

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞ TİPİ GRUP ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN HİBRİT
HİPER SEZGİSEL YÖNTEM TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Nilgün İNCE

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞ TİPİ GRUP ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN HİBRİT
HİPER SEZGİSEL YÖNTEM TASARIMI

DOKTORA TEZİ

Nilgün İNCE

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İhsan Hakan SELVİ

Ortak Danışman: Doç. Dr. Derya DELİKTAŞ

HAZİRAN 2025

Nilgün İNCE tarafından hazırlanan “Akış Tipi Grup Çizelgeleme Problemleri için Hibrit Hiper Sezgisel Yöntem Tasarımı” adlı tez çalışması 16.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Gülşen AKMAN Kocaeli Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. İhsan Hakan SELVİ (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Berrin DENİZHAN Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. İhsan EROZAN Dumlupınar Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz İPEK Sakarya Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

(26 /05 /2025).

(imza)

Nilgün İNCE





Biricik dedeme, saygı ve rahmetle...



TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlamamda her türlü desteğinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. İhsan Hakan SELVİ Hoca'ya teşekkürü bir borç bilirim. Tezi uzaktan devam ettirmek zor olsa da İhsan Hoca'mın desteği bu süreci kolaylaştırmıştır.

Gönülden bir teşekkür de yollarımızın lisansta kesiştiği, bir hocadan çok daha fazlası olarak bana destek olan ve her zaman iyi ki tanıştık dediğim kıymetli hocam Doç. Dr. Derya DELİKTAS'a etmek istiyorum.

Bu çalışma boyunca kıymetli yorumlarıyla çalışmaya yön veren tez izleme ve savunma sınavı jüri üyesi hocalarıma teşekkür ederim.

Bu uzun soluklu çalışmada maddi manevi desteklerinden ötürü tüm arkadaşlarıma, özellikle iş arkadaşlarım Atıl KURT ve Nazmi ŞENER'e teşekkür ederim.

Son olarak her zaman yanımda olan, desteklerini hep hissettiğim kıymetli aileme, ablalarım Emine ve Hatice'ye, kardeşim Mustafa'ya, anne ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

Nilgün İNCE



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TANIMLAR VE LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Çizelgeleme Problemleri Tanımı ve Sınıflandırılması	5
2.2. ATGÇP Literatür Araştırması	7
2.2.1. ATGÇP’de incelenen durumlar	7
2.2.2. ATGÇP ‘de kullanılan amaç fonksiyonları	8
2.2.3. ATGÇP için geliştirilen çözüm yaklaşımları	9
2.3. Çizelgeleme Problemlerinde Hiper Sezgisel Yaklaşımlar	10
2.3.1. Üretim çizelgeleme problemlerinde hiper sezgisel yöntemler	13
2.3.2. Memetik algoritmalar	14
3. ATGÇP VE UYGULANAN YÖNTEM HAKKINDA BİLGİ	17
3.1. Problem Detayları ve Amaç Fonksiyonu Hesaplanması Hakkında Bilgi	17
3.2. Geliştirilen Yöntem Hakkında Bilgi	18
3.2.1. Yapay tavşan algoritması (YTA)	19
3.2.1.1. Yapay tavşan algoritması formülasyonu	21
3.2.2. Hibrit hiper sezgisel yöntem	23
3.2.2.1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması	25
3.2.2.2. Çaprazlama operatörü	27
3.2.2.3. Tepe tırmanması operatörü (Hill Climbing)	31
3.3. Kullanılan Veri Seti Hakkında Bilgi	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	35
4.1. Otomatik Algoritma Konfigürasyonu: irace	35
4.1.1. Ön deney aşaması	35
4.1.2. Algoritma konfigürasyon aracı (irace) ile bulunan parametre değerleri ..	36
4.2. Bulunan Sonuçlar	40
4.3. İstatistiksel Analiz	41
4.3.1. Hibrit Hiper Sezgisel Yöntem Performans Analizi	42
4.4. Alt Seviye Sezgisel ve Parametre Performansları	63
5. BÖLÜM SONUÇLAR ve ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	77
EKLER	87
ÖZGEÇMİŞ	106



KISALTMALAR

ATGÇP	: Akış tipi grup çizelgeleme problemi
PFSP	: Permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi
TTZ	: Toplam tamamlanma zamanı
YTA	: Yapay tavşan algoritması





SİMGELER

$C_{\max}$: Tamamlanma zamanı (Makespan)





TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Sık kullanılan amaç fonksiyonları ve tanımları.	8
Tablo 2.2. Sezgisel seçim stratejileri (Özcan ve ark, 2012).	15
Tablo 3.1. Problem örneklerindeki grup sayıları ve en büyük iş sayıları.	33
Tablo 3.2. Veri setindeki küçük, orta ve büyük boyutlu problem örnekleri.	34
Tablo 4.1. Irace ile bulunan parametre değerleri.	37
Tablo 4.2. Wilcoxon test sonuçlarında kullanılan semboller ve açıklamaları.	42
Tablo 4.3. Hiper sezgisel ve RMSA sonuçlarının istatistiksel fark kıyaslaması.	42
Tablo 4.4. Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar	43
Tablo 4.5. Hiper sezgisel ve RMSA_LS sonuçlarının istatistiksel fark kıyaslaması.	53
Tablo 4.6. Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar.	54
Tablo 4.7. Alt seviye sezgisel listesi.	64
Tablo 4.8. Küçük boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.	67
Tablo 4.9. Orta boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.	68
Tablo 4.10. Büyük boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Araştırma kapsamında yapılan faaliyetler şeması	3
Şekil 2.1. Çizelgeleme problemleri sınıflandırması (İnce ve ark., 2024).	6
Şekil 2.2. Hiper sezgisel yöntem işleyişi (Burke ve ark, 2011).	11
Şekil 2.3. Hiper sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması (Zhang ve ark, 2023).	12
Şekil 2.4. Genetik programlama ağaç yapısı örneği (Nguyen ve ark, 2017).	12
Şekil 2.5. Tek nokta arama akış şeması (Kheiri, 2014).	13
Şekil 3.1. Bekleme olmama kısıtı gant şeması örneği.	17
Şekil 3.2. Gant şeması örneği.	18
Şekil 3.3. Hibrit hiper sezgiseli genel gösterim.	19
Şekil 3.4. YTA akış şeması.	20
Şekil 3.5. YTA sözde kodu.	21
Şekil 3.6. Hibrit hiper sezgisel yöntem akış şeması.	24
Şekil 3.7. Permütasyon kodlama yapısındaki kromozom şablonu.	25
Şekil 3.8. 3 grup ve 8 iş içeren kromozom örneği.	25
Şekil 3.9. Mem yapısı örneği.	26
Şekil 3.10. Skor yapısı değişim örneği.	27
Şekil 3.11. Kısmi değişimli çaprazlama operatörü çalışma mantığı.	27
Şekil 3.12. Pozisyona bağlı çaprazlama operatörü çalışma mantığı.	28
Şekil 3.13. Düzenli çaprazlama operatörü çalışma mantığı.	29
Şekil 3.14. İki noktalı çaprazlama operatörü çalışma mantığı.	30
Şekil 3.15. Alel değişimi ve yerleştirme mutasyon örnekleri.	30
Şekil 3.16. Tersine çevirme ve blok değişimi mutasyon örnekleri.	31
Şekil 3.17. Memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem pseudo kodu.	32
Şekil 4.1. 2 Makine 6., 27. ve 41. örnekler için yakınsama grafikleri.	38
Şekil 4.2. 3 Makine 11., 68. ve 113. örnekler için yakınsama grafikleri.	39
Şekil 4.3. 6 Makine 4., 22. ve 48. örnekler için yakınsama grafikleri.	40
Şekil 4.4. Geliştirilen yöntem ve RMSA ile elde edilen sonuçların Wilcoxon test sonuçlarının makinelere göre dağılımı.	53
Şekil 4.5. Geliştirilen yöntem ve RMSA_LS ile elde edilen sonuçların Wilcoxon test sonuçlarının makinelere göre dağılımı.	63
Şekil 4.6. Küçük boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları	65
Şekil 4.7. Orta boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları	65
Şekil 4.8. Büyük boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları	66
Şekil 4.9. Küçük boyutlu problemlerde parametre skorları.	66
Şekil 4.10: Orta boyutlu problemlerde parametre skorları	67
Şekil 4.11. Büyük boyutlu problemlerde parametre skorları.	68
Şekil 4.12. Alt seviye sezgisellerin skor değerleri için oluşturulan ısı haritası.	69



AKIŞ TİPİ GRUP ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ İÇİN HİBRİT HİPER SEZGİSEL YÖNTEM TASARIMI

ÖZET

Günümüzde müşteri yapısındaki değişim üreticileri düşük maliyetli, yüksek kaliteli ürünleri ürün çeşitliliğini artırarak kısa sürede üretmeye zorlamaktadır. İmalat firmalarının rakipleri arasında hayatta kalabilmesi için imalat sistemlerini optimize etmesi ve kısa sürede yüksek ürün çeşitliliğinde ürün teslimatı yapabilmesi çok önemli hâle gelmiştir. Ürün çeşitliliğinin çok olması üretim sürecinde israf olarak nitelendirilen ürünler arası değişim sürelerinin (ayar zamanı) ve taşıma zamanlarının artmasına sebep olmakta ayrıca operasyon çizelgelemenin karmaşıklaşması gibi birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir. Bu zorlukları aşmak için geliştirilen grup teknolojisi yaklaşımıyla ürünler (işler) şekil, malzeme, üretim süreci veya diğer özelliklerindeki benzerliklere göre gruplandırılır. Planlama faaliyetleri de işlerin münferit olarak ele alınmasından ziyade gruplandırılmış işler üzerinden yapılır. Böylece ürünler arası değişim süreleri en aza indirilirken süreçler arasındaki malzeme ve mal akışı da basitleştirilmiş olur. Bu sistemlerdeki planlama faaliyetleri iki seviyeden oluşur. İlk seviyede işlem görecektir grupların belirlenmesi gerekir. İkinci olarak ise her grup içindeki işlerin işlem sırası belirlenir.

