ) olmak üzere üç lider kurt belirlenene kadar sürdüğü belirtilmelidir.

6.2.4.3. Kurtların pozisyonlarının güncellenmesi

Orijinal GWO ve MOGWO algoritmaları, kurtların pozisyonlarını reel sayı vektörleriyle temsil ederek öncelikle sürekli optimizasyon problemlerine yöneliktir. Ancak bu çalışmada ele alınan problem doğası gereği kombinatoriyal olduğundan, çözüm yaklaşımının uyarlanması gerekmektedir. Bu zorluğun aşılabilmesi için MOGWO'nun pozisyon güncelleme mekanizması, problemin kombinatoriyal yapısına uygun şekilde aşağıda açıklandığı üzere uyarlanmıştır. Özellikle, liderlerin popülasyondan değil arşivden seçilmesi nedeniyle, popülasyondaki her çözüm bir omega (ω) kurdu olarak kabul edilir ve tüm bireyler algoritmanın her iterasyonunda pozisyon güncelleme sürecine tabi tutulur.

Her i bireyi için pozisyon güncelleme süreci şu şekilde ilerlemektedir:

- Öncelikle, birey i 'nin pozisyonunu güncelleyecek olan lider, daha önce belirlenmiş alfa (α), beta (β) ve delta (δ) kurtları arasından eşit olasılıkla rastgele

seçilir. Bu seçilen lider Ebeveyn A olarak kabul edilirken, birey i 'nin mevcut çözümü Ebeveyn B olarak değerlendirilir.

- Daha sonra, NSGA-II algoritmasında daha önce tanımlanan çaprazlama stratejilerinden biri eşit olasılıkla rastgele seçilir ve uygulanır. Bu bağlamda, algoritmanın yalnızca tek bir çözümün bir kurdun güncellenmiş pozisyonunu temsil etmesini gerektirmesi nedeniyle, çaprazlama stratejilerinin uygulanmasında bazı uyarlamalar yapılmıştır. Özellikle, çaprazlama stratejisi 1'de işlem yalnızca A–B yönünde gerçekleştirilir; yani lider Ebeveyn A, ilgili kurdun mevcut çözümü ise Ebeveyn B olarak kullanılır ve B–A yönü ihmal edilir. Benzer şekilde, çaprazlama stratejisi 2'de normalde iki çocuk birey üretilse de yalnızca ilk çocuk birey dikkate alınır.
- Elde edilen yeni çaprazlanmış çocuk, eğer birey i 'nin mevcut çözümünü domine ederse, kurt i 'nin yeni pozisyonu olarak kabul edilir. Aksine, çocuk mevcut çözüm tarafından domine edilirse, NSGA-II algoritmasında önerilen mutasyon stratejilerinden biri, eşit olasılıkla rastgele seçilerek çocuk bireye uygulanır.
- Mutasyonla elde edilen çözüm hâlâ mevcut çözümü domine edemiyorsa, bu çözüm elenmekte ve bireyin mevcut pozisyonu değiştirilmeden kalmaktadır. Ancak mutasyon sonucu elde edilen çözüm mevcut çözümü domine ederse, bu çözüm kurt i 'nin güncellenmiş pozisyonu olarak kabul edilir.
- Herhangi bir yeni çözümün kabulü (yani kurt i 'nin pozisyonunun güncellenmesi) durumunda algoritma, bu çözümün arşive eklenip eklenmeyeceğini kontrol eder ve eğer eklenmeye uygunsa arşiv buna göre güncellenir; böylece yalnızca domine edilmeyen ve çeşitliliği koruyan çözümler muhafaza edilir.

Önerilen MOGWO algoritmasının yapısını özetleyen adımlar Çizelge 6.11'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.11. Önerilen MOGWO algoritmasının genel adımları

Adım 0	Parametreleri başlat: Popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı, Arşiv boyutu.
Adım 1	Başlangıç popülasyonunu oluştur
Adım 2	Bireyleri değerlendir (amaç fonksiyonlarını hesapla)
Adım 3	Arşivi güncelle
Adım 4	$i = 1$ 'den iterasyon sayısına kadar aşağıdaki adımları uygula.
Adım 4.1	Arşivden liderleri (alfa, beta, delta) seç.
Adım 4.2	$j = 1$ 'den popülasyon büyüklüğüne kadar aşağıdaki adımları uygula.
Adım 4.2.1	Liderlerden birini eşit olasılıkla rastgele olasılıkla rastgele Ebeveyn A olarak ata.
Adım 4.2.2	$Kurt j$ 'yi Ebeveyn B olarak ata.
Adım 4.2.3	Üç çaprazlama stratejisinden birini eşit olasılıkla rastgele seç.
Adım 4.2.4	Seçilen çaprazlama stratejisini uygula ve $kurt j$ 'nin yeni pozisyonuna göre bir çocuk oluştur.
Adım 4.2.5	$Kurt j$ 'nin yeni pozisyonunu değerlendir.
Adım 4.2.6	Eğer $kurt j$ 'nin yeni pozisyonu, $kurt j$ 'nin mevcut pozisyonunu domine ederse.
	- Yeni pozisyonu mevcut pozisyon olarak kabul et.
	Aksi halde
	- Üç mutasyon stratejisinden birini eşit olasılıkla rastgele seç.
	- Seçilen mutasyon stratejisini çocuğa (yeni pozisyona) uygula.
Adım 4.2.6.1	$Kurt j$ 'nin (mutasyona uğramış) yeni pozisyonunu değerlendir.
Adım 4.2.6.2	Eğer $kurt j$ 'nin yeni pozisyonu, $kurt j$ 'nin mevcut pozisyonunu domine ederse.
	- Yeni pozisyonu mevcut pozisyon olarak kabul et.
	Aksi halde
	- Yeni pozisyonu dikkate alma (yani $kurt j$ mevcut pozisyonunda kalır).
Adım 4.2.7	Eğer $kurt j$ 'nin yeni pozisyonu kabul edilirse
	- Arşivi güncelle
Adım 5	Arşivi raporla

7. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde, SÇA-ATÇ problemi üzerinde uygulanmış olan artırılmış ε -kısıt yöntemi (Augmecon), NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının elde ettiği deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Amaç, her bir yaklaşımın farklı problem boyutları ve karmaşıklık düzeylerindeki performansını değerlendirmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda onların güçlü yönlerini ve kısıtlarını da ortaya koymaktır. Bölüm, problemin test örneklerinin üretilmesinde izlenen prosedürün açıklanmasıyla başlamaktadır. Bunu takiben, değerlendirmede kullanılan performans ölçütleri özetlenmiş biçimde Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Geliştirilen yöntemlerin performansını değerlendirmek için kullanılan ölçütler

İfade	Açıklama
HV	Çözümlerin kapsadığı ve belirli bir referans noktası ile sınırlanan hacmi ölçen bir performans göstergesidir.
QM	Bütün algoritmalar ile elde edilen çözümlerin tamamı birlikte değerlendirildiğinde, belirli bir algoritma tarafından bulunan domine edilmeyen çözümlerin sayısının, toplam domine edilemeyen çözüm sayısına oranıdır.
NDS	Her bir çözüm yaklaşımının birbirinden bağımsız olarak elde ettiği domine edilmeyen çözüm sayısıdır.
CPU	Nihai pareto yüzeyinin elde edilmesi için gereken hesaplama süresidir.

Ardından, küçük boyutlu problemlerden başlanarak bu yaklaşımların daha basit durumlarda gösterdikleri davranışlar değerlendirilmekte; daha sonra orta ve büyük boyutlu problemler genişletilerek ölçeklenebilirlikleri ve karmaşık senaryolardaki dayanıklılıkları incelenmektedir. Son olarak, teslim tarihi parametresinin problem üzerindeki etkisi ele alınmakta ve bu parametrenin algoritmaların davranışı ile elde edilen çözümlerin kalitesi üzerindeki etkisi vurgulanmaktadır.

7.1. SÇA-ATÇ Problemi için Test Problemlerinin Üretilmesi

Bu çalışmada ele alınan atölye tipi çizelgeleme ortamının, özellikle işlem hızı, enerji tüketimi, boшта kalma süresi yönetimi ve iş tamamlama zamanları arasındaki çok boyutlu etkileşimlerden kaynaklanan yüksek karmaşıklığı dikkate alındığında, geleneksel olmayan ve zengin parametre konfigürasyonlarına sahip örneklerin tasarlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, önerilen yöntemlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla toplam 50 problem örneği üretilmiştir. Bu örnekler, operasyon sayısına göre sistematik olarak küçük, orta ve büyük boyutlu olmak üzere üç

gruba ayrılmıştır. Kapsamlı bir performans değerlendirmesini sağlamak için, farklı konfigürasyonlara sahip 12 küçük boyutlu örnek üretilmiştir: (4×3, 4×4, 5×3, 5×4, 5×5, 6×5, 7×5, 7×6, 7×7, 8×6, 10×3 ve 10×4); burada ilk değer iş sayısını, ikinci değer ise makine sayısını göstermektedir. Yeni üretilen örneklerle ek olarak, Çizelge 7.2’de sunulduğu üzere, orta ve büyük boyutlu örnekler, literatürde yaygın olarak referans verilen tanınmış karşılaştırmalı veri setlerinden uyarlanmıştır.

Çizelge 7.2. Farklı kategorilerde oluşturulan örnekler

Kategori	Boyutu (N×M)	Problem ID	Kaynak
Orta boyutlu	10×5	la01-la02-la03	Lawrence (1984)
	10×10	abz5-abz6-ft10- la16-orb01-orb02	Adams ve ark. (1988). (Muth, 1963) Lawrence (1984) (Applegate ve Cook, 1991)
	15×5	la06-la07-la08	Lawrence (1984)
	15×10	la21-la22-la23-la24-la25	Lawrence (1984)
	20×5	ft20-la11-la12	(Muth, 1963) Lawrence (1984)
Büyük boyutlu	15×15	la36-la37-ta01-ta02	Lawrence (1984) (Taillard, 1993)
	20×10	la26-la27-svv01-svv02	Lawrence (1984) . Storer ve ark. (1992)
	20×15	abz7-svv06-ta11-ta12	Adams ve ark. (1988). Storer ve ark. (1992) (Taillard, 1993)
	20×20	ta21-yn1	(Taillard, 1993) Yamada ve Nakano (1992)
	30×10	la31-la32	Lawrence (1984)
	30×15	ta31-ta32	(Taillard, 1993)

Bu veri setleri genellikle yalnızca temel atölye tipi çizelgeleme bileşenlerini yani makine sıralamaları ve işlem sürelerini içermektedir. Bu nedenle, çalışmanın özel gereksinimlerini karşılamak amacıyla teslim tarihleri, boşta kalma süreleri ile ilgili eşik değerleri ve işlem ile bekleme modlarındaki anlık güç değerleri gibi diğer parametreler sistematik olarak üretilmiştir.

Bu parametrelerin her birinin üretilmesinde izlenen ayrıntılı metodoloji Çizelge 7.3’te gösterilmektedir Buna karşın, tüm küçük boyutlu örnekler tamamen baştan üretilmiştir.

Çizelge 7.3. Parametreleri oluşturmak için kullanılan metodoloji.

Parametre	Seçilen parametrenin seviyesi		
Makine sıralaması	Küçük boyutlu örnekler: rastgele, orta ve büyük boyutlu örnekler: literatürden		
Eşik değeri	Her makine k için $U[5 - 15]$ aralığında değer		
Bekleme modu anlık gücü (SM_k)	Her makine k için $U[1 - 5]$ aralığında değer		
Teslim tarihi	Her iş I için, $\sum_k AT_{ik3} \times U[1 - 1,5]$		
	Hız Seviyesi 1 (Düşük)	Hız Seviyesi 2 (Orta)	Hız Seviyesi 3 (Yüksek)
İşlem Süresi	AT_{ik1}	AT_{ik2}	AT_{ik3}
Küçük boyutlu	$U[1,100]$	$AT_{ik1} / 1,1$	$AT_{ik1} / 1,3$
Orta boyutlu	Literatür		
Büyük boyutlu	Literatür		
İşlemin anlık gücü (P_{kh})	$P_{k1} = SM_k \times 2$	$P_{k2} = P_{k1} \times 1,3$	$P_{k3} = P_{k1} \times 2,2$

Endüstriyel makineler için bekleme modundaki anlık güç tüketimi genellikle Behrendt ve ark. (2012) tarafından bildirildiği üzere 2 ila 3,7 kWh arasında tahmin edilmektedir. Makine boyutu ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebileceğinden, çalışmada bu değer 1 ila 5 kWh arasında değiştirilmiştir. Buna karşılık, işleme modundaki anlık güç tüketiminin bekleme modunun yaklaşık iki katı olduğu kabul edilmiştir (yani $P_k = SM_k \times 2$). Bu durum, boşta kalma sürelerinin minimize edilmesi ve makine kullanımının optimize edilmesinin, gereksiz enerji tüketiminin azaltılmasında kritik önemini yansıtmaktadır.