Bu çalışmada, işlerin gruplandırıldığı, her makinede önceki işlem gören gruba bağlı olarak ayar zamanının değiştiği ve işlerin makineler arasında beklemediği akış tipi çizelgeleme problemine dair bir yöntem önerilmiştir. Ele alınan problem çözüm uzayı büyük olan polinom zamanlı çözülemeyen yapıdadır. Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında bu çalışma akış tipi sıra bağımlı işlerin makineler arası beklemediği grup çizelgeleme problemi için yapay tavşan optimizasyonu algoritması uygulayan ve memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem geliştiren ilk çalışmadır. Yapay tavşan algoritması tavşanların doğadaki davranışından esinlenilerek geliştirilen, parametre olarak sadece iterasyon ve popülasyon sayısı içermesi avantajına sahip oldukça yeni bir algoritmadır. Bu algoritma çalışmada başlangıç popülasyonu üretme aşamasında kullanılmıştır. Yapay tavşan algoritması ile bulunan çözümler memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel için başlangıç popülasyonunu oluşturmaktadır.

Ele alınan problem için geliştirilen memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem ise birçok algoritma konfigürasyonunu temsil edebilen (bu uygulamada 4375 konfigürasyon), geri bildirim mekanizması ile başarılı olan konfigürasyonu ödüllendirme yeteneğine sahip adaptif yapıdadır. Literatürde hiper sezgisel yöntemler sezgisel seçen yöntemler olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada algoritma operatörleri olan çaprazlama, mutasyon, tepe tırmanması operatörleri ve mutasyon oranı ile arama derinliği parametreleri seçim yapılacak alt seviye sezgisellerdir. Çaprazlama için yedi farklı operatör, mutasyon ve tepe tırmanması için ise 5'er farklı operatör uygulanmıştır. Bunlara ek olarak mutasyon ve tepe tırmanması parametreleri de 5'er farklı sayısal değer olarak uygulanmıştır. Her bir adımda bu alt seviye sezgiseller içinden seçim yapılır. Seçilen operatörler/parametreler uygulandığında elde edilen sonuçtan daha iyi sonuç bulunursa seçilen operatörlerin/parametrelerin puanı

arttırılır (ödüllendirilir). Böylece sonraki adımlarda iyi sonuç veren operatörlerin/parametrelerin seçilme sıklığı artırılmıştır. Yapay tavşan algoritması ile başlangıç çözüm elde edilen hiper sezgisel yöntem literatürdeki 270 test problemi kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki algoritmaların sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Problemden performans kriteri (amaç fonksiyonu) olarak toplam tamamlanma zamanı ele alınmıştır. Toplam tamamlanma zamanı kriteri ile işlerin son makineden ayrılma zamanları toplanarak en küçük değerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu değer algoritma performansını mevcut yöntemlerle kıyaslamada kullanılmıştır. Toplam tamamlanma zamanı eşit olan durumlarda ise sırasıyla deneylerden elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri performans kriteri olarak kullanılmıştır.

Geliştirilen yöntemin parametre optimizasyonu R tabanlı paket program olan irace algoritma konfigürasyon aracı ile yapılmıştır. Bu kapsamda popülasyon büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon oranı, arama derinliği, durdurma kriteri bu paket program ile belirlenen parametrelerdir. Bu parametrelere ek olarak başlangıç popülasyonunun rassal mı yoksa yapay tavşan algoritması ile mi üretilmesi gerektiği yine irace ile belirlenmiştir.

Yöntem performansı literatürdeki 2, 3 ve 6 makine içeren 270 adet problem çözülerek test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde son yıllarda geliştirilen iki yöntemle (revize edilmiş çoklu başlangıçlı simüle edilmiş tavlama benzetimi yöntemi ve bu yöntemin yerel arama içeren versiyonu) bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Geliştirilen yöntem ve literatürdeki yöntemlerle elde edilen sonuçlar arasındaki farkın anlamlı olma durumu Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek testi ile analiz edilmiştir.

Sonuç olarak geliştirilen hibrit hiper sezgisel yöntemle daha küçük toplam tamamlanma zamanı elde edildiği sonuçlar üzerinden gösterilmiştir. Ayrıca ele alınan problem için hiper sezgisel yapıda alternatifleriyle birlikte uygulanan operatörlerden (çaprazlama için 7, mutasyon ve tepe tırmanması için ise 5'er opsiyon) iyi sonuç verenler skorları görselleştirilerek sunulmuştur. Buna ek olarak etkin çalışan mutasyon ve arama derinliği parametreleri de yorumlanarak gelecek çalışmalar için yol gösterici sonuçlar paylaşılmıştır.

DESIGN OF HYBRID HYPER HEURISTIC METHOD FOR FLOW SHOP GROUP SCHEDULING PROBLEMS

SUMMARY

In today's world, the changing structure of customer demand forces manufacturers to produce low-cost, high-quality products with increased product variety in a short period of time. In order for manufacturing companies to survive among their competitors, it has become crucial to optimize their production systems and to deliver a wide variety of products in a short time. However, high product variety leads to several challenges in the production process, such as increased setup times and transportation times—considered as waste—and a more complex operation scheduling process. To overcome these challenges, the Group Technology (GT) approach has been developed, whereby products (jobs) are grouped based on similarities in shape, material, production process, or other characteristics. Planning activities are then carried out based on these grouped jobs rather than treating each job individually. In this way, setup times between products are minimized, and the flow of materials and goods between processes is simplified. Planning activities in such systems are conducted on two levels. In the first level, the groups to be processed are determined. In the second level, the processing sequence of the jobs within each group is established.

In this study, a method is proposed for a flow shop scheduling problem in which jobs are grouped, setup times are sequence dependent (vary depending on the previously processed group), and jobs do not wait between machines as (no-wait constraint). The addressed problem is of a non-polynomial time solvable nature with a large solution space. The research questions for this research is as follows:

- Do hyper heuristic methodology find efficient solutions to flow shop group scheduling problems?
- "How effective is the Artificial Rabbit Optimization Algorithm in solving flow shop group scheduling problems?"
- Which crossover and mutation operators have shown the most effective performance in solving flow shop group scheduling problems in the literature?
- Do the modified crossover operators applied in this study enable an effective exploration of the solution space?
- How do the results of the developed method differ from those of the methods in the literature?

Based on the conducted literature review, this study is the first attempt to apply the Artificial Rabbit Optimization Algorithm and develop a memetic algorithm based hyper heuristic method for the no wait flow shop sequence dependent group scheduling problem. The artificial babbitt optimization algorithm, inspired by the behavior of rabbits in nature, is a relatively new algorithm that has the advantage of requiring only iteration number and population size as parameters. This algorithm is successively

applied in continuous optimization problems in literature such as stock price prediction, photovoltaic system optimization and cement compressive strength estimation but this study is the first attempt to apply this methodology in to discrete problems. Artificial rabbit optimization algorithm is used at the very beginning of the designed methodology, to obtain the initial population. The set of solutions (population) found in the last iteration of the artificial rabbit optimization algorithm constitute the initial population for the memetic algorithm based hyper heuristic. They go through evolutionary processes including crossover, mutation and hill climbing. In contrast to classical memetic algorithms, in hyper heuristic design algorithm components are applied with its alternatives and algorithm evolves to choose components that has better performance than alternatives.

Hyper heuristic is defined as heuristics that choose heuristic from a predefined set of low level heuristics. In this study, the algorithm operators including crossover, mutation and hill climbing are considered as low level heuristics to be selected. Seven different operators are applied for crossover, and 5 different operators are applied for mutation and hill climbing. In addition to these operators, mutation rate and search depth (hill climbing parameter) parameters are also applied by considering 5 different options and considered as low level heuristic. The performance of each low level heuristic is represented with score values in meme structure, which is formed for each chromosome.

This design allows to represent various algorithm configurations in one algorithm (4375 configurations in this research) and adapt itself to choose better low level heuristics through iterations. Applying hyper heuristic includes evolutionary processes with the race between low level heuristics.

In each step after having an initial population from an artificial rabbit optimization algorithm, two parent chromosomes are selected with tournament selection (tour size equals 2). This means two randomly chosen individuals are selected and the one with better fitness value is referred to as parent. This selection is done twice to choose both of the parents. Parent chromosomes go into evolutionary process crossover, mutation and hill climbing. These operators are implemented with 7, 5 and 5 alternatives respectively. Depending on this, before applying any of these operators tournament selection (tour size is 2) is conducted. This means two of the operators are selected randomly and the one with a higher score is chosen. Scores for each operator are saved in meme structure which is tailored to each chromosome. Similarly, two of the algorithm parameters including mutation rate and depth search rate are included in meme structure with their five alternatives. Similar to operator selection, two of the five alternatives are selected and the one with higher score is implemented. After having finished the iteration, fitness values of parents and children are compared. If children's fitness is lower than parents (better solution obtained) then scores for each chosen operator and parameters are increased by one. This mechanism is called reinforcement learning in the literature. Designing algorithm components with alternatives and direct iteration process with feedback mechanism construct the main body of hyper heuristic algorithm.

The performance criteria (objective function or fitness value) considered is the total completion time. Total completion time should be minimized and it is calculated by adding the completion time of each job on the last machine. Parameter optimization of the designed methodology is carried out using irace, an R-based algorithm configuration tool. The values of parameters such as population size, stopping

criterion, and crossover rate are determined by irace. In addition to these parameters, irace also decides whether the initial population is generated using the Artificial Rabbit Optimization algorithm or produced randomly.

The performance of the method is evaluated by solving a set of 270 benchmark problems, each repeated ten times. The test instances involve 2, 3, or 6 machines, with up to 16 groups and a maximum of 117 jobs. The results obtained are compared with those of two recently developed methods proposed by Cheng et al. (2021a) in the literature. The compared methods are a revised multi-start simulated annealing algorithm and its variant enhanced with a local search procedure. The Wilcoxon signed-rank test is used to calculate p values and evaluate whether the differences between the proposed method and the literature are statistically significant. Obtained results show that designed methodology has superior performance over revised multi start simulated annealing approach with the %73 of the instances and %33 of them is statistically significant. When compared with local search enhanced variant, designed methodology has better or equal results over %57 of instances.

Overall, the crossover and mutation operators that demonstrate effective performance have been identified. Moreover, it is demonstrated that the modified crossover operations perform well. The superiority of the proposed methodology over the existing revised multi-start simulated annealing algorithm and its variant enhanced with local search is also proven.



1. GİRİŞ

Günümüzde artan rekabet koşulları müşteriye merkeze alan, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli üretim yapan imalat ortamlarının geliştirilmesini zorunlu hâle getirmektedir. İmalatçı firmalar talebe göre üretim süreçlerini güncelleyebilmek (esneklik), üretim parti büyüklüklerini düşürmek, ürün çeşitliliğini artırmak ve teslimat sürelerini düşürmek istemektedirler. Bu da ancak üretim süreçlerindeki her türlü operasyonel faaliyetin optimizasyonu ve kaynakların etkili kullanımı ile mümkün olabilmektedir.

Teknolojideki gelişim müşterilerin firmalarla iletişimini önemli ölçüde değiştirmiştir. Önceden sadece bayilerden alışveriş yapılabilirken günümüzde firma web siteleri, telefon uygulamaları, sosyal medya platformları da müşterinin sıklıkla iletişim kurduğu platformlardır. Müşterilerin birçok platformu kullanması müşteri yapısını anlamaya yönelik analizler için imkân sağlamaktadır. Müşteri yorum ve paylaşımlarından ürün ile ilgili düşüncelerini anlama (duygu analizi), müşteri kitlesini benzer / farklı özelliklerine göre gruplama (müşteri segmentasyonu), müşterilerin satın alma davranışının zaman içindeki değişimini inceleme (satın alma desen analizi), ürün/hizmeti kullanmayı bırakacak müşteri tahmini (müşteri kaybı tahmini), müşteriye önceki davranışına bağlı olarak ürün/hizmet sunma (tavsiye sistemleri) gibi bir çok analizle müşterileri anlamak ve rekabette üstünlük sağlamak istemektedir (Wolniak, 2024). Harvard Business Review tarafından Aralık 2020’de 1091 yöneticiye yapılan ankette imalat sektöründeki katılımcıların %26’sı kişiselleştirilmiş ürünlere olan ihtiyaca yönelik iki yıl içinde yatırım yapılacağını belirtmiştir (Salesforce, 2021). Müşterilerin tüm süreçler için merkeze alınması ihtiyacı planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinin önemini daha da artırmıştır.

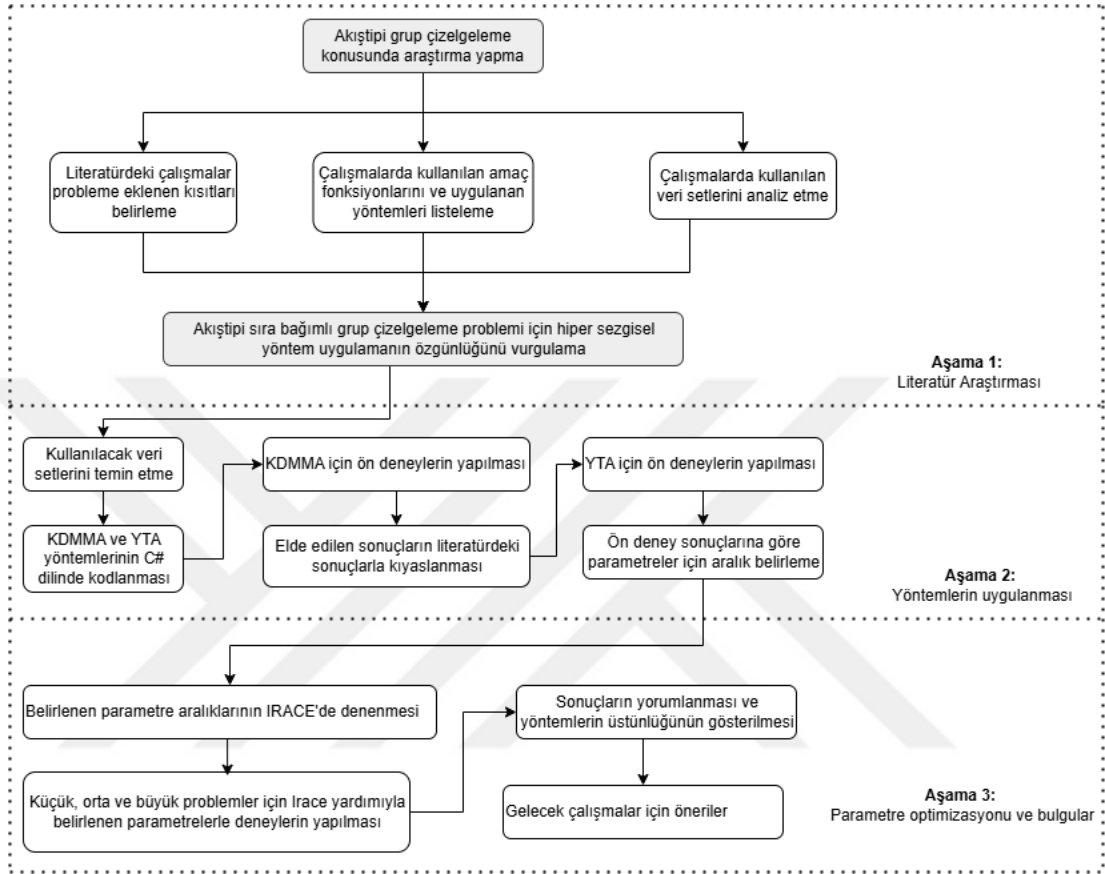
Maliyetleri azaltma yarışı imalat süreçleri için uzun zamandır kritik olsa da etkinlik ve müşteri talep değişimlerine bağlı üretim süreçlerini güncelleme kabiliyetleri günümüz dünyasında önemlidir. Günümüzde müşteri talepleri hiç olmadığı kadar hızlı değişmekte, ürün yaşam döngüsü kısalmakta, ürün türü ve çeşidi hızla artmaktadır. Müşterilerin talepleri artmış olmakla birlikte internet üzerinden alışverişin yaygınlaşmasıyla da üreticiler için rekabet daha da çetinleşmiştir (Keonys, 2020).

Planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinin etkin olarak yapılması günümüz dünyasında rekabet avantajı sağlayan önemli unsurlardandır. İmalat süreçlerinde işlem sürelerinin ve üretken olmayan ayar zamanlarının minimizasyonu ile talep değişkenliğine cevap verebilecek esnek üretim sistemlerinin tasarlanması ancak etkili bir üretim çizelgeleme ile mümkündür (Keonys, 2020). Etkin ve esnek imalat sistemlerinin tasarlanması amacıyla hücreyel imalat sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler grup teknolojisi varsayımı ile operasyonların benzerliklerinden (ortak yönlerinden) faydalanmayı esas alır. Bu kapsamda benzer kavramlar, operasyonlar veya teknolojiler arasında sınıflandırma, gruptama veya birleştirme yapılarak çizelgelemeler yapılır (Burbidge, 1975). Hücreyel imalat sistemleri yarı mamul miktarında düşüş, ayar zamanlarının kısalması, teslim zamanlarının kısalması ve çizelgeleme faaliyetlerinin daha basitleşmesini sağlamaktadır. Hücreyel imalat sistemlerinde benzer işlerin gruplanması ve gruptaki işlerin hücrelerdeki makinelerde işlem görmesi sağlanır. Akış tipi grup çizelgeleme problemleri gruptaki işlerin makinelerde aynı sırayla işlem gördüğü problemlerdir. Gerçek hayatta elektronik ürünlerin üretiminde (Gellogullari ve Logendran2010), otomobil üretiminde (Salmasi vd, 2010), santrifüj pompa üretiminde, (Van Der Zee vd, 2011), uydu üretiminde (Qin vd, 2016), metal delme makineleri üretiminde (Van der Zee, 2013) ve boru imalat süreçlerinde (Yuan vd., 2020) akış tipi grup çizelgeleme problemleri yer almaktadır. Gerçek hayatta sıklıkla uygulanmasına bağlı olarak araştırmacılar tarafından da sıklıkla araştırılan bu problemler literatürde farklı yöntemlerle çözülmüş ve etkin bir çizelgeleme yapılması amaçlanmıştır.