Ekipmanın tasarım kapasitesi sınırları dahilinde kaldığı sürece, endüstriyel makineler için maksimum çalışma hızı artışının yaklaşık %30 civarında olacağı öngörülmektedir. Bu hız modülasyonu, hız ile güç tüketimi arasındaki kübik ilişki göz önünde bulundurulduğunda özellikle önemlidir. Simpson ve Marchi (2013) tarafından gösterildiği üzere, makine güç tüketimi hızın küpü ile orantılı olarak artmaktadır; yani makine hızı %10 artarsa güç tüketimi yaklaşık %33 oranında yükselmektedir. Buna ek olarak, makine hızı ile işlem süresi arasındaki ilişki genellikle doğrusal olarak tanımlanır; bu da çalışma hızındaki artışın işlem süresinde orantılı bir azalmaya yol açtığı anlamına gelir (Groover, 2010). Bu doğrultuda, test örneklerinin oluşturulmasında her makinenin üç farklı hız seviyesinde çalışabileceği varsayılmaktadır. Hız seviyesi 1’de makineler normal (baz) hızda çalışmaktadır. Hız seviyeleri 2 ve 3 ise sırasıyla normal hızdan %10 ve %30 daha yüksek çalışma hızlarına karşılık gelmektedir. Hız ile enerji tüketimi arasındaki kübik ilişki dikkate alınarak, bu daha yüksek hız seviyelerinde enerji tüketiminin normal çalışma hızına (Seviye 1) göre, Seviye 2’de yaklaşık 1,3 kat (yani $1,3^3$), Seviye 3’te ise yaklaşık 2,2 kat (yani $1,3^3$) arttığı varsayılmıştır. Meta-sezgisel

algoritmaların etkinliği, kontrol parametrelerinin doğru ayarlanmasına büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada, her bir algoritma çeşitli parametre ayarları altında test edilmiş ve ardından en iyi performansı sağlayan ayarlar ampirik analiz yoluyla belirlenmiştir. Her bir algoritma için belirlenen en uygun parametre ayarları Çizelge 7.4'te sunulmuştur.

Çizelge 7.4. Algoritmaların en uygun parametre seviyeleri

Parametre	NSGA-II	MOGWO
Popülasyon Büyüklüğü	$N \times M \times 15$	$N \times M \times 15$
Nesil Sayısı	$N \times M \times 5$	$N \times M \times 15$
Çocuk Sayısı	Popülasyon Büyüklüğü / 10	-
Mutasyon Oranı	0,1	-
Arşiv Limiti	-	$N \times M \times 4$

7.2. SÇA-ATÇ Problemi için Değerlendirme Ölçütleri

Literatürde, çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının göreceli performanslarını değerlendirmek için çok sayıda ölçüt önerilmiştir. Bu doğrultuda, Audet ve ark. (2021) literatürde sunulan 63 farklı çok amaçlı performans ölçütünü kapsamlı bir incelemeye tabi tutmuş ve bu ölçütleri özelliklerine göre dört ana kategoriye ayırmıştır: kardinalite (nicelik), yakınsama, dağılım ve yayılım. Ayrıca, bu analizde, hiperhacim (HV) ölçütü, çözüm kalitesini değerlendirmede en yaygın kullanılan gösterge olarak öne çıkmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada HV ölçütüne önemli ölçüde vurgu yapılmış ve temel bir performans göstergesi olarak benimsenmiştir.

Zitzler ve Thiele (1999) tarafından ilk kez önerilen HV ölçütü, iki amaçlı problemler için üstten referans noktası (yani nadir nokta) ve alttan pareto çözümleriyle sınırlanan alanın büyüklüğünü temsil etmektedir. Geçerli ve tutarlı bir karşılaştırma yapabilmek için referans noktasının konumunun belirlenmesi gerekmektedir. Tüm çözümler tarafından baskılanan referans noktasının, karşılaştırılan tüm yöntemler için aynı olması zorunludur. Yüksek HV değerinin, pareto yüzeyine daha iyi bir yakınsama sağladığı ve yüzeyin şeklini daha doğru yansıttığı belirtilmelidir. Çizelge 7.5, iki amaçlı bir problem için HV hesaplanmasında izlenen adımları göstermekte olup, burada N domine edilmeyen çözümlerin sayısını ifade etmektedir (Ferrández ve ark., 2017; Yağmur, 2021).

Çizelge 7.5. HV değerinin hesaplanması

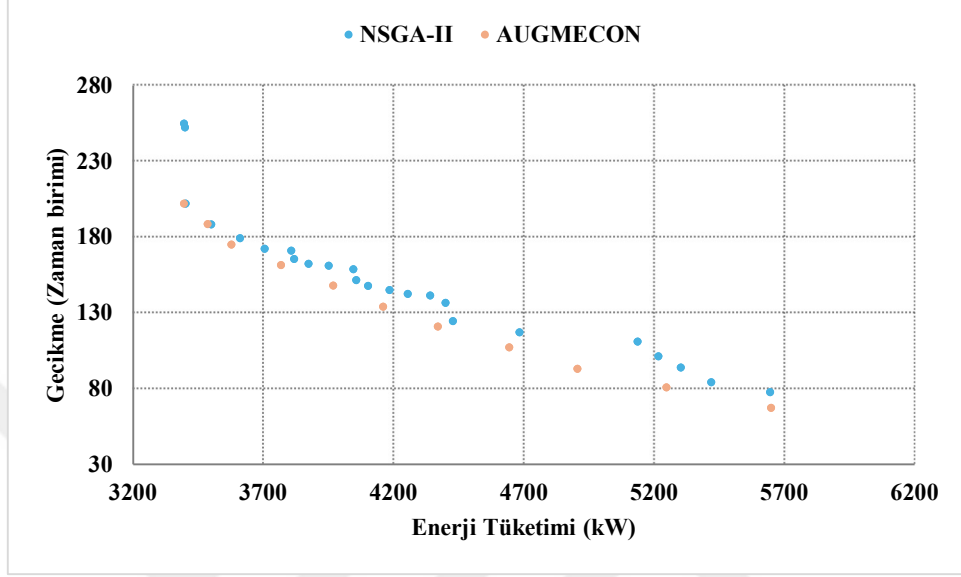
Adım 0: Referans noktasını $Z^{ref} = (f_1^{ref}, f_2^{ref})$ tanımlanır. Başlangıç değeri olarak $HV = 1$ atanır ve sayacı $i = 0$ olarak başlatılır.	
Döngü: $i \leq (N - 1)$ koşulu sağlandığı sürece aşağıdaki işlem uygulanır	
Adım 1: $HV = HV + (f_2^{ref} - f_2^i)(f_1^{i+1} - f_1^i)$	
Döngü sonu: $i = N$ olduğunda bir sonraki işleme geçilir:	
Adım 2: $HV = HV + (f_2^{ref} - f_2^n)(f_1^{ref} - f_1^n)$	
Adım 3: HV değerini raporla	

Örneğin, bu adımlar esas alınarak, önceki bölümde 6.1.1’de sunulan açıklayıcı (4×3) boyutlu problem örneği üzerinde Augmecon yöntemi ve NSGA-II algoritma ile elde edilen çözümlere ait HV değerleri hesaplanmıştır. İlk adımda, referans noktalarının (f_1^{ref} ve f_2^{ref}) değerleri sırasıyla 5650,69 ve 256 olarak belirlenmiştir. Elde edilen ayrıntılı sayısal sonuçlar Çizelge 7.6’da sunulurken, ilgili pareto yüzeylerinin görsel temsili Şekil 7.1’de verilmektedir.

Çizelge 7.6. HV değerlerinin hesaplanması

Augmecon	f_1	f_2	$f_2^{ref} - f_2^i$	$f_1^{i+1} - f_1^i$	$(f_2^{ref} - f_2^i)(f_1^{i+1} - f_1^i)$
	3396	202	54	91,1	4919,4
	3487,1	188,54	67,46	91,55	6175,963
	3578,65	175,08	80,92	190,04	15378,04
	3768,69	161,62	94,38	199,77	18854,29
	3968,46	148	108	192,44	20783,52
	4160,9	134,01	121,99	209,56	25564,22
	4370,46	121	135	274,27	37026,45
	4644,73	107,16	148,84	261,73	38955,89
	4906,46	93,08	162,92	341,06	55565,5
	5247,52	80,78	175,22	402,17	70468,23
	5649,69	67,38	188,62	1	188,62
HV Değeri					293880,1
NSGA-II	f_1	f_2	$f_2^{ref} - f_2^i$	$f_1^{i+1} - f_1^i$	$(f_2^{ref} - f_2^i)(f_1^{i+1} - f_1^i)$
	3396	255	1	3,82	3,82
	3399,82	252,45	3,55	2,18	7,739
	3402	202	54	99,27	5360,58
	3501,27	188,45	67,55	110,58	7469,679
	3611,85	179,27	76,73	94,18	7226,431
	3706,03	172,36	83,64	101,79	8513,716
	3807,82	171,09	84,91	11,69	992,597
	3819,51	165,55	90,45	55,22	4994,649
	3874,73	162,36	93,64	77,07	7216,835
	3951,8	161,01	94,99	94,23	8950,908
	4046,03	158,73	97,27	10,74	1044,68
	4056,77	151,58	104,42	45,69	4770,95
	4102,46	147,85	108,15	82,11	8880,196
	4184,57	144,97	111,03	70,2	7794,306
	4254,77	142,58	113,42	86,03	9757,523
	4340,8	141,42	114,58	59,01	6761,366
	4399,81	136,52	119,48	29,14	3481,647
	4428,95	124,48	131,52	254,83	33515,24
	4683,78	117,15	138,85	453,63	62986,53

	5137,41	111,03	144,97	79,78	11565,71
	5217,19	101,27	154,73	85,78	13272,74
	5302,97	93,83	162,17	116,53	18897,67
	5419,5	84,14	171,86	226,3	38891,92
	5645,8	77,73	178,27	4,89	871,74
HV Değeri					273229,163



Şekil 7.1. Örnek probleme ilişkin pareto yüzeyleri

Şekil 7.1’de sunulan bulgular, önerilen NSGA-II ile elde edilen pareto yüzeyinin, Augmecon yöntemiyle elde edilen gerçek pareto optimal yüzeyine yüksek düzeyde yakınsama eğilimi sergilediğini göstermektedir. Ayrıca HV değerleri değerlendirildiğinde, NSGA-II nin HV değerinin Augmecon sonuçlarına oldukça yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Öte yandan, kalite ölçütü (QM) de literatürde yaygın olarak kullanılan bir ölçüttür. Bu ölçüt, belirli bir algoritma tarafından elde edilen domine edilmeyen çözümlerin sayısının, tüm algoritmalar tarafından elde edilen toplam domine edilmeyen çözümler içindeki oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıklıkla kullanılmalarından ötürü, bu çalışmada önerilen çözüm yaklaşımlarının performanslarını değerlendirmek için HV ve QM benimsenmiştir. Ayrıca, bütüncül bir performans değerlendirmesi sağlamak amacıyla deneysel çalışmada domine edilmeyen çözüm sayısı ile CPU süresi de tamamlayıcı ölçütler olarak dikkate alınmıştır.

7.3. SÇA-ATÇ Problemi için Karşılaştırmalı Sonuçların Analizi

Bu bölümde, daha önce tanımlanmış performans ölçütleri kullanılarak NSGA-II ve MOGWO meta-sezgisel algoritmaları ile Augmecon kesin yönteminin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır. Bu analiz iki aşamada yapılandırılmıştır: Öncelikle, küçük boyutlu problem örnekleri için NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının performansları Augmecon yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra, Augmecon yönteminin hesaplama zorluğu nedeniyle uygulanabilirliğini yitirdiği orta ve büyük boyutlu problem örnekleri için (her boyut kategorisinde 20 örnek olmak üzere), NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm deneyler, aşağıdaki donanım özelliklerine sahip bir bilgisayar üzerinde yürütülmüştür: Windows x64 işletim sistemi, 13. Nesil Intel® Core™ i9-13900H işlemci ve 16 GB RAM.

NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının çözümleri 10 farklı kök (seed) değeri ile yapılmış olup her bir problem en yüksek HV değerini üreten kök değerine ilişkin çözümler karşılaştırmalı analizde kullanılmıştır.

Ayrıca, Bölüm 7.2’de örneklendiği üzere, amaç fonksiyonlarının sayısal değerlerine bağlı olarak HV değerleri oldukça büyük sayılar olabilmektedir. Bu nedenle, okuma ve karşılaştırma kolaylığı sağlamak amacıyla, her bir problem için farklı yöntemlerle elde edilen HV değerleri, aynı problem için elde edilen en küçük HV değerine bölünerek normalize edilmiş ve çizelgelerde bu normalize edilmiş değerler sunulmuştur.

7.3.1. Augmecon ile küçük boyutlu çözülebilir problemler

Çizelge 7.7, 4 ile 6 iş ve 3 ile 7 makineyi içeren küçük boyutlu problem örnekleri için NSGA-II, MOGWO ve kesin Augmecon yönteminin karşılaştırmalı performans sonuçlarını sunmaktadır. Karşılaştırma, daha önce tanımlanan performans ölçütleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelgenin ilk sütunu her bir problem örneğinin ait olduğu kategoriye işaret ederken, ikinci sütun ise bu problem örneklerinin tanımlayıcılarını göstermektedir. Çizelgenin ilk panelini oluşturan sonraki altı sütun, sırasıyla NSGA-II, MOGWO ve Augmecon yöntemleri tarafından elde edilen HV ve QM değerlerini raporlamaktadır. İkinci panelde yer alan dört sütun, yalnızca NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının HV ve QM değerlerini sunmakta, karşılaştırmada

Augmecon'un etkisi dikkate alınmamıştır. Üçüncü panelde, NSGA-II ve MOGWO tarafından üretilen domine edilmeyen çözüm sayıları (NDS) verilmiştir. Augmecon tarafından elde edilen pareto-optimal çözüm sayısı bu panele dahil edilmemiştir; çünkü bu sayı, doğrudan Augmecon yönteminde kullanıcı tarafından belirlenen ızgara noktası sayısına bağlıdır. Bu çalışmada, tüm problem örnekleri için ızgara noktası sayısı 10 olarak sabitlenmiş ve buna bağlı olarak Augmecon tarafından üretilen çözüm sayısı sınırlanmıştır. Son olarak, çizelgenin son paneli, üç yöntemin her biri için CPU süresini saniye cinsinden göstermektedir.

Çizelge 7.7' de kaydedilen başlıca bulgular aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

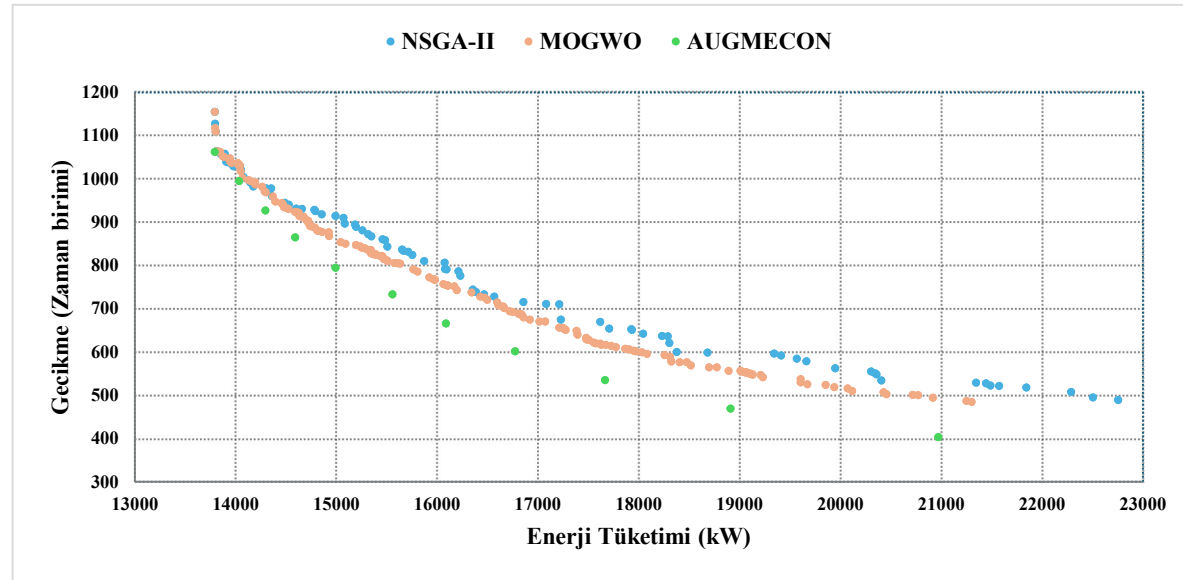
- **Bulgu 1:** Augmecon sonuçları, iki meta-sezgisel algoritmayla birlikte karşılaştırmaya dahil edildiğinde dikkat çekici bir durum ortaya çıkmaktadır: Her ne kadar Augmecon, domine edilen çözümleri doğrudan pareto yüzeyi üzerinde yer alan kesin bir yöntem olsa da en yüksek HV indeksine yalnızca üç problem örneğinde ulaşabilmiştir. Buna karşılık, MOGWO, beş problem örneğinde en yüksek HV indeksine ulaşarak hem NSGA-II' yi hem de Augmecon'u geride bırakmıştır. Bu performans üstünlüğü, MOGWO'nun Augmecon'a kıyasla daha fazla sayıda domine edilmeyen çözüm üretme kapasitesine dayanmaktadır; bu durum doğrudan HV skorunu etkilemektedir. MOGWO'nun daha geniş bir domine edilmeyen çözüm kümesi üretebilme kapasitesi, Bölüm 6.2.4.1'de detaylandırılan arşiv mekanizmasına dayanmaktadır; bu mekanizma, optimizasyon süreci boyunca çözüm çeşitliliğini etkin bir şekilde koruyup geliştirmektedir.
- **Bulgu 2:** HV ölçütüne benzer bir davranış sergileyen QM de değerlendirilen tüm problem örneklerinde en iyi performansı gösteren MOGWO algoritmasının açık üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Augmecon, (7×5) ve (7×6) problem örneklerinde üstün performans göstererek ikinci sırada yer almış, NSGA-II ise tüm problem örneklerinde sürekli olarak en düşük QM değerlerini kaydetmiştir. Ancak, Augmecon tarafından üretilen tüm domine edilmeyen çözümlerin her iki meta-sezgisel algoritma tarafından elde edilen çözümleri kesin olarak domine ettiği ve bunun, sınırlı bir çözüm kümesine sahip olmasına rağmen, kesin yöntemin doğruluğunu ve optimalitesini yansıttığı vurgulanmalıdır.
- **Bulgu 3:** Augmecon sonuçları değerlendirme dışı bırakıldığında, MOGWO, değerlendirilen tüm örneklerde hem HV hem de QM açısından NSGA-II'ye kıyasla sürekli üstün performans sergilemektedir. Bu durum, MOGWO'nun iyi dağıtılmış

bir pareto yüzeyi oluşturmadaki gücünü ve NSGA-II'ye kıyasla daha yüksek oranda domine edilmeyen çözüm üretme yeteneğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

- **Bulgu 4:** Augmecon'un dahil edilip edilmemesine bağlı olarak elde edilen performans sonuçlarının karşılaştırılması, Augmecon'un varlığının NSGA-II ve MOGWO'nun değerlendirilmesi üzerinde önemli bir etki yarattığını göstermektedir. Örneğin, (7×6) problem örneğinde, Augmecon hariç tutulduğunda QM değerleri MOGWO için 0,93; NSGA-II için ise 0,07 olarak raporlanmış ve bu durum kayda değer bir performans farkını ortaya koymuştur. Ancak Augmecon dahil edildiğinde, her iki algoritmanın QM değeri 0,28 olarak eşitlenmiştir. Bu değişim, özellikle MOGWO tarafından üretilen birçok domine edilmeyen çözümün, Augmecon'un sunduğu yüksek kaliteli pareto-optimal çözümler tarafından domine edildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, MOGWO'nun göreceli avantajı zayıflamaktadır. Bu durum, Şekil 7.2'de görsel olarak sunulmuş olup, Augmecon çözümlerinin varlığının genel dominasyon yapısını nasıl değiştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.
- **Bulgu 5:** MOGWO algoritması, ürettiği NDS bakımından NSGA-II'ye göre belirgin bir üstünlük sergilemektedir. Bu durum, çözüm uzayının farklı bölgelerini daha etkin bir biçimde keşfetme yeteneğine işaret etmekte ve çeşitlilik açısından üstün bir keşif kapasitesini ortaya koymaktadır.
- **Bulgu 6:** CPU süresi açısından, Augmecon kesin yöntemi, küçük boyutlu iki problem örneği— (4×3) ve (4×4)—için pareto-optimal çözümleri verimli bir şekilde üretebilmiş; ancak problem boyutu büyüdükçe hesaplama süresi önemli ölçüde artmış ve sonuç olarak daha büyük örneklerde her iki meta-sezgisel algoritmanın gerisinde kalmıştır. Çoğu problem örneğinde, NSGA-II algoritması, daha düşük hesaplama süresi ile zaman açısından en iyi performansı göstermiştir. Bu eğilim, problem karmaşıklığı arttıkça hesaplama yükü artan Augmecon gibi kesin yöntemlere ilişkin beklentilerle uyumludur ve bu ölçüt açısından meta-sezgisel yöntemlerin görece daha verimli olduğunu doğrulamaktadır.

Çizelge 7.7. NSGA-II, MOGWO ve Augmecon sonuçlarının karşılaştırması.

Kategori	Boyut (N×M)	AUGMECON Dahil edilmiş						AUGMECON Dahil edilmemiş				NDS		CPU		
		HV			QM			HV		QM						
		NSGA-II	MOGWO	AUG	NSGA-II	MOGWO	AUG	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	AUG
Küçük boyutlu	4×3	1	1,084	1,064	0,02	0,76	0,22	1	1,084	0,08	0,92	24	48	0,04	0,05	3,96
	4×4	1	1,085	1,045	0,09	0,76	0,14	1	1,085	0,1	0,9	39	64	0,1	0,12	9,19
	5×3	1	1,120	1,124	0	0,76	0,24	1	1,120	0,02	0,98	31	60	0,07	0,11	20,02
	5×4	1	1,241	1,223	0	0,84	0,16	1	1,241	0	1	38	80	0,19	0,21	45,4
	5×5	1	1,059	1,039	0,09	0,78	0,13	1	1,059	0,08	0,92	63	100	0,36	0,5	61,76
	6×5	1	1,094	1,079	0,09	0,79	0,12	1	1,096	0,12	0,88	70	120	0,63	0,79	411,9
	7×5	1	1,080	1,135	0	0,15	0,85	1	1,079	0,02	0,98	64	140	1,01	1,26	4428,06
	7×6	1	1,073	1,187	0,28	0,28	0,44	1	0,073	0,07	0,93	83	168	1,78	2,34	45779,73



Şekil 7.2. 7×6 problem örneğine ait pareto fronları.