Bu araştırma kapsamında akış tipi sıra bağımlı grup çizelgeleme problemleri ele alınmıştır. Bu problem için makineler arası bekleme olmama durumu incelenmiş ve toplam tamamlanma zamanını en küçükleyecek grup ve iş sıraları belirlenmiştir. Literatürde son zamanlarda yer alan *yapay tavşan algoritması* yerel arama stratejisi olarak uygulanmış ve *memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem* önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği literatürdeki test problemleri çözülerek kanıtlanmış ve bulunan sonuçlar tartışılmıştır.

Şekil1.1’de bu tez çalışması kapsamında yapılan faaliyetlerin akış şeması gösterilmiştir. Araştırma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak literatürdeki probleme uygulanan yöntemler için araştırma yapılmıştır. İkinci olarak ise veri seti araştırmacılarla irtibat kurularak temin edilmiş ve yöntemlerin bilgisayar ortamında

kodlanarak uygulaması geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin parametreleri için ön deneyler yapılmış ve devamında da **irace** otomatik algoritma konfigürasyon aracı kullanılarak parametreler belirlenmiştir. Son aşamada ise bulunan sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 1.1. Araştırma kapsamında yapılan faaliyetler şeması

Bu tez çalışması kapsamında cevabı araştırılan hipotezler ise aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için hiper sezgisel yöntem tasarımı ile etkin sonuçlar bulunabilir mi?
- Yapay tavşan algoritması akış tipi grup çizelgeleme problemlerinde etkin sonuç veriyor mu?
- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için kullanılan ve literatürde yer alan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden etkin sonuç bulanlar hangileridir?
- Bu çalışma kapsamında modifiye edilerek uygulanan çaprazlama operatörleri çözüm uzayının etkin taranmasını sağlıyor mu?

- Literatürdeki yöntemler ve geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar arasında nasıl farklılık vardır?



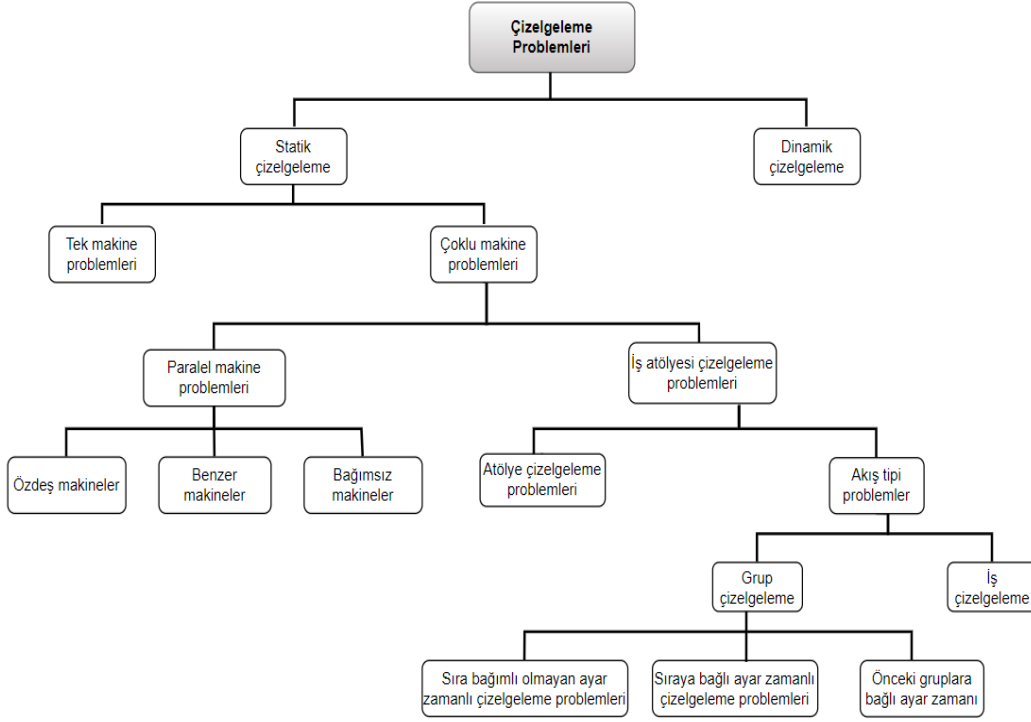
2. TANIMLAR VE LİTERATÜR ÖZETİ

Çizelgeleme faaliyetleri üretim sistemlerinin iyileştirilmesi için önemli olup uzun yıllardır araştırmalara konu olmuştur. Makineler arasında ara stok olmayan (bekleme olmama) akış tipi sıra bağımlı grup çizelgeleme problemleri imalatta sıklıkla uygulanması ve literatürde fazla çalışılmamış olması nedeniyle bu tez çalışmasının konusu olmuştur. Literatürdeki test problemleri kullanılarak uygulanan algoritmanın sonuçları yorumlanmıştır.

Bu bölümde tez çalışmasının konusu olan çizelgeleme problemi için yapılan araştırmalar hakkında bilgi verilmiştir. Öncelikle çizelgeleme problemlerinin farklı türleri tanımlanmış ve tez konusu problemin hangi konu başlığına dâhil olduğu açıklanmıştır. İncelenen araştırma makaleleri dâhil edilen gerçek hayat kısıtı, performans kriteri (amaç fonksiyonu) ve kullanılan yönteme göre tablolar halinde özetlenmiştir.

2.1. Çizelgeleme Problemleri Tanımı ve Sınıflandırılması

Çizelgeleme problemleri işlerin izlediği rotaya, makine durumuna bağlı olarak birçok farklı alt problem olarak araştırılmaktadır. Şekil 2.1’de problem parametre değerleri belirli olan (statik) çizelgeleme problemleri için ağaç şeklindeki gruplandırma görseli sunulmuştur.



Şekil 2.1. Çizelgeleme problemleri sınıflandırması (İnce ve ark., 2024).

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi çizelgeleme problemleri ilk olarak statik ve dinamik olarak ikiye ayrılmaktadır. Probleme dair verilerin önceden bilindiği çizelgeleme problemleri statik çizelgeleme problemi olarak adlandırılırken veri seti optimizasyon yapılırken güncellenebiliyorsa dinamik olarak ifade edilir. Birden fazla makine olması veya tek makineye iş atanmasına göre de problemler alt gruba ayrılır.

Paralel makine problemleri aynı işi yapan makine grubunu ifade eder. Makine grubu işlem hızı aynı olan makinelerden (özdeş) oluşuyorsa özdeş makine problemleri, farklı işlem hızına sahip makinelerden oluşuyorsa benzer makine problemleri ve aynı işi yapan birbirinden farklı makinelerden oluşuyorsa da ilgisiz makineler olarak ifade edilmektedir (Sarıçiçek, 2018).

Akış tipi üretimde atölye çizelgeleme problemlerinin aksine işler tüm makinelerde aynı işlem sırasını takip eder. Üretimin bazı aşamalarında özdeş paralel makineler yer aldığında *esnek akış tipi*, ilgisiz makineler yer aldığında ise *hibrit akış tipi* üretim problemi olarak ifade edilir (Shahvari ve Logendran, 2017).

Grup çizelgeleme problemlerinde ise işler çizelgeleme öncesinde gruplanmıştır ve bir gruptaki işlerin tamamı işlem görmeden başka gruptaki işler işlem görmeye başlamaz (grup teknolojisi varsayımı). Ayar değişimi her bir iş arasında değil iş grubu arasında

yapılmaktadır. Eğer ayar süresi bir önceki işlem gören gruba göre değişiyorsa sıra bağımlı, önceki işlem grubu fark etmeksizin belirlenmişse sıra bağımlı olmayan ve ilgili işten önce işlem gören tüm gruplara bağılı olarak değişiyorsa önceki gruplara bağılı ayar zamanı olarak ifade edilir (Allahverdi ve ark, 2008).

2.2. ATGÇP Literatür Araştırması

Akış tipi grup çizelgeleme problemleri ile ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde gerçek hayatta karşılaşılan birçok kısıt eklenerek problemin farklı versiyonlarının araştırıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda amaç fonksiyonları (performans kriteri) ve kullanılan yöntemler de farklılık göstermektedir. Aşağıdaki bölümlerde incelenen araştırmalar *probleme eklenen kısıtlar, kullanılan amaç fonksiyonları ve yöntemler* perspektifinden ele alınarak açıklanmıştır.