7.3.2. Daha büyük boyutlu problemler için meta-sezgisellerin karşılaştırmalı performansları

Çizelge 7.8, NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının küçük, orta ve büyük ölçekli problem örnekleri üzerindeki karşılaştırmalı performans sonuçlarını sunmaktadır. Bu problem örnekleri, 7 ila 30 iş ve 7 ila 15 makine içeren senaryolardır ve hesaplama karmaşıklığı nedeniyle Augmecon yöntemiyle çözülememiştir. Söz konusu örnekler, daha önce tanımlanmış performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 7.8’de elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

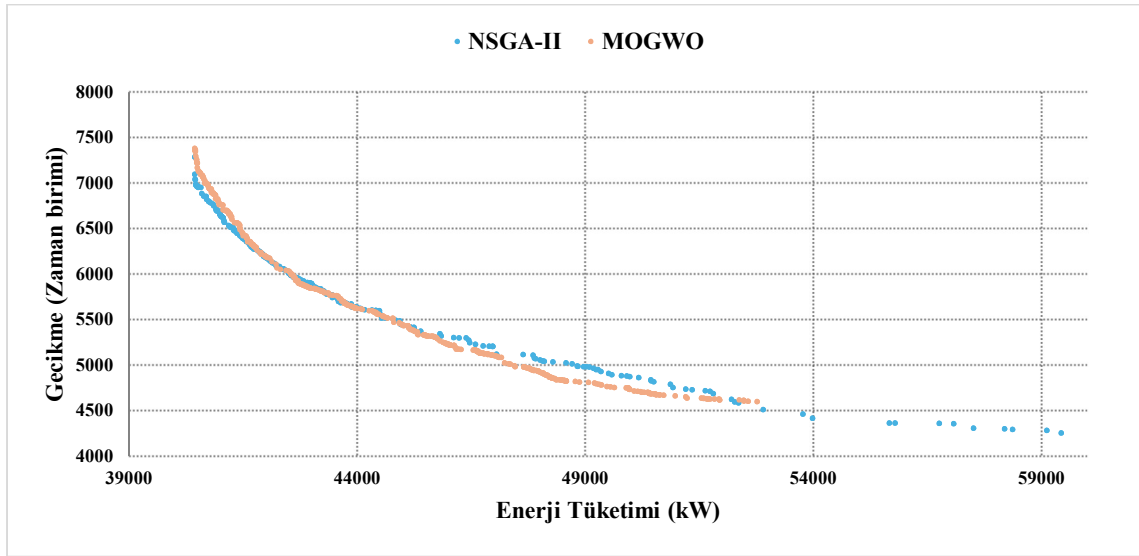
- **Bulgu 7:** İlk dört küçük boyutlu problem örneğinde, MOGWO algoritması, HV, QM ve domine edilmeyen çözüm sayısı (NDS) olmak üzere üç temel performans ölçütü açısından NSGA-II’ye kıyasla tutarlı bir üstünlük göstermiştir. Ancak, CPU süresi bakımından daha düşük performans sergileyerek, (8×6) problem örneği hariç daha fazla hesaplama süresine ihtiyaç duymuştur. Bu durum, küçük boyutlu problem örneklerinde MOGWO için çözüm kalitesi ile hesaplama verimliliği arasında bir denge (trade-off) olduğunu ortaya koymaktadır.
- **Bulgu 8:** Orta ve büyük boyutlu problem örneklerinde, MOGWO algoritması başlangıçta HV ve QM değerlerinde NSGA-II’ye kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Ancak, problem boyutu arttıkça, NSGA-II sürekli olarak daha iyi performans göstermeye başlamış ve toplamda 25 problem örneğinde MOGWO’yu geride bırakmıştır. Bu durum, problem karmaşıklığı arttıkça NSGA-II algoritmasının daha avantajlı hale geldiğini ortaya koymaktadır.
- **Bulgu 9:** Orta ve büyük boyutlu tüm problem örneklerinde, daha yüksek HV değerine ulaşan algoritmanın aynı zamanda daha yüksek QM değerini kaydettiği güçlü bir korelasyon gözlemlenmiştir; yalnızca iki istisna bulunmaktadır: (15×10) ve (20×15) problem örnekleri. Bu iki durumda, NSGA-II MOGWO’ya kıyasla daha yüksek HV elde etmiş, ancak daha düşük QM değeri göstermiştir. Bu tutarsızlık, elde edilen domine edilmeyen çözümlerin dağılımıyla açıklanabilir. Şekil 7.3 ve 7.4’te görüldüğü üzere, MOGWO daha fazla domine edilmeyen çözüm üretmiş, ancak bu çözümler pareto yüzeyinin daha dar bir bölgesinde yoğunlaşmıştır. Buna karşılık, NSGA-II daha az sayıda, ancak pareto yüzeyi üzerinde daha geniş bir alana yayılan çözümler üretmiştir. Bu nedenle, QM değeri daha düşük olmasına rağmen, NSGA-II’nin çözümleri daha geniş bir alanı kapsadığı için HV değeri daha yüksek olmuştur.

- **Bulgu 10:** NDS açısından, MOGWO hem orta hem de büyük boyutlu problem örneklerinde NSGA-II'ye kıyasla sürekli olarak üstün performans sergilemiştir. Bu durum, NSGA-II'de özellikle ileri nesillerde çeşitliliğin azalması ve popülasyonda, domine edilmeyen bireylerin tekrar etmesiyle açıklanabilir. MOGWO ise arşiv mekanizması sayesinde, daha fazla sayıda çeşitli ve domine edilmeyen çözüm üretme kapasitesini koruyabilmektedir. Bu yapı, MOGWO'nun çözüm uzayında daha geniş bir bölgeyi keşfetmesini ve daha dengeli bir pareto yüzeyi oluşturmasını sağlamaktadır.
- **Bulgu 11:** CPU süresi açısından, MOGWO 10 adet orta boyutlu problem örneğinde NSGA-II'ye kıyasla daha hızlı çalışmıştır. Ancak, problem boyutu arttıkça MOGWO'nun hesaplama süresi önemli ölçüde artmış ve tüm büyük boyutlu problem örneklerinde NSGA-II'nin gerisinde kalmıştır. Bu durum, NSGA-II algoritmasının özellikle büyük problemleri işlerken daha verimli olduğunu ve daha az hesaplama çabasıyla sonuç üretebildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

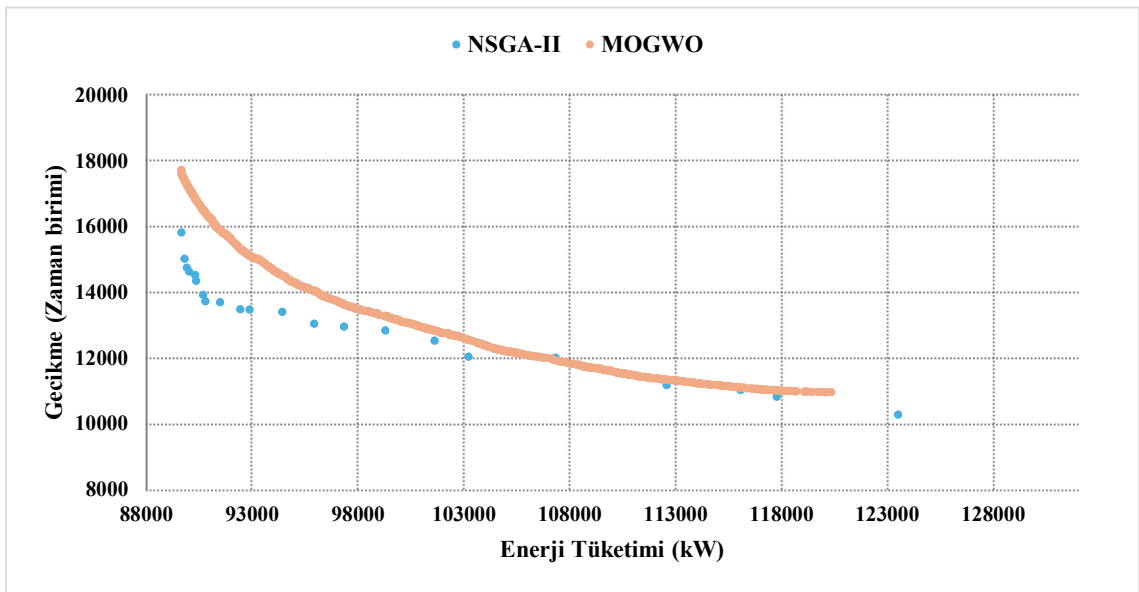
Çizelge 7.8. NSGA-II, MOGWO'nun karşılaştırmalı performans sonuçları.

Kategori	Boyut (N×M)	HV		QM		NDS		CPU (Saniye)	
		NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO
Küçük-Boyutlu	7×7	1	1,169	0,07	0,93	39	196	2,85	3,88
	8×6	1	1,122	0	1	54	171	5,19	3,49
	10×3	1	1,111	0	1	46	120	0,6	0,74
	10×4	1	1,152	0,02	0,98	62	160	1,43	6,13
Orta-Boyutlu	10 × 5 la01	1	1,168	0,01	0,99	81	200	6,07	4,29
	10 × 5 la02	1	1,023	0,07	0,93	30	200	6,12	4,07
	10 × 5 la03	1,037	1	0,84	0,16	132	200	3,04	4,28
	10 × 10 abz5	1	1,156	0,02	0,98	95	400	24,01	34,92
	10 × 10 abz6	1	1,021	0,14	0,86	87	260	48,25	34,6
	10 × 10 ft	1	1,083	0,06	0,94	110	281	47,82	34,79
	10 × 10 la16	1,135	1	1	0	88	358	47,11	35,35
	10 × 10 orb1	1	1,057	0,3	0,7	112	368	46,47	35,71
	10 × 10 orb2	1,092	1	1	0	112	400	46,81	35,59
	15 × 5 la06	1	1,055	0,07	0,93	85	300	10,55	14,46
	15 × 5 la07	1	1,104	0,01	0,99	62	299	12,19	14,05
	15 × 5 la08	1,059	1	0,58	0,42	115	300	10,63	14,59
	15 × 10 la21	1,083	1	1	0	57	337	86,22	128,66
	15 × 10 la22	1,026	1	0,3	0,7	245	526	86,25	127,91
	15 × 10 la23	1,207	1	1	0	171	529	103,55	131,18
	15 × 10 la24	1,184	1	1	0	101	563	166,16	138,28
	15 × 10 la25	1,125	1	1	0	92	491	177,47	137,19
	20 × 5 ft20	1,234	1	1	0	134	380	76,32	34,16
	20 × 5 la11	1,15	1	1	0	133	400	24,05	34,29
	20 × 5 la12	1,083	1	0,91	0,09	131	400	24,33	35,37
Büyük-Boyutlu	15 × 15 la36	1	1,289	0,01	0,99	32	710	330,36	524,35
	15 × 15 la37	1,265	1	1	0	185	429	301,7	506,78
	15 × 15 ta01	1	2,081	0,01	0,99	2	476	317,98	1470,39
	15 × 15 ta02	1	3,114	0	1	2	900	302,02	1387,83
	20 × 10 la26	1,280	1	1	0	51	478	204,88	972,83

20×10 la27	1,069	1	0,86	0,14	312	506	199,95	324,18
20×10 smv1	1,477	1	1	0	269	534	198,47	347,34
20×10 smv2	1,211	1	1	0	346	534	206,78	347,34
20×15 abz7	1	1,190	0,07	0,93	93	405	720,83	3356,37
20×15 smv6	1,218	1	1	0	342	641	683,4	3743,06
20×15 ta11	1,103	1	0,12	0,88	25	1148	705,93	1457,2
20×15 ta12	1,114	1	1	0	356	362	711,48	3501,96
20×20 ta21	1	3,939	0	1	2	803	1827,36	9339,15
20×20 yn1	1	62,404	0	1	2	569	3492,04	9522
30×10 la31	1,303	1	1	0	331	664	661,53	3166,31
30×10 la32	1,435	1	1	0	268	1171	1058,09	3588,75
30×15 ta31	1	4,025	0	1	2	1702	4771,91	14779,38
30×15 ta32	1	3,351	0	1	2	987	6371,44	19575,56



Şekil 7.3. 15×10 La22 problem örneğinin pareto yüzeyleri.



Şekil 7.4. 20×15 ta11 problem örneğinin pareto yüzeyleri.

7.4. Teslim Tarihi Parametresinin SÇA-ATÇ Problemi Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, teslim tarihi parametresinin NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Daha önce Çizelge 7.3' te belirtildiği üzere, önceki tüm deneylerde kullanılan teslim tarihleri şu formüle göre üretilmiştir: $\sum_k AT_{ik3} \times U[1,1.5]$. Bu ifade, teslim tarihi parametresinin orta aralığını temsil etmektedir. Teslim tarihi sıklığının değişiminin, NSGA-II ve MOGWO algoritmalarının davranış ve performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, teslim tarihi parametresi iki ilave aralıkta daha incelenmiştir: Sıkı aralık: $\sum_k AT_{ik3} \times U[1,1.25]$ ve gevşek aralık: $\sum_k AT_{ik3} \times U[1,2]$. Çizelge 7.9, beş farklı problem örneği için üç farklı teslim tarihi seviyesi (Sıkı, Orta ve Gevşek) altında NSGA-II ve MOGWO algoritmaları tarafından elde edilen sonuçları sunmaktadır. Değerlendirme, aşağıdaki üç temel performans ölçütüne odaklanmıştır:

1. Hiperhacim (HV)
2. Domine edilmeyen çözüm sayısı (NDS)
3. CPU süresi

Deneysel sonuçlardan çıkarılan temel bulgular aşağıda ifade edilmektedir:

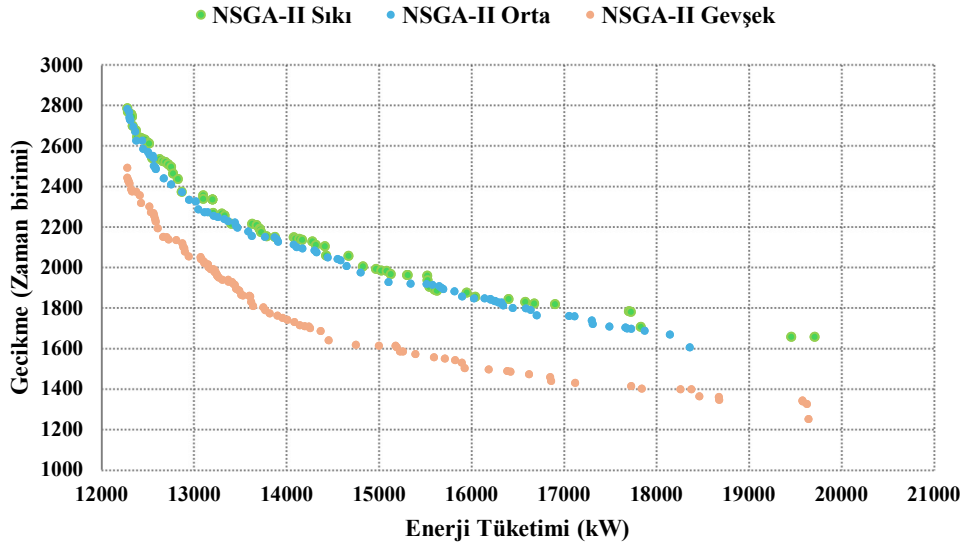
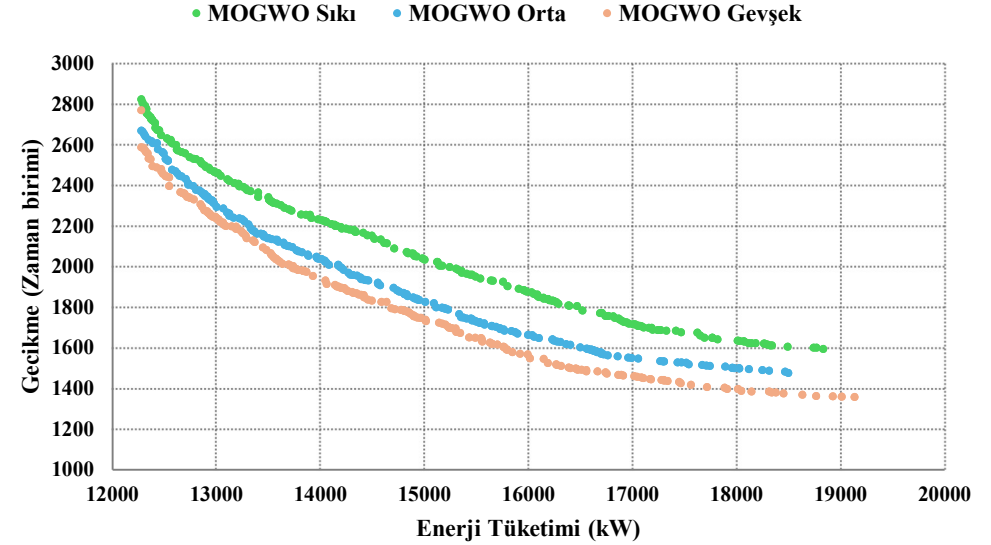
- **Bulgu 12:** Hem MOGWO hem de NSGA-II algoritmaları için, teslim tarihleri gevşedikçe (yani sıkıdan gevşeye doğru), HV değerinin genellikle arttığı gözlemlenmiştir. Test edilen tüm problem örneklerinde, teslim tarihleri büyüdükçe HV değerleri sürekli olarak iyileşmektedir. Bu eğilim, "Gevşek" teslim tarihlerinin algoritmalara daha fazla esneklik sunduğunu ve bu sayede daha geniş, daha iyi yayılmış pareto-optimal çözümler elde edilebildiğini göstermektedir.
- **Bulgu 13:** MOGWO algoritması için, teslim tarihleri gevşedikçe—özellikle daha büyük problem örneklerinde (örn. la21 ve la26) —elde edilen domine edilmeyen çözüm sayısının (NDS) arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, MOGWO'nun arama uzayı genişledikçe çözüm çeşitliliğini etkin bir biçimde koruyabildiğini göstermektedir. Bazı problemlerde (örn. La01 ve la06) MOGWO tarafından üretilen NDS'nin değişmemesi ise tamamen arşiv limiti ile ilgilidir. Buna karşılık, NSGA-II algoritması daha tutarsız bir davranış sergilemektedir; bazı durumlarda gevşek teslim tarihleri altında NDS azalmaktadır. Bu durum, popülasyonda erken yakınsama veya çeşitlilik kaybına işaret edebilir.

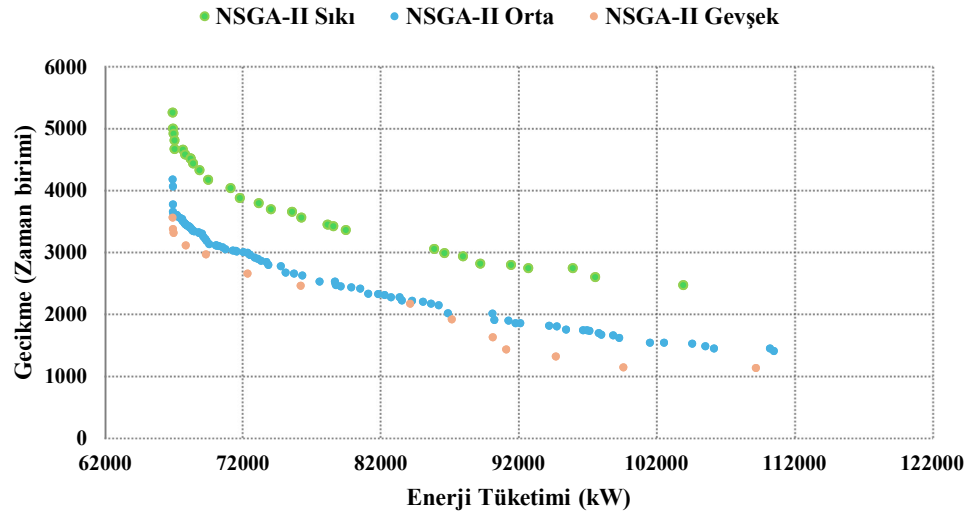
- **Bulgu 14:** Çizelge 7.9'dan ilginç bir şekilde gözlemlenmektedir ki, her iki algoritma için teslim tarihleri sıkı ve gevşek olarak seçildiğinde CPU sürelerinde önemli bir fark gözlemlenmemektedir. Bununla birlikte, orta düzeyde teslim tarihlerinde CPU süresi önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum, problem zorluğu ile arama uzayının karmaşıklığı arasındaki dengenin algoritmaların daha hızlı yakınsamasına yol açmasıyla açıklanabilir.

Genel olarak, teslim tarihleri enerji tüketimini doğrudan etkileyen bir parametre değildir; enerji tüketimi esasen seçilen hız seviyelerine bağlıdır. İşlem sıraları ve hız seviyelerinin aynı olduğu durumlarda, teslim tarihlerinden bağımsız olarak enerji tüketiminin de değişmeyeceği açıktır. Ancak, daha gevşek teslim tarihleri, toplam gecikme değerlerini azaltmaktadır. Sonuç olarak, orta düzey teslim tarihleri altında elde edilen çözümlerin, sıkı teslim tarihi koşullarında elde edilen çözümleri domine etmesi beklenmektedir. Benzer şekilde, gevşek teslim tarihlerine karşılık gelen çözümlerin de orta teslim tarihleriyle ilişkili çözümleri domine etmesi öngörülmektedir. Bu olgunun daha iyi anlaşılması amacıyla, problem örneklerine ait pareto yüzeyleri Şekil 7.5–7.14'te görsel olarak sunulmuştur.

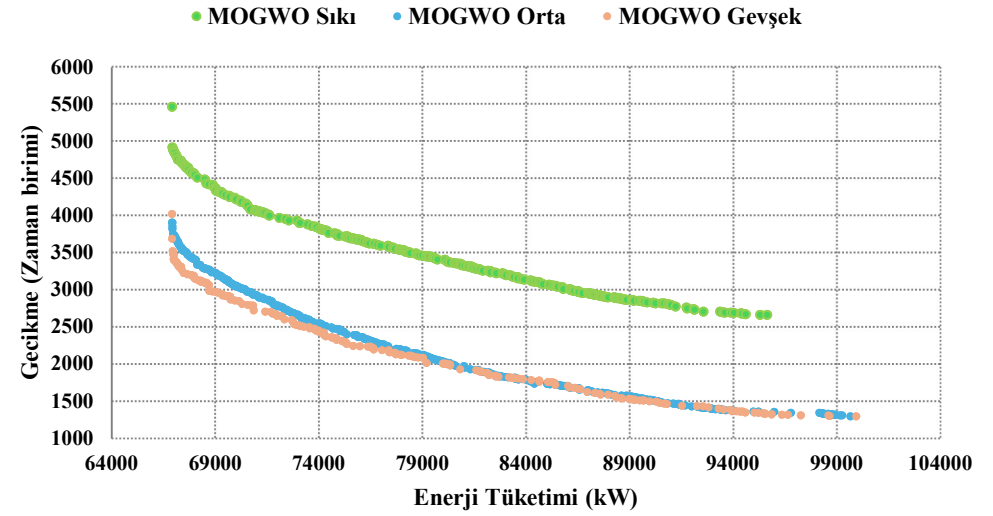
Çizelge 7.9. NSGA-II ve MOGWO'nun sıkı, orta ve gevşek teslim tarihleri altında elde edilen sonuçları.

Problem	HV						NDS						CPU (Saniye)					
	NSGA-II			MOGWO			NSGA-II			MOGWO			NSGA-II			MOGWO		
	Sıkı	Orta	Gevşek	Sıkı	Orta	Gevşek	Sıkı	Orta	Gevşek	Sıkı	Orta	Gevşek	Sıkı	Orta	Gevşek	Sıkı	Orta	Gevşek
10 × 5 la01	1	1,058	1,438	1	1,206	1,316	69	81	101	200	200	200	9,95	6,06	9,52	17,63	4,28	18,21
10 × 10 abz5	1	1,466	1,566	1	1,601	1,629	30	95	14	298	400	208	76,47	24,01	73,72	150,17	34,92	155,07
15 × 5 la06	1	1,169	1,734	1	1,106	1,610	93	85	74	300	300	300	31,39	10,54	31,47	59,29	14,45	63,06
15 × 10 la21	1	1,257	1,890	1	1,237	1,964	186	57	136	338	337	520	250,8	86,22	247,92	535,13	128,65	551,8
20 × 10 la26	1	1,508	2,341	1	1,323	1,785	51	51	171	622	478	724	604,45	204,88	584,68	1352,69	972,83	1384,39

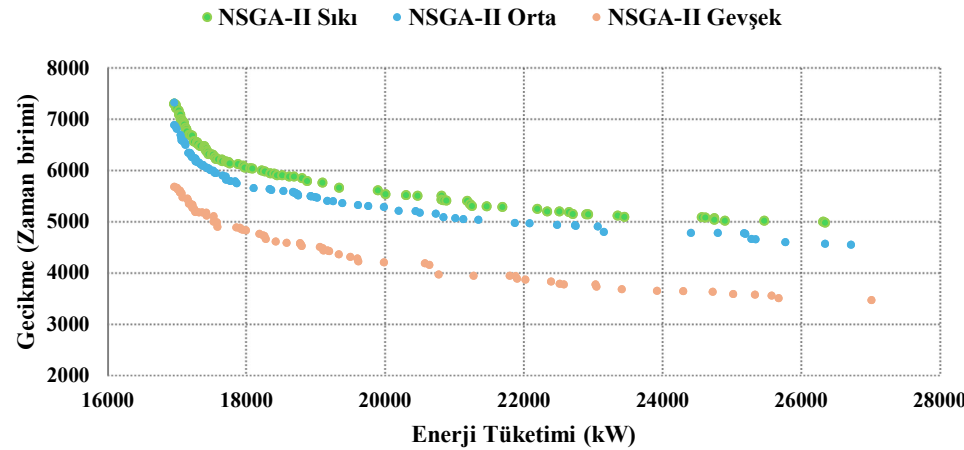
**Şekil 7.5.** 10×5 la01 problem örneğinin NSGA-II' ile elde edilen pareto yüzeyleri**Şekil 7.6.** 10×5 la01 problem örneğinin MOGWO' ile elde edilen pareto yüzeyleri