2.2.1. ATGÇP’de incelenen durumlar

Çizelgeleme problemlerinde makine sayısına bağılı olarak problemler alt sınıflara ayrılmakla birlikte gerçek hayatta karşılaşılan durumlara göre de problem yapısı değişebilmektedir. Ek Tablo A.1.’de bu durumların hangi çalışmalarda ele alındığı gösterilmiştir.

Gerçek hayatta sıklıkla karşılaşılan ve incelenen makalelerde sıklıkla analiz edilen durumlar sıra bağımlı ayar zamanı, bekleme olmaması, taşıma zamanı, bloke etme durumlarıdır. Bu durumlardan sıklıkla ele alınan sıra bağımlı ayar zamanı (sequence dependent set up time) işlem gören iş grubunun ayar zamanının bir önceki gruba bağılı olarak değişkenlik gösterdiği durumlardır (Cheng ve ark, 2021a). İkinci olarak sıklıkla incelenen durum olan bekleme olmama durumu (no-wait) işlerin ilk makinede işlem gördükten sonra hiçbir makinede kesintiye uğramadan işlem görmeye devam etmesi durumunu ifade eder (Ying ve ark, 2012). Taşıma zamanı ise belirli kapasitede ve sayıdaki taşıma araçlarının çizelgelemeye dahil edilmesi durumudur (Yuan ve ark, 2021). Bloke etme kısıtı bekleme olmama (blocking) durumuna benzer bir durumdur. Bekleme olmama durumunda işler ilk atandığı makinede işe başladıktan sonra hiç kesinti olmadan (iki makine arasında beklemeden) sıradaki makinede işlem görmektedir. Bloke etme durumunda ise işler makineler arasında bekleyebilmekte fakat bu bekleme boyunca işlem gördüğü son makineyi bloke etmekte ve ona iş atanmasını engellemektedir (Costa ve ark, 2020).

Bu durumlar kadar sık olmasa da aylak zaman ekleme (idle-time), öğrenme etkisi (learning effect), hücreler arası taşıma, belirsiz teslim zamanı, çıkarma (sökme) zamanı, sınırlı tampon, teslim tarihi ve işi erken başlatma zamanı (release date) kısıtları literatürde yer almaktadır.

2.2.2. ATGÇP ‘de kullanılan amaç fonksiyonları

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde grup çizelgeleme problemi için: maksimum tamamlanma zamanı, toplam tamamlanma zamanı, ağırlıklandırılmış gecikme zamanı, ağırlıklandırılmış erken tamamlanma zamanı, toplam gecikme, erken ve geç tamamlanma ve toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanlarının amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı görülmüştür. Problem genellikle tek bir amaç fonksiyonu kullanılarak çözülmüştür ancak birden fazla amaç fonksiyonunun kullanıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur. Kullanılan amaç fonksiyonlarının tüm listesi Ek Tablo A.2.’deki tabloda verilmiştir. Bu amaç fonksiyonlarının tanımı ise Tablo 2.1.’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Sık kullanılan amaç fonksiyonları ve tanımları.

Amaç fonksiyonu	Tanımı
Maksimum tamamlanma zamanı (makespan or C_{max})	Tüm işlerin bittiği süre
Toplam tamamlanma zamanı (total completion time or total flowtime)	Her bir işin son son makinede işlem görüp tamamlandığı süreler toplamı
Ağırlıklandırılmış gecikme zamanı (total weighted tardiness)	İşlerin gecikme sürelerinin ağırlıklarla çarpılarak toplanması
Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı (total weighted completion time)	Her bir işin son son makinede işlem görüp tamamlandığı sürelerin ağırlıklı toplamı
Toplam gecikme (total tardiness)	Gecikme zamanlarının toplamı
Ağırlıklandırılmış erken tamamlanma zamanı (total weighted earliness)	İşlerin erken tamamlanma sürelerinin ağırlıklarla çarpılarak toplanması
Erken ve geç tamamlanma (earliness and tardiness)	Gecikme ve erken tamamlanma sürelerinin toplamı

Bu amaç fonksiyonları ile son yıllarda sürdürülebilirlik konusunda artan farkındalık sonucu çizelgeleme problemlerinde de enerji tüketimi ve karbon emisyonu değerleri (Zheng ve ark, 2024) araştırmalara dahil edilmiştir. İlk olarak 2023 yılında toplam enerji tüketimi de amaç fonksiyonu olarak problem yapısına eklenmiş olup (Sekkal ve Belkaid, 2023; He ve ark, 2023a; Ghorbanzadeh ve ark, 2023) 2024 yılında da enerji tüketimi değeri araştırılmaya devam edilmiştir (Zhang ve ark, 2024; Wang ve ark, 2024a; Peng ve Qin, 2024; Aslan, 2024).

2.2.3. ATGÇP için geliştirilen çözüm yaklaşımları

Grup çizelgeleme çalışmalarının birçoğunda alt sınır mekanizması geliştirilmiştir. Alt sınır geliştirmek geliştirilen algoritmaların kalitesini belirlemek için önemlidir (Sabouni ve Logendran, 2018). Makalede problem için yeni bir algoritma tasarlandığında bu algoritmanın bulduğu sonuç alt sınırların bulduğu en iyi sonuç ile oranlanır. Bu oran değerleri kıyaslanarak geliştirilen algoritmaların etkinliği değerlendirilebilir (Liou ve Hsieh, 2015).

İncelenen makalelerde sütun geliştirme (Sabouni ve Logendran, 2018), dal ücret algoritması (Sabouni ve Logendran, 2018; Keshavarz ve ark, 2019; Keshavarz ve ark, 2015; Keshavarz ve Salmasi, 2014; Salmasi ve ark, 2010) algoritmaları alt sınır geliştirmek için kullanılan yöntemlerdir. Alt sınır geliştirilmeyen makalelerde ise yöntemin etkinliği bulunan sonuçların, literatürdeki algoritmaların bulduğu sonuçlarla kıyaslanmasıyla değerlendirilmiştir.

İncelenen makalelerde hangi yöntemlerin kullanıldığı Ek Tablo A.3.'te sunulmuştur. Tabloda da görüldüğü gibi genetik algoritma, tabu arama algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, tavlama benzetimi, değişken komşuluk arama, memetik algoritma, çok amaçlı genetik algoritma ve karınca kolonisi optimizasyonu sıklıkla kullanılan yöntemler arasındadır. Tabloda bu yöntemler sütun olarak ifade edilmiş olup diğer kullanılan yöntemler ise açıklamalar sütununda belirtilmiştir.

Tabloda sıklıkla kullanılan diğer iki metot olan matematiksel model geliştirilmesi ve alt sınır geliştirilmesi de sütunlarda gösterilmiştir. İncelenen makalelerin birçoğunda matematiksel model geliştirilmiştir (Goli ve Keshavarz, 2022; Cheng ve ark, 2021a; Cheng ve ark, 2021b; Yuan ve ark, 2021; Yuan ve ark, 2020; Costa ve ark, 2020; Sabouni ve Logendran, 2018; Keshavarz ve ark, 2019; Keshavarz ve ark, 2015; Lin ve Ying, 2019; Behjat ve Salmasi, 2017; Fichera ve ark, 2015; Bozorgirad ve

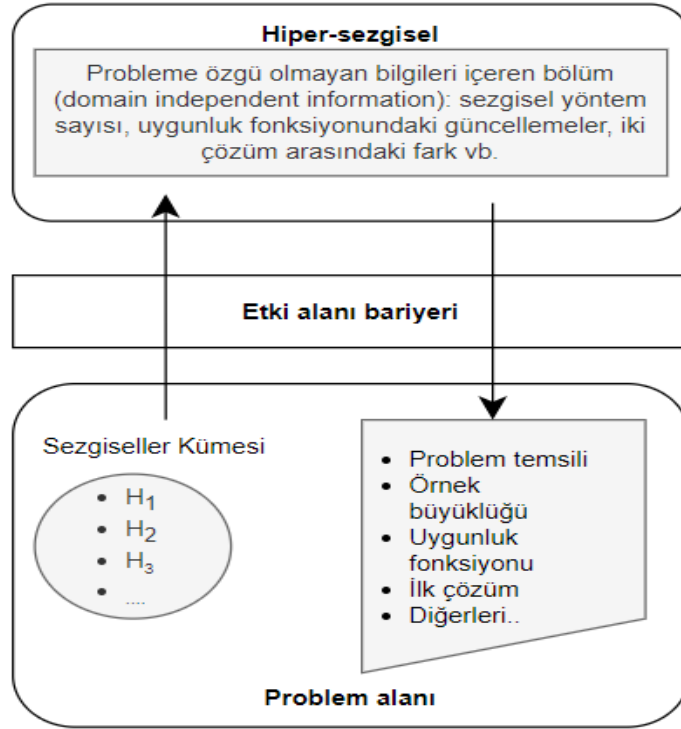
Logendran, 2023; Sabouni ve Logendran, 2013; Keshavarz ve Salmasi, 2013; Lu ve Logendran, 2013; Naderi ve Salmasi, 2012; Shahvari ve ark, 2012; Bozorgirad ve Logendran, 2012; Salmasi ve ark, 2011; Zandieh ve Karimi, 2011; Solimanpur ve Elmi, 2011; Gelogullari ve Logendran, 2010; Salmasi ve ark, 2010; Behnamian ve ark, 2010).