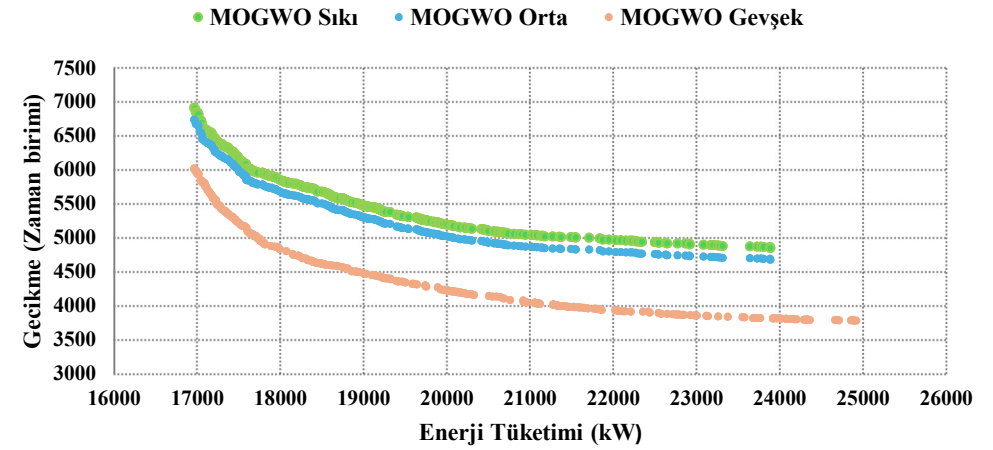
Şekil 7.7. 10×10 abz5 problem örneğinin NSGA-II' ile elde edilen pareto yüzeyleri



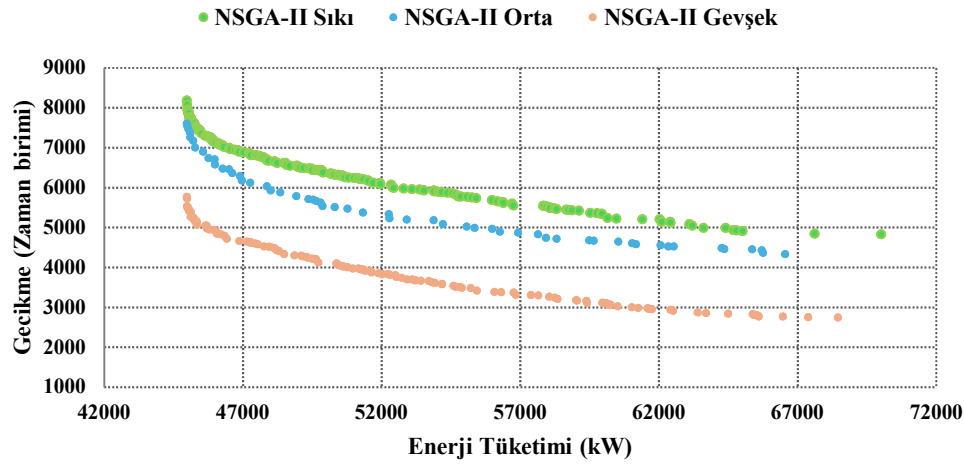
Şekil 7.8. 10×10 abz5 problem örneğinin MOGWO' ile elde edilen pareto fronları



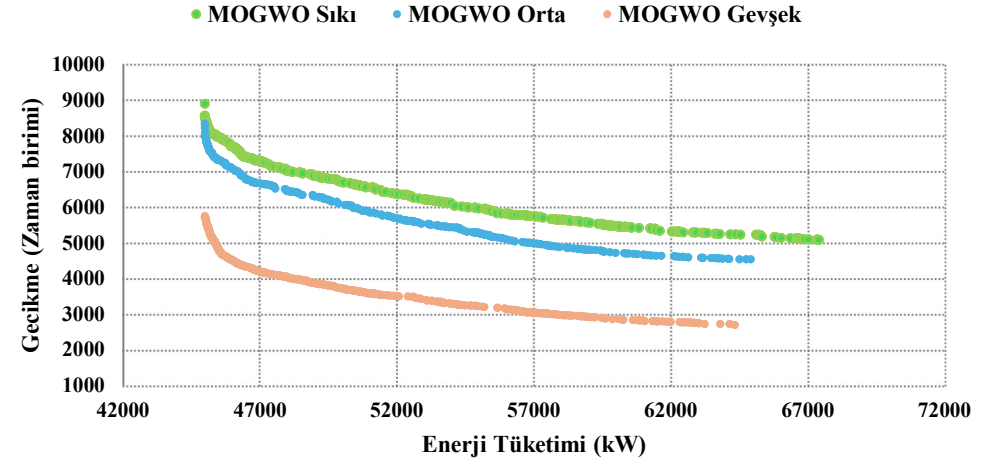
Şekil 7.9. 15×5 la06 problem örneğinin NSGA-II' ile elde edilen pareto yüzeyleri



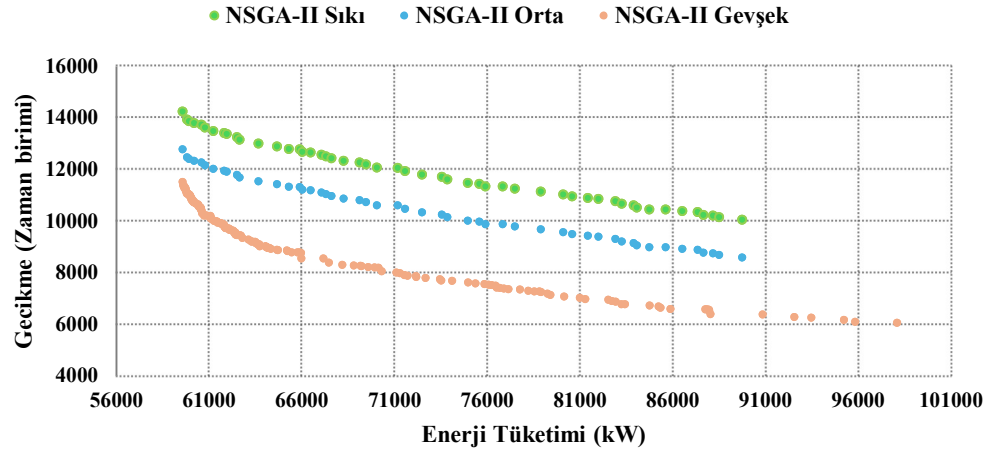
Şekil 7.10. 15×5 la06 problem örneğinin MOGWO' ile elde edilen pareto yüzeyleri



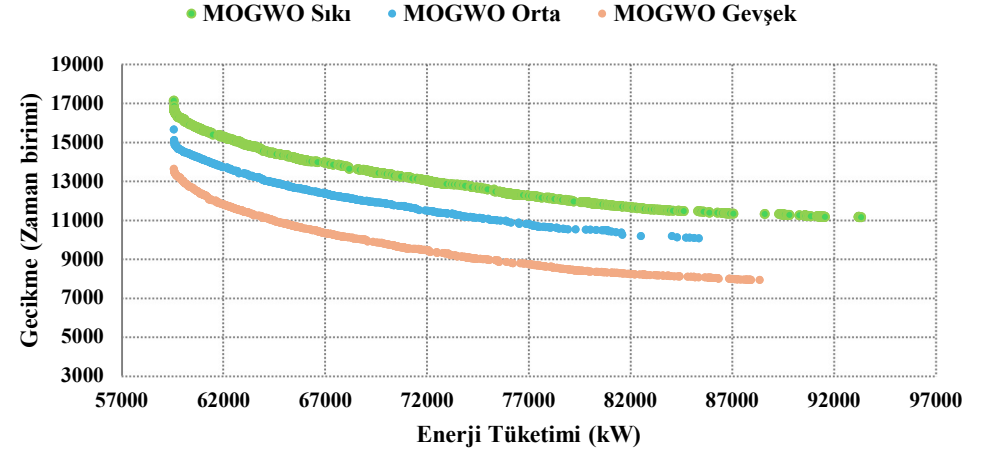
Şekil 7.11 15×10 la21 problem örneğinin NSGA-II' ile elde edilen pareto yüzeyleri



Şekil 7.12. 1 5×10 la21 problem örneğinin MOGWO' ile elde edilen pareto yüzeyleri



Şekil 7.13. 20×10 la26 problem örneğinin NSGA-II' ile elde edilen pareto yüzeyleri



Şekil 7.14. 20×10 la26 problem örneğinin MOGWO' ile elde edilen pareto yüzeyleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Küresel çevresel zorluklar karşısında, üretim süreçlerinin sürdürülebilirliği birçok şirketin stratejilerinde merkezi bir unsur haline gelmiştir. Amaç artık yalnızca operasyonel verimliliğin artırılmasıyla sınırlı olmayıp, enerji tüketimini teslim süreleri ve maliyetlerle birlikte dikkate alan eşzamanlı kararların alınmasını gerektirmektedir.

Geleneksel üretim çizelgeleme problemleri, enerji tüketimi göz önüne alındığında ek zorluklarla karşılaşmakta; bu durum, operasyonel verimlilik ile çevresel etkileri en aza indirme arasında dikkatli bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Klasik amaçların yanı sıra, enerji tüketimini azaltmaya yönelik stratejilerin de entegre edilmesi kaçınılmaz hâle gelmiştir. Bu bakış açısıyla, sürdürülebilir üretim çizelgeleme, ekonomik performans ile çevresel ve sosyal sorumluluk arasında bir denge sağlamak amacıyla temel bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Enerji odaklı üretim çizelgeleme problemleri üzerine yapılan kapsamlı literatür incelemesi aracılığıyla, bu tez konu ile ilgili önceki çalışmalarda var olan boşlukları tespit etmektedir. Çalışma, önceki araştırmalardan birkaç temel açıdan farklılık gösteren iki amaçlı atölye tipi çizelgeleme problemini ele almaktadır. Geleneksel araştırmalardan farklı olarak, bu çalışma, boшта geçen sürelerde makine açma/kapama kontrolü ve aktif işlem sırasında hız ölçekleme olmak üzere iki enerji odaklı üretim çizelgeleme stratejisini eşzamanlı olarak birleştiren özgün bir bütünleşik yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşım, amaçların doğası gereği çelişiyor olmasına rağmen hem toplam enerji tüketimini hem de toplam gecikmeyi eşzamanlı olarak minimize etmeyi amaçlamaktadır.

İncelenen çizelgeleme ortamı, üç farklı hız seviyesinde çalışabilen makinelerde işlenen birden fazla işi kapsamaktadır. Daha yüksek hızlar, işlem sürelerini azaltmakla ve bununla birlikte hız ile güç tüketimi arasındaki kübik ilişki nedeniyle önemli ölçüde daha fazla enerji kullanımına yol açmaktadır. Boшта geçen süreler ise, eğer boшта kalma süresi önceden belirlenmiş bir eşiği aşarsa makinelerin kapatılmasıyla, aşmaması durumunda ise düşük enerjili bekleme modunda tutulmalarıyla yönetilmiştir. Bu bütünleşik çizelgeleme çerçevesini modellemek amacıyla iki amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli formüle edilmiştir. Küçük boyutlu problem örnekleri için, kesin pareto-optimal çözümler elde etmek amacıyla Artırılmış Epsilon-Kısıt (Augmecon) yöntemi kullanılmıştır. Ancak, büyük boyutlu örneklerin işlenmesinde hesaplama

sınırlamaları göz önüne alındığında, iki meta-sezgisel algoritma önerilmiştir: Domine edilmeyen sıralama genetik algoritması II (NSGA-II) ve çok amaçlı gri kurt optimizasyonu (MOGWO). Bu meta-sezgisel algoritmalar, kesin yöntemlerin makul sürede çözüm bulamadığı orta ve büyük boyutlu problem örneklerinde, yüksek kaliteli pareto yüzeylerini verimli bir şekilde yaklaşık olarak elde etmek üzere tasarlanmıştır. Toplamda 50 problem örneği üretilmiş ve iş ve makine sayılarına göre küçük, orta ve büyük boyutlarda sınıflandırılmıştır. Bunlardan 12 küçük boyutlu örnek bu çalışma için üretilmiş, 20 orta ve 18 büyük problem örneği ise literatürde sıkça atıfta bulunulan bilinen kıyaslama veri setlerinden uyarlanmıştır. Önerilen algoritmaların performansı, Hiperhacim (HV), Kalite Ölçütü (QM), CPU süresi ve Domine Edilmeyen Çözümlerin Sayısı (NDS) gibi çeşitli çok amaçlı optimizasyon için kullanılan performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalı analiz, dikkat çekici birkaç bulgu ortaya koymuştur. MOGWO algoritması, HV ve QM ile ölçülen çözüm kalitesi ve elde edilen domine edilmeyen çözüm sayısı açısından, özellikle küçük ve bazı orta boyutlu problem örneklerinde, tutarlı bir şekilde NSGA-II'yi geride bırakmaktadır. Bu üstün performans, büyük ölçüde MOGWO'nun çözüm çeşitliliğini koruyan etkili arşiv mekanizmasına atfedilmektedir.