Bu çalışmalarda da görüldüğü gibi literatürde hiper sezgisel yaklaşım akış tipi grup çizelgeleme problemlerine uygulanmamıştır. Bu çalışmanın da metodolojisini oluşturan hiper sezgisel yöntemler ve memetik algoritmalar konularında yapılan çalışmalar bir sonraki bölümde analiz edilmiştir.

2.3. Çizelgeleme Problemlerinde Hiper Sezgisel Yaklaşımlar

Literatürde kombinatoriyel problemlerin çözümü için geliştirilen hiper sezgisel yöntemler *sezgisel yöntem üreten* (heuristic generation) veya *sezgisel yöntem seçen* (heuristic selection) sezgisel olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemlerde direkt olarak probleme özgü bilgi kullanmadan muhtemel yöntemler (heuristics) veya yöntemle özgü farklı yöntem bileşenleri kombinasyonları (heuristics components) içinde arama yapan bir tasarım vardır (Burke ve ark, 2013). Probleme özgü olarak geliştirilen sezgisel yöntemler farklı problem büyüklüklerinde veya başka problem türlerine uygulanamamaktadır. Geliştirilmesi zahmetli olan sezgisel yöntemlerin bu dezavantajını ortadan kaldırmak için hiper sezgisel yöntemler tasarlanmıştır. Hiper sezgisel yöntem tasarımıyla geliştirilmesi için çok zaman harcanan sezgisel yöntemlerin tek bir problem yerine bir grup problemi çözebilmesi amaçlanmaktadır (Vázquez-Rodríguez ve Ochoa, 2011).

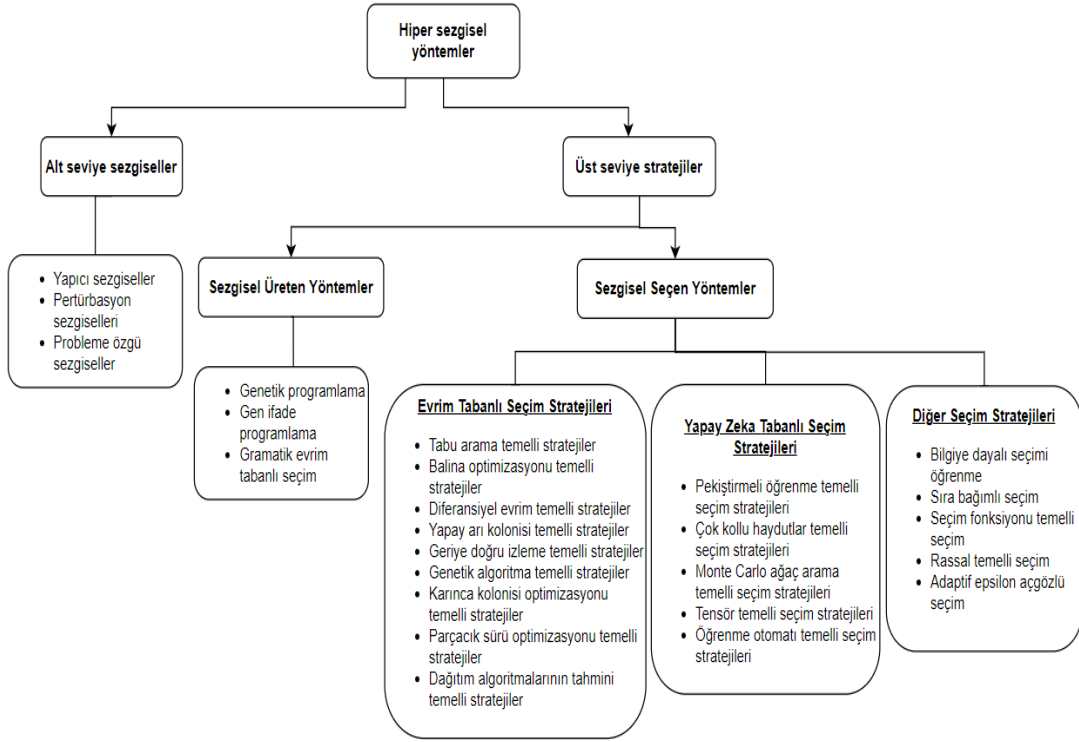
Hiper sezgiseller tasarlanırken probleme özgü bilgilere erişip sonuç bulan kısım (problem alanı (domain problem layer)) ve kullanılan alt seviye (low-level) sezgisellere yönelik olan kısım (hyper heuristic layer) ayrı iki katman olarak tasarlanır (bakınız Şekil 2.2). Hiper sezgisellere erişim sağlanan katmanda alt seviye sezgiseller (low level heuristics) arasından hangisinin daha iyi sonuç bulduğu (belirlenen amaç fonksiyonuna göre) belirlenir. Bu katmanda aynı sezgisel için hangi operatörün uygulanacağına da karar verilebilir (Bacha ve ark, 2019). Örneğin memetik algoritmada kullanılan çaprazlama, mutasyon ve tepe tırmanması operatörlerinin alternatifleriyle birlikte uygulanması bir hiper sezgisel yöntem tasarımıdır.



Şekil 2.2. Hiper sezgisel yöntem işleyişi (Burke ve ark, 2011).

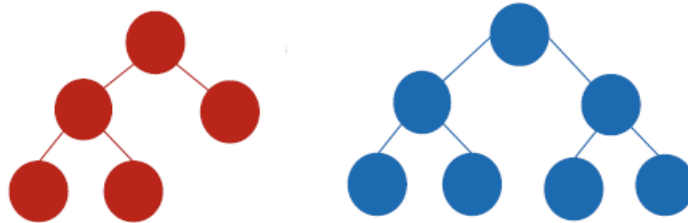
Problem alanı kısmında ise probleme özgü bilgiler yer alır. Belirlenen alt seviye sezgiseller ve bunlara dair parametre değerleri bu alanda yer almaktadır.

Hiper sezgisel yöntemler *geri bildirim mekanizması* içerecek şekilde de tasarlanabilmektedir. Geri bildirim mekanizması problem çözümü esnasında kullanılıyorsa *çevrimiçi öğrenme*, problem algoritma tarafından çözüldükten sonra bildirim yapıyorsa *çevrimdışı öğrenme* olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte öğrenme mekanizması entegre edilmemiş hiper sezgiseller de mevcuttur (Burke ve ark, 2010). Şekil 2.3'te literatürde yer alan hiper sezgisel yöntemler için yapılan sınıflandırma verilmiştir.



Şekil 2.3. Hiper sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması (Zhang ve ark, 2023).

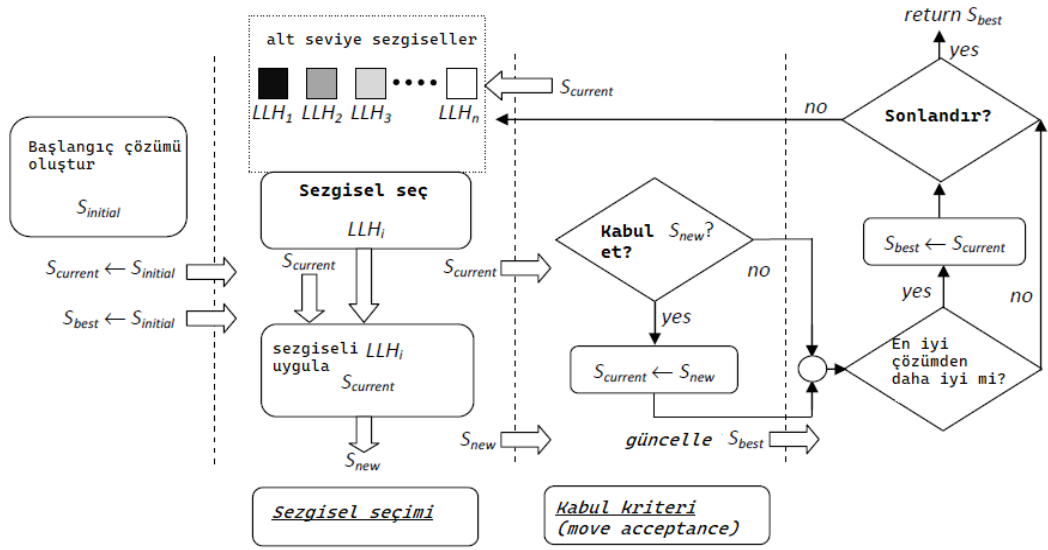
Sezgisel yöntem üreten hiper sezgisellerde genetik programlama, gen ifade programlama ve gramatik evrim tabanlı seçim yaklaşımları kullanılmaktadır. Üretim çizelgeleme problemlerinde dağıtım kurallarının oluşturulmasında (dispatching rules) ağaç yapısında kromozomlara sahip genetik programlama yaklaşımı sıklıkla kullanılmaktadır (Bouazza, 2023). Genetik programlama genetik algoritmalarda olduğu gibi çaprazlama, mutasyon ve uygunluk fonksiyonuna sahiptir. Ancak genetik programlama yaklaşımında kromozomlar ağaç yapısındadır ve genetik algoritmada olduğu gibi sabit bir kromozom yapısı yoktur. Üretim çizelgeleme problemlerinde genetik programlama yaklaşımının kullanımı 2010 yılından bu güne kadar ciddi bir artış göstermiştir (Nguyen ve ark, 2017).



Şekil 2.4. Genetik programlama ağaç yapısı örneği (Nguyen ve ark, 2017).

Sezgisel yöntem seçen hiper sezgiseller ise belirlenen alt seviye sezgisel yöntemler içinden yöntem seçerek ilerler. Bu yöntemlerde ele alınan problemin çözümü için geliştirilen (literatürde mevcut olan) yöntemler alt seviye sezgiseller olarak kodlanır. Böylece hiper sezgisel yöntemin çalışması sırasında farklı sezgiseller birlikte çalışmış olur.

Şekil 2.5'te tek bir çözüm üzerinden (popülasyon olarak değil) sezgisel seçen yöntemlerin çalışma mantığı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tek nokta arama akış şeması (Kheiri, 2014).

Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi sezgisel seçen yöntemlerde başlangıç çözümü oluşturmak ilk adımdır. Bu çözüm rassal olarak oluşturulabileceği gibi probleme uygun sezgisel yöntem kullanarak da oluşturulabilir. Daha sonra seçilen sezgisel uygulanır ve bulunan çözüm kabul kriterine uygun mu diye kontrol edilir. Eldeki çözüm kabul kriterine uygunsa kaydedilir. Bu çözüm daha önceki adımlarda kaydedilen en iyi çözümle kıyaslanır ve en iyi çözümden daha iyiyse en iyi çözüm olarak atanır. Algoritmanın bu işlemleri sonlandırma şartı sağlanana kadar tekrarlanır.

2.3.1. Üretim çizelgeleme problemlerinde hiper sezgisel yöntemler

Bacha ve ark, (2019) tarafından yapılan çalışmada permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi için etkin genetik algoritma tasarımı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında algoritma operatörleri ve bazı parametreler opsiyonlarıyla birlikte kodlanmış ve süreç boyunca seçim yapılması sağlanmıştır. Çalışmada hiper sezgisel katmanda genetik algoritmanın farklı konfigürasyonları kodlanmıştır. Popülasyon büyüklüğü 50 ile 200

arasında, iterasyon sayısı 800 ile 1000 arasında belirlenmiştir. Başlangıç popülasyonu için 2, çaprazlama için 7, mutasyon için 4 farklı strateji kodlanmıştır. Bu çalışmada hiper sezgisel katmanında bu konfigürasyonlardan hangisinin seçileceği hiper kromozomla belirlenmiştir. Çalışmada SJOX, SBOX, SJ2OX, SB2OX akış tipi çizelgeleme problemi için geliştirilen çaprazlama çeşitleri olarak belirtilmiştir (Bacha vd., 2019).

PFSP için yinelemeli yerel arama (iterated local search) ve değişken komşuluk arama tabanlı bir hiper sezgisel yöntem tasarlanmıştır (Yahyaoui vd., 2015). Bu yöntem alt seviye sezgisellerin farklı versiyonlarını içermektedir ve *altı farklı yinelemeli yerel arama algoritmasını* içermektedir. Tek bir başlangıç çözüm stratejisi ve yerel arama stratejisi (değişken komşuluk arama) uygulanmış, pertürbasyon için iki strateji (rassal derecelendirme ve rassal komşuluk) ve kabul kriteri olarak da üç strateji (tüm değişimler, sadece iyileştirme sağlayanlar ve büyük değişim sağlayanlar) uygulanmıştır.

2.3.2. Memetik algoritmalar

Adaptif evrimsel stratejide memler jenerasyon boyunca evrimsel süreçlerden geçerek elde edilir. Memetik algoritmalar genetik algoritmalara benzer bir şekilde çalışır, yapısında yerel arama bulundurmasıyla genetik algoritmalarından farklılık gösterir. Literatürde farklı yerel arama stratejileri ile geliştirilen memetik algoritmalar vardır. Krasnogor and Smith tarafından geliştirilen çok memli (Multi-meme) memetik algoritmada ise memler yerel arama sezgisellerini temsil eder ve çözümlere paralel olarak evrimsel süreçlere dâhil olur. Kromozom yapısında genetik ve memetik yapı birlikte kodlanır. Çok memli yapılar için kararlı bir yapı tasarımı (Steady State Multi Meme) optimizasyon problemlerinde daha iyi sonuçlar alınmasını sağlamıştır (Özcan ve ark, 2016). Bu yapının çok amaçlı tek makine çizelgeleme problemlerinde iyi sonuçlar bulduğu da yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Deliktaş, 2022).

Çok memli memetik algoritmada *yenilik oranı (innovation rate)*, *arama derinliği (depth of search)* ve *mutasyon oranı (intensity of mutation)* parametreleri aramayı yönlendirir. Yenilik oranı memlerin rassal olarak güncellenip güncellenmeyeceğine, arama derinliği tepe tırmanma (hill climbing) yerel stratejisinin uygulanma durumuna ve mutasyon oranı da mutasyon yapılıp yapılmayacağına karar vermede kullanılır. Bu oranların yüksek olması sıklıkla (neredeyse her iterasyonda) güncelleme yapılmasını

sağlar. Tüm süreçler durdurma koşulu sağlanana kadar devam eder (Özcan ve ark, 2016).

Mem yapısında kromozom yapısına ek olarak kodlanan mem yapısında ihtiyaç duyulan parametre değerleri ve seçilen operatör türü belirlenmektedir. Memler basit miras mekanizması ile bir önceki popülasyondan miras olarak alınmaktadır. Yenilik oranı düşükse yeni mem oluşturulma oranı düşmekte bunun sonucu olarak da oluşturulan mem yapısı başlangıçta oluşturulan mem yapısına çok fazla bağlı olmaktadır. Yenilik oranı düşük olan durumda popülasyon sayısını artırmak evrim süreci boyunca yeni memlerin oluşturulma ihtimalin artırmakta fakat bu durumda da daha fazla hafızaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dezavantajlı duruma yönelik olarak kararlı durum çok memli memetik algoritma geliştirilmiştir (Özcan ve ark, 2016). Geliştirilen algoritma ile her bir alternatifin geçmiş döneme dair başarı puanı (skoru) kaydedilmektedir. Skora bağlı olarak alternatifler arasında yarış yapılmakta ve iterasyonlar boyunca geçmiş adımlarda iyi performans gösteren alternatiflerin seçilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde memler için kullanılan hafıza gereksinimi fazla olsa da popülasyon sayısının büyük tutulması durumunda ihtiyaç duyulan hafıza gereksinimi kadar değildir.

Çözüm iyileştirici hiper sezgisel yöntemlerde (perturbative hyper-heuristics) sezgisel seçme aşamasında aşağıdaki tabloda verilen yaklaşımlardan biri kullanılır (Özcan ve ark, 2012).

Tablo 2.2. Sezgisel seçim stratejileri (Özcan ve ark, 2012).

Sezgisel Seçimi	Açıklaması
Rassal (simple random)	Alt seviye sezgisel rassal olarak seçilir.
Rassal iniş (random descent)	Rassal olarak sezgisel seçilir ve seçilen sezgisel çözümü iyileştirdiği sürece kullanılmaya devam edilir
Rassal permütasyon iniş	Alt seviye sezgiseller için sıralı liste rassal oluşturulur. Oluşturulan listedeki sezgiseller sırayla uygulanır. Uygulanan sezgisel daha kötü çözüm bulana kadar uygulanmaya devam edilir, daha kötü çözüm bulunca listede bir sonraki sıradaki sezgisele geçilir. Listedeki tüm sezgiseller bitince baştan itibaren uygulanmaya başlanır.
Açgözlü	Her sezgiseli aynı aday çözüme ayrı ayrı uygula ve çözümü en çok iyileştireni seç
Hassas (peckish)	Sezgisellerin bir alt kümesini aynı çözüme uygula ve en iyi çözümü veren seç
Seçim fonksiyonu (Choice function)	Her bir sezgisel bireysel performansına, bir önceki sezgisele bağlı performansına ve sezgisel seçiminden itibaren geçen süreye bağlı dinamik olarak hesaplanan skorlara göre seçilir.
Pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning)	Her sezgisel seçimi etkileyen bir fayda değerine sahiptir. Bu değer seçilen sezgiselle daha iyi çözüm elde edilirse artırılır. Seçilen sezgiselle daha iyi çözüm elde edilemezse sezgisel önceden belirlenen adaptasyon oranına göre cezalandırılır.
Tabu arama (tabu search)	Bu yöntem pekiştirmeli öğrenmedeki stratejiyi kullanır. Daha kötü çözüm bulan sezgiseller bir liste olarak hafızada tutulur ve sezgisel seçimi bu listede olmayanlar arasından yapılır.