Buna karşılık, Augmecon yöntemi problem boyutu arttıkça aşırı hesaplama çabası gerektirmiştir. (4×3 , 4×4 , 5×3 , 5×4 , 5×5 , 6×5 , 7×5 ve 7×6) problem örnekleri için pareto çözümleri üretebilmiş olmasına rağmen, 12 örnekten 4'ünde (7×7 , 8×6 , 10×3 ve 10×4) belirlenen süre sınırı içerisinde ödünleşim matrisleri üretememiştir. Öte yandan, NSGA-II özellikle büyük boyutlu örneklerde üstün hesaplama verimliliği sergilemektedir; ancak çözüm kalitesi açısından performansı, popülasyon çeşitliliğinin azalması nedeniyle düşmektedir. İlginç bir şekilde, daha büyük problemler için NSGA-II zaman zaman hem HV hem de QM değerlerinde MOGWO'yu geride bırakmış, bu da toplamda daha az çözüm üretmesine rağmen görece ölçeklenebilirliğini göstermektedir. Bu bulgular, algoritmalar arasında belirgin bir ödünleşmeyi ortaya koymaktadır: MOGWO, genellikle daha çeşitli ve yüksek kaliteli pareto yüzeyleri üretirken, NSGA-II özellikle büyük boyutlu senaryolarda daha hızlı yakınsama ve daha düşük hesaplama süresi sunmaktadır.

Buna ek olarak, teslim tarihi sıklığının algoritmik performans üzerindeki etkisi, sıkı, orta ve gevşek teslim tarihleri olmak üzere üç farklı ayar değerlendirilerek incelenmiştir. Sonuçlar, her iki algoritmada da teslim tarihi parametreleri gevşetildiğinde (sıkıdan gevşeye) HV değerlerinin genel olarak arttığını göstermektedir. Bu durum, teslim tarihlerinin enerji tüketimini doğrudan etkilememesine rağmen, daha gevşek teslim

tarikhlerinin gecikmeyi azalttığını ve dolayısıyla daha baskın (dominant) çözümler elde edilmesine yol açtığını doğrulamaktadır. Buna göre, orta aralıkta belirlenen teslim tarihleriyle elde edilen çözümler sıkı teslim tarihleriyle elde edilenlerden daha iyi performans gösterirken, gevşek teslim tarihleriyle elde edilen çözümler ise orta aralıktakileri geride bırakmaktadır. Ayrıca, MOGWO algoritmasının daha gevşek teslim tarihleri altında daha fazla sayıda domine edilmeyen çözüm ürettiği gözlemlenirken, NSGA-II daha kararsız bir davranış sergilemiş ve sonuçlar tutarsızlık göstermiştir; bu durum muhtemelen erken yakınsamadan kaynaklanmaktadır.

8.2. Öneriler

Bu çalışma literatürdeki önemli boşlukları doldurmakla birlikte, gelecekteki araştırmalar için çeşitli alanlar hâlâ açık bulunmaktadır.

Gelecek araştırmalar için olası çalışma alanlarından biri, problemi açık atölye veya esnek atölye tipi sistemleri gibi farklı üretim ortamlarına genişletmek olabilir; bu da ek çizelgeleme karmaşıklıkları getirerek çalışmanın pratik önemini artıracaktır.

Bir diğer değerli genişletme, probleme ek bir amaç ekleyerek—örneğin toplam erken tamamlanma zamanını minimize edilmesi—üç amaçlı bir optimizasyon modeli olarak yeniden formüle edilmesi olabilir. Bu amaç, mevcut amaçları tamamlayarak pratik çizelgeleme önceliklerini daha iyi yansıtacaktır.

Ayrıca, ileriki çalışmalar, önleyici bakım programları, olası makine arızaları veya makineler arası taşıma bileşenleri (ör. otomatik yönlendirmeli araçlar) gibi gerçekçi operasyonel kısıtları modele dahil etmeyi içerebilir. Bu faktörler hem enerji tüketimini hem de gecikmeyi önemli ölçüde etkileyerek modelin karmaşıklığını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda gerçek dünya uygulamalarına uygunluğunu da güçlendirecektir.

Buna ek olarak, makinenin Açık/Kapalı ve bekleme modları arasında geçişini yöneten eşik parametresine yönelik özel bir duyarlılık analizi, makine davranışı ve genel sistem performansı üzerindeki etkisine dair değerli bilgiler sunabilir.

Son olarak, önerilen çözüm yaklaşımlarını daha geniş bir bağlamda doğrulamak ve kıyaslamak amacıyla alternatif çok amaçlı meta-sezgisel yöntemlerin etkinliğinin araştırılması ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdolhamidi, D. ve Lurkin, V. J. a. p. a., 2024, Choice-based time slot management in attended home delivery.
- Abedi, M., Chiong, R., Noman, N. ve Zhang, R., 2020, A multi-population, multi-objective memetic algorithm for energy-efficient job-shop scheduling with deteriorating machines, *Expert Systems with Applications*, 157, 113348.
- Abedini, A., Li, W., Badurdeen, F. ve Jawahir, I. J. J. o. M. S., 2020, A metric-based framework for sustainable production scheduling, 54, 174-185.
- Adams, J., Balas, E. ve Zawack, D., 1988, The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling, *Management science*, 34 (3), 391-401.
- Akbar, M. ve Irohara, T. J. J. o. c. p., 2018, Scheduling for sustainable manufacturing: A review, 205, 866-883.
- Akıl, S. ve Urgan, M. C. J. J. o. E. C. i. O., 2022, E-commerce logistics service quality: customer satisfaction and loyalty, 20 (1), 1-19.
- Altuntuğ, N. J. C. U. J. o. E. ve Dergisi, A. S. C. Ü. İ. v. İ. B., 2009, SÜRDÜRÜLEBİLİR MÜŞTERİ DEĞERİNİN PSİKOLOJİK ve SOSYOLOJİK BOYUTU: BİREYSEL ve TOPLUMSAL KARAKTER†, 10 (2).
- Applegate, D. ve Cook, W. J. O. J. o. c., 1991, A computational study of the job-shop scheduling problem, 3 (2), 149-156.
- Aracıoğlu, B. J. E. A. R., 2010, ÜRETİM/İŞLEMLER YÖNETİMİ ALANINDA YAŞANAN PARADİGMAL DEĞİŞİMLER KAPSAMINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM, 10 (1).
- Audet, C., Bignon, J., Cartier, D., Le Digabel, S. ve Salomon, L., 2021, Performance indicators in multiobjective optimization, *European Journal of Operational Research*, 292 (2), 397-422.
- Bagchi, U. J. O. R., 1989, Simultaneous minimization of mean and variation of flow time and waiting time in single machine systems, 37 (1), 118-125.
- Baker, K. R. ve Trietsch, D., 2018, Principles of sequencing and scheduling, John Wiley & Sons, p.
- Baker, K. R. J., 1974, Introduction to sequencing and scheduling.
- Behrendt, T., Zein, A. ve Min, S. J. C. a., 2012, Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, 61 (1), 43-46.
- Bierwirth, C., 1995, A generalized permutation approach to job shop scheduling with genetic algorithms, *Operations-Research-Spektrum*, 17 (2), 87-92.
- Bouzegag, S. H. ve Kesen, S. E., 2024, Energy Conscious Bi-objective Job Shop Scheduling: A New Formulation and Augmented ε -Constraint Method, *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 213-228.
- Brocke, J. v., Simons, A., Niehaves, B., Niehaves, B., Riemer, K., Plattfaut, R. ve Cleven, A., 2009, Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process.
- Che, A., Wu, X., Peng, J. ve Yan, P., 2017a, Energy-efficient bi-objective single-machine scheduling with power-down mechanism, *Computers & Operations Research*, 85, 172-183.
- Che, A., Zhang, S. ve Wu, X. J. J. o. c. p., 2017b, Energy-conscious unrelated parallel machine scheduling under time-of-use electricity tariffs, 156, 688-697.
- Chen, J.-f., Wang, L. ve Peng, Z.-p., 2019, A collaborative optimization algorithm for energy-efficient multi-objective distributed no-idle flow-shop scheduling, *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100557.

- Chen, X. J. T. R. e. N.-C.-. 2001, Pareto tree searching genetic algorithm: Approaching Pareto optimal front by searching Pareto optimal tree, 1-002.
- Chun, Y. ve Bidanda, B. J. I. J. o. P. R., 2013, Sustainable manufacturing and the role of the International Journal of Production Research, 51 (23-24), 7448-7455.
- Conway, R. W., 1967, Theory of scheduling, Addison-Wesley Pub. Co., p.
- de Athayde Prata, B., de Abreu, L. R., Fernandez-Viagas, V. J. C. ve Research, O., 2025, A systematic review of permutation flow shop scheduling with due-date-related objectives, 106989.
- De Ron, A. J. J. I. J. o. P. E., 1998, Sustainable production: the ultimate result of a continuous improvement, 56, 99-110.
- Deb, K., 2001, Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, New York, In, Eds, p.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. ve Meyarivan, T., 2002, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6 (2), 182-197.
- Deb, K., 2011, Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction, In: Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing, Eds: Springer, p. 3-34.
- Deb, K. ve Jain, H. J. I. t. o. e. c., 2013, An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints, 18 (4), 577-601.
- Ding, J.-Y., Song, S. ve Wu, C., 2016, Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization, *European Journal of Operational Research*, 248 (3), 758-771.
- Dong, J. ve Ye, C., 2022, Green scheduling of distributed two-stage reentrant hybrid flow shop considering distributed energy resources and energy storage system, *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108146.
- Dubey, R., Gunasekaran, A. ve Chakrabarty, A. J. I. J. o. P. R., 2015, World-class sustainable manufacturing: framework and a performance measurement system, 53 (17), 5207-5223.
- Edgeworth, F. Y., 1881, Mathematical psychics: An essay on the application of mathematics to the moral sciences, Kegan Paul, p.
- Ehrgott, M. ve Gandibleux, X., 2002, Multiobjective combinatorial optimization—theory, methodology, and applications, In: Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys, Eds: Springer, p. 369-444.
- EIA, 2023, International Energy Outlook 2023, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/data/pdf/K_K1_r_230822.081459.pdf: [24.07.2025].
- Elkington, J. J. E. q. m., 1998, Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business, 8 (1), 37-51.
- Escamilla, J., Salido, M. A., Giret, A. ve Barber, F., 2016, A metaheuristic technique for energy-efficiency in job-shop scheduling, *The Knowledge Engineering Review*, 31 (5), 475-485.
- Fang, K.-T. ve Lin, B. M., 2013, Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost, *Computers & Industrial Engineering*, 64 (1), 224-234.
- Ferrández, M. R., Redondo, J., Ivorra, B., Ramos, A. ve Ortigosa, P. J. P. v., 2017, A decision tool based on a multi-objective methodology for designing high-pressure thermal treatments in food industry.
- French, S., 1982, Sequencing and Scheduling : an Introduction to the Mathematics of the Job-Shop, *New York, Wiley*, p. 245 Seiten.

- Füchtenhans, M. ve Glock, C. H., 2022, Energy-efficient job shop scheduling considering processing speed and incentive-based programs, *IFAC-PapersOnLine*, 55 (10), 192-197.
- Gahm, C., Denz, F., Dirr, M. ve Tuma, A., 2016, Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework, *European Journal of Operational Research*, 248 (3), 744-757.
- Gao, K., Huang, Y., Sadollah, A., Wang, L. J. C. ve Systems, I., 2020, A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems, 6 (2), 237-249.
- Geng, K., Ye, C., Cao, L. ve Liu, L., 2019, Multi-Objective Reentrant Hybrid Flowshop Scheduling with Machines Turning on and off Control Strategy Using Improved Multi-Verse Optimizer Algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, 2019 (1), 2573873.
- Giglio, D., Paolucci, M. ve Roshani, A., 2017, Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems, *Journal of cleaner production*, 148, 624-641.
- Goli, A., Ala, A. ve Hajiaghaei-Keshteli, M., 2023, Efficient multi-objective meta-heuristic algorithms for energy-aware non-permutation flow-shop scheduling problem, *Expert Systems with Applications*, 213, 119077.
- Gong, G., Chiong, R., Deng, Q., Han, W., Zhang, L. ve Huang, D., 2021, Energy-efficient production scheduling through machine on/off control during preventive maintenance, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 104359.
- Gong, X., Van der Wee, M., De Pessemier, T., Verbrugge, S., Colle, D., Martens, L. ve Joseph, W. J. P. C., 2017, Energy-and labor-aware production scheduling for sustainable manufacturing: A case study on plastic bottle manufacturing, 61, 387-392.
- Groover, M. P., 2010, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, John Wiley & Sons, p.
- Gürül, B., 2019, Sürdürülebilir üretim göstergelerinin kurumsal sürdürülebilirlik performansına etkisinin araştırılması.
- Haimes, Y., 1971, On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1 (3), 296-297.
- Harter, A., Stich, L. ve Spann, M. J. J. o. S. R., 2025, The effect of delivery time on repurchase behavior in quick commerce, 28 (2), 211-227.
- He, L., Cao, Y., Li, W., Cao, J. ve Zhong, L., 2022, Optimization of energy-efficient open shop scheduling with an adaptive multi-objective differential evolution algorithm, *Applied Soft Computing*, 118, 108459.
- Hwang, C.-L. ve Masud, A. S. M., 1979, Multiple Objective Decision Making—Methods and applications: A state-of-the-art survey, *Berlin, Heidelberg, New York*, Springer-Verlag, p.
- IEA, 2025, The International Energy Agency, <https://www.iea.org/countries/china/efficiency-demand>: [24.07.2025].
- Jackson, J. R. J. N. R. L. Q., 1956, An extension of Johnson's results on job IDT scheduling, 3 (3), 201-203.
- Jiang, E.-d., Wang, L. ve Peng, Z.-p., 2020, Solving energy-efficient distributed job shop scheduling via multi-objective evolutionary algorithm with decomposition, *Swarm and Evolutionary Computation*, 58, 100745.
- Jiang, T., Zhang, C., Zhu, H., Gu, J. ve Deng, G., 2018, Energy-efficient scheduling for a job shop using an improved whale optimization algorithm, *Mathematics*, 6 (11), 220.

- Jiang, T., Zhang, C. ve Sun, Q.-M., 2019, Green job shop scheduling problem with discrete whale optimization algorithm, *IEEE Access*, 7, 43153-43166.
- Johnson, S. M. J. N. r. l. q., 1954, Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included, 1 (1), 61-68.
- Kaçtı, V., 2021, Henry gaz çözünürlük optimizasyonu ve farklı sistemlerdeki kontrolör tasarımı uygulanması, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Knowles, J. D. ve Corne, D. W. J. E. c., 2000, Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy, 8 (2), 149-172.
- Kuhlman, T. ve Farrington, J., 2010, What is sustainability? *Sustainability*, 2 (11), 3436-3448.
- Kurniawan, B., Song, W., Weng, W. ve Fujimura, S., 2021, Distributed-elite local search based on a genetic algorithm for bi-objective job-shop scheduling under time-of-use tariffs, *Evolutionary Intelligence*, 14, 1581-1595.
- Lampinen, J. J. P.-i. R., Lappeenranta University of Technology, 2000, Multiobjective nonlinear pareto-optimization, 114, 125.
- Lawrence, S., 1984, Resource constrained project scheduling, *an experimental investigation of heuristic scheduling techniques*.
- Lee, S., Do Chung, B., Jeon, H. W. ve Chang, J., 2017, A dynamic control approach for energy-efficient production scheduling on a single machine under time-varying electricity pricing, *Journal of cleaner production*, 165, 552-563.
- Li, K., Zhang, X., Leung, J. Y.-T. ve Yang, S.-L. J. J. o. M. S., 2016, Parallel machine scheduling problems in green manufacturing industry, 38, 98-106.
- Li, W., He, L. ve Cao, Y., 2021, Many-objective evolutionary algorithm with reference point-based fuzzy correlation entropy for energy-efficient job shop scheduling with limited workers, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52 (10), 10721-10734.
- Liang, P., Yang, H.-d., Liu, G.-s. ve Guo, J.-h., 2015, An ant optimization model for unrelated parallel machine scheduling with energy consumption and total tardiness, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015 (1), 907034.
- Liao, W. ve Wang, T. J. S., 2018, Promoting green and sustainability: A multi-objective optimization method for the job-shop scheduling problem, 10 (11), 4205.
- Liu, G.-S., Zhou, Y. ve Yang, H.-D. J. J. o. c. p., 2017, Minimizing energy consumption and tardiness penalty for fuzzy flow shop scheduling with state-dependent setup time, 147, 470-484.
- Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S. ve Gindy, N., 2014, An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops, *Journal of cleaner production*, 65, 87-96.
- López Jaimes, A., Zapotecas-Martínez, S. ve Coello, C., 2011, An Introduction to Multiobjective Optimization Techniques, In, Eds, p. 29-57.
- Lu, C., Huang, Y., Meng, L., Gao, L., Zhang, B. ve Zhou, J., 2022a, 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, 102277.
- Lu, C., Liu, Q., Zhang, B. ve Yin, L., 2022b, A Pareto-based hybrid iterated greedy algorithm for energy-efficient scheduling of distributed hybrid flowshop, *Expert Systems with Applications*, 204, 117555.
- Luo, J., El Baz, D., Xue, R. ve Hu, J., 2020, Solving the dynamic energy aware job shop scheduling problem with the heterogeneous parallel genetic algorithm, *Future Generation Computer Systems*, 108, 119-134.

- Luo, S., Zhang, L. ve Fan, Y., 2019, Energy-efficient scheduling for multi-objective flexible job shops with variable processing speeds by grey wolf optimization, *Journal of cleaner production*, 234, 1365-1384.
- Marler, R. T., Arora, J. S. J. S. ve optimization, m., 2004, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, 26 (6), 369-395.
- Mavrotas, G., 2009, Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems, *Applied mathematics and computation*, 213 (2), 455-465.
- May, G., Stahl, B., Taisch, M. ve Prabhu, V., 2015, Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling, *International Journal of Production Research*, 53 (23), 7071-7089.
- Michael, P. J. I.-.-. 1995, Scheduling. theory, algorithms and systems.
- Miettinen, K., 1999, Nonlinear multiobjective optimization, Springer Science & Business Media, p.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A., 2014, Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M. ve Coelho, L. d. S., 2016, Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization, *Expert Systems with Applications*, 47, 106-119.
- Moore, J. J. T. r., 1999, Application of particle swarm to multiobjective optimization.
- Morton, T. E. ve Pentico, D. W., 1993, Heuristic scheduling systems: with applications to production systems and project management, John Wiley & Sons, p.
- Mouzon, G., Yildirim, M. B. ve Twomey, J., 2007, Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment, *International Journal of Production Research*, 45 (18-19), 4247-4271.
- Muth, J. J. I. s., 1963, Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules.
- Pareto, V., 1896, Cours d'économie politique, *Lausanne, Switzerland*, F. Rouge, p.
- Pinedo, M., 2012, Theory, scheduling algorithms and systems, Berlin: Springer.
- Pinedo, M. L., 2016, Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Springer, p.
- Rinnooy Kan, A. H. G., 1976, Machine scheduling problems : classification, complexity and computations, *The Hague*, Martinus Nijhoff, p. IX, 180 p. ; 23 cm.
- Shao, W., Shao, Z. ve Pi, D., 2022, A multi-neighborhood-based multi-objective memetic algorithm for the energy-efficient distributed flexible flow shop scheduling problem, *Neural Computing and Applications*, 34 (24), 22303-22330.
- Simpson, A. R. ve Marchi, A., 2013, Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (12), 1314-1317.
- Smith, W. E. J. N. R. L. Q., 1956, Various optimizers for single-stage production, 3 (1-2), 59-66.
- Srinivas, N. ve Deb, K., 1994, Muultiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, *Evolutionary computation*, 2 (3), 221-248.
- Statista, 2025, Statista Research Department, <https://www.statista.com/statistics/239790/total-energy-consumption-in-the-united-states-by-sector/#:~:text=Energy%20consumption%20in%20the%20U.S.%201975%2D2024%2C%20by%20sector&text=Industrial%20activities%20are%20the%20great%20est,followed%20by%20the%20transportation%20sector.:> [24.07.2025].

- Storer, R. H., Wu, S. D. ve Vaccari, R., 1992, New search spaces for sequencing problems with application to job shop scheduling, *Management science*, 38 (10), 1495-1509.
- Şevkli, M., 2005, Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerine Parçacık Sürü Optimizasyonu Yaklaşımı ve Genetik Algoritma Modeli ile Karşılaştırılması.
- Taillard, E. J. e. j. o. o. r., 1993, Benchmarks for basic scheduling problems, 64 (2), 278-285.
- Tang, D. ve Dai, M., 2015, Energy-efficient approach to minimizing the energy consumption in an extended job-shop scheduling problem, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28 (5), 1048-1055.
- Tiwari, S., Daryanto, Y. ve Wee, H. M. J. J. o. C. P., 2018, Sustainable inventory management with deteriorating and imperfect quality items considering carbon emission, 192, 281-292.
- von Carlowitz, H. C. J. D. E. d. N. L., Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz, 2013, *Sylvicultura oeconomica* (1713), 89-590.
- Wang, J., Wu, C. ve Peng, Y., 2024, Multi-objective scheduling for an energy-efficient flexible job shop problem with peak power constraint, *Applied Soft Computing*, 167, 112330.
- Wang, S., Li, J., Tang, H. ve Wang, J., 2022, CEA-FJSP: Carbon emission-aware flexible job-shop scheduling based on deep reinforcement learning, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1059451.
- Wang, Z., Shen, L., Li, X. ve Gao, L., 2023, An improved multi-objective firefly algorithm for energy-efficient hybrid flowshop rescheduling problem, *Journal of cleaner production*, 385, 135738.
- WCED, 1987, Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development.
- Wei, H., Li, S., Quan, H., Liu, D., Rao, S., Li, C. ve Hu, J., 2021, Unified multi-objective genetic algorithm for energy efficient job shop scheduling, *IEEE Access*, 9, 54542-54557.
- Wu, X. ve Che, A., 2020, Energy-efficient no-wait permutation flow shop scheduling by adaptive multi-objective variable neighborhood search, *Omega*, 94, 102117.
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., Hu, J. J. C. ve Research, O., 2022, A survey of job shop scheduling problem: The types and models, 142, 105731.
- Xu, E., Li, Y., Liu, Y., Du, J. ve Gao, X., 2022, Energy saving scheduling strategy for job shop under TOU and tiered electricity price, *Alexandria Engineering Journal*, 61 (1), 459-467.
- Yağmur, E. Ç., 2021, Bütünleşik Üretim ve Dağıtım Çizelgeleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımları.
- Yamada, T. ve Nakano, R., 1992, A genetic algorithm applicable to large-scale job-shop problems, *PPSN*, 281-290.
- Yao, F., Demers, A. ve Shenker, S., 1995, A scheduling model for reduced CPU energy, *Proceedings of IEEE 36th annual foundations of computer science*, 374-382.
- Yin, L., Li, X., Gao, L., Lu, C. ve Zhang, Z., 2017, Energy-efficient job shop scheduling problem with variable spindle speed using a novel multi-objective algorithm, *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (4), 1687814017695959.
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S. ve Fu, J., 2019, Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30 (4), 1809-1830.
- Zhang, Q. ve Li, H. J. I. T. o. e. c., 2007, MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition, 11 (6), 712-731.

- Zhang, R. ve Chiong, R., 2016, Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: a multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption, *Journal of cleaner production*, 112, 3361-3375.
- Zhong, Q., Yu, Y. ve Zhang, Y. Z., 2024, An Improved Multi-Objective Iterated Greedy Algorithm for Energy-Efficient Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem with Sequence-dependent Setup Times, *2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 5839-5844.
- Zitzler, E., 1999, Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications, Shaker Ithaca, p.
- Zitzler, E. ve Thiele, L., 1999, Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE transactions on evolutionary computation*, 3 (4), 257-271.
- Zitzler, E., Deb, K. ve Thiele, L. J. E. c., 2000, Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results, 8 (2), 173-195.
- Zitzler, E., Laumanns, M. ve Thiele, L. J. T. r., 2001, SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm, 103.