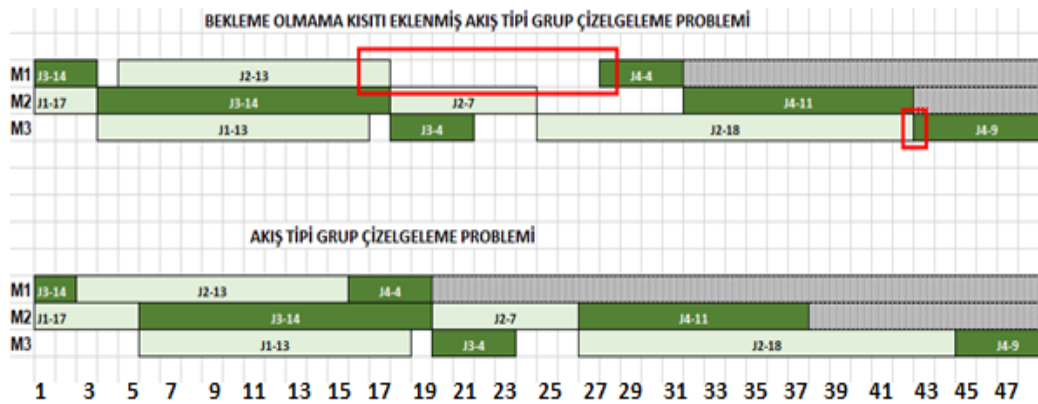
3. ATGÇP VE UYGULANAN YÖNTEM HAKKINDA BİLGİ

Bu bölümde ilk olarak çalışmanın konusu olan problem ve problemin performans kriterinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. İkinci olarak ise geliştirilen yöntemin detayları açıklanmıştır. Son olarak ise kullanılan veri seti detaylarına yer verilmiştir.

3.1. Problem Detayları ve Amaç Fonksiyonu Hesaplanması Hakkında Bilgi

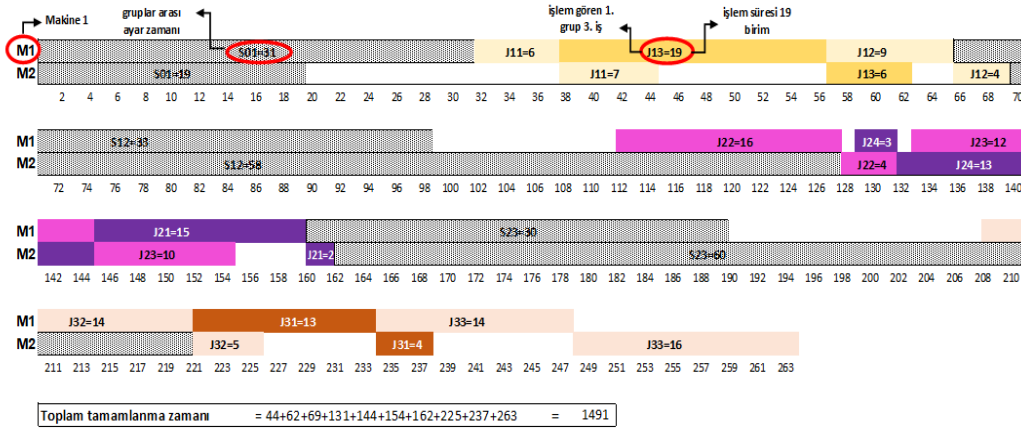
Bu araştırma kapsamında akış tipi sıra bağımlı grup çizelgeleme problemi için bekleme olmama durumu (no-wait) araştırılmıştır. Bu problemde her bir iş işleme başladıktan sonra makineler arasında beklemeden bir sonraki makinede işlem görmektedir. Oluşturulan çizelgelerin üstünlüğü toplam tamamlanma zamanı hesabı üzerinden yapılmaktadır.

Şekil 3.1’de bekleme olmama durumunun işlerin atanmasını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Ardışık olarak işlem gören ikinci ve dördüncü işler için bekleme olmaması durumu olmadığında (Şekil 3.1’de alt taraftaki gant şemasında) ikinci ve dördüncü işler ilk makinede ardışık olarak işlem görmektedir. Bu durumda dördüncü iş (J4) ikinci makinede bir önceki işin (J2) bitmesini beklemektedir (19-27. dakikalar arasında). Bekleme olmama kısıtı eklendiğindeyse ikinci makinedeki beklemenin önüne geçmek için işin ilk makinede işleme başlaması ötelenir. Böylece makineler arası bekleme olmaması sağlanır.



Şekil 3.1. Bekleme olmama kısıtı gant şeması örneği.

Tüm işler belirlenen sıraya göre bekleme olmama kısıtı dikkate alınarak atanıp bittiğindeyse toplam tamamlanma zamanı hesabı *her bir işin son makinedeki tamamlanma zamanlarının* toplanmasıyla elde edilir. Şekil 3.2’de toplam tamamlanma zamanının nasıl hesaplandığını gösteren örnek bir gant şeması sunulmuştur.



Şekil 3.2. Gant şeması örneği.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi her bir iş makineler arasında bekleme olmayacak şekilde atanmaktadır. Bu örnekte grup sırası 1-2-3 olup her bir grup için iş sırası ise (1-3-2, 2-4-3-1, 2-1-3) şeklindedir.

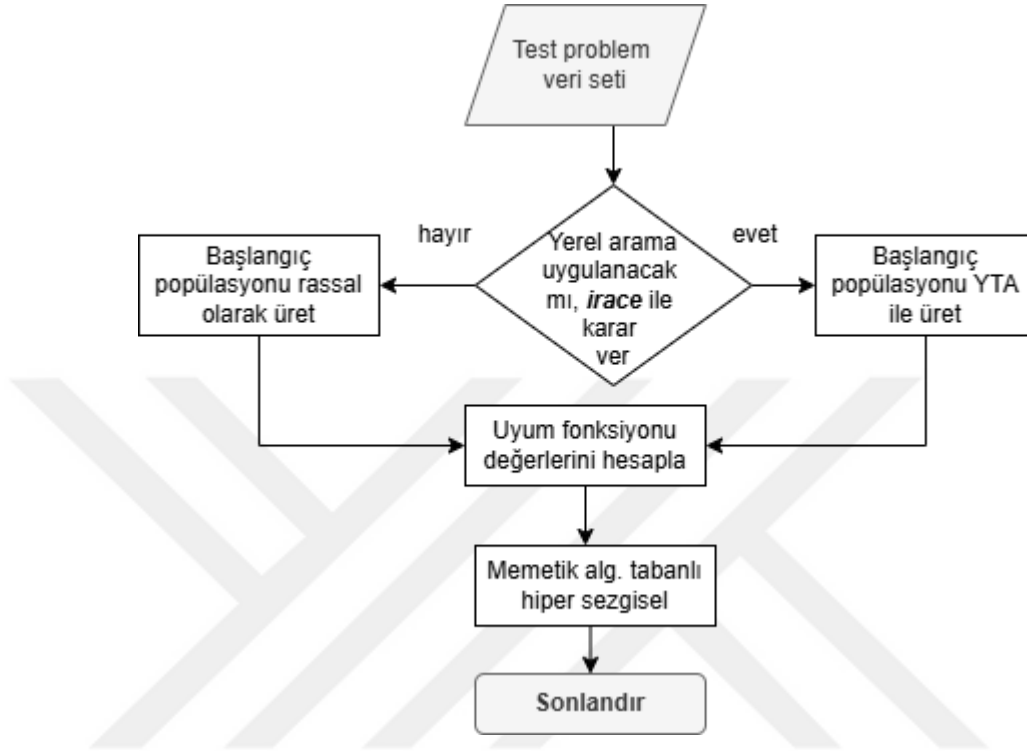
3.2. Geliştirilen Yöntem Hakkında Bilgi

Yapay tavşan algoritmasını başlangıç çözüm elde etmede kullanan, memetik algoritma tabanlı hibrit hiper sezgisel yöntem bu çalışma kapsamında geliştirilmiş ve akış tipi grup çizelgeleme problemine uygulanmıştır. Problemden gruplar arası ayar zamanları iş sırasına bağlı olarak değişmekte (sıra bağımlı) ve işler arası bekleme olmamaktadır.

Yapay tavşan algoritması tavşanların doğadaki yem arama ve avcı hayvanlardan kaçınmak için oyuk açarak saklanma stratejisinden esinlenilerek geliştirilen bir sürü algoritmasıdır. Memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem ise genetik algoritmaya yerel arama teknikleri ve iterasyonlar boyunca iyi olan algoritma bileşenlerini seçme yetisi kazandırılmış bir üst seviye yöntemdir.

Şekil 3.3’te geliştirilen yöntemin genel şeması görülmektedir. Yöntemde ilk olarak başlangıç çözüm oluşturulur. Başlangıç çözüm ya rassal olarak üretilmekte ya da yerel arama ile (yapay tavşan algoritması) elde edilen çözümlerden oluşmaktadır. Başlangıç

çözümün rassal mı yoksa YTA ile mi üretileceğine **irace** (R tabanlı parametre konfigürasyon aracı) ile karar verilir. Uyum değeri hesabı toplam tamamlanma zamanı hesabını ifade etmektedir. Başlangıç popülasyonundaki her aday çözüm için uyum değeri hesaplandıktan sonra hiper sezgisel yöntem uygulanmaktadır.



Şekil 3.3. Hibrit hiper sezgiseli genel gösterim.

Bu bölümde ilk olarak yapay tavşan algoritması hakkında bilgi verilmiş ve adımları açıklanmıştır. Geliştirilen hiper sezgisel yöntem bileşenleri ise alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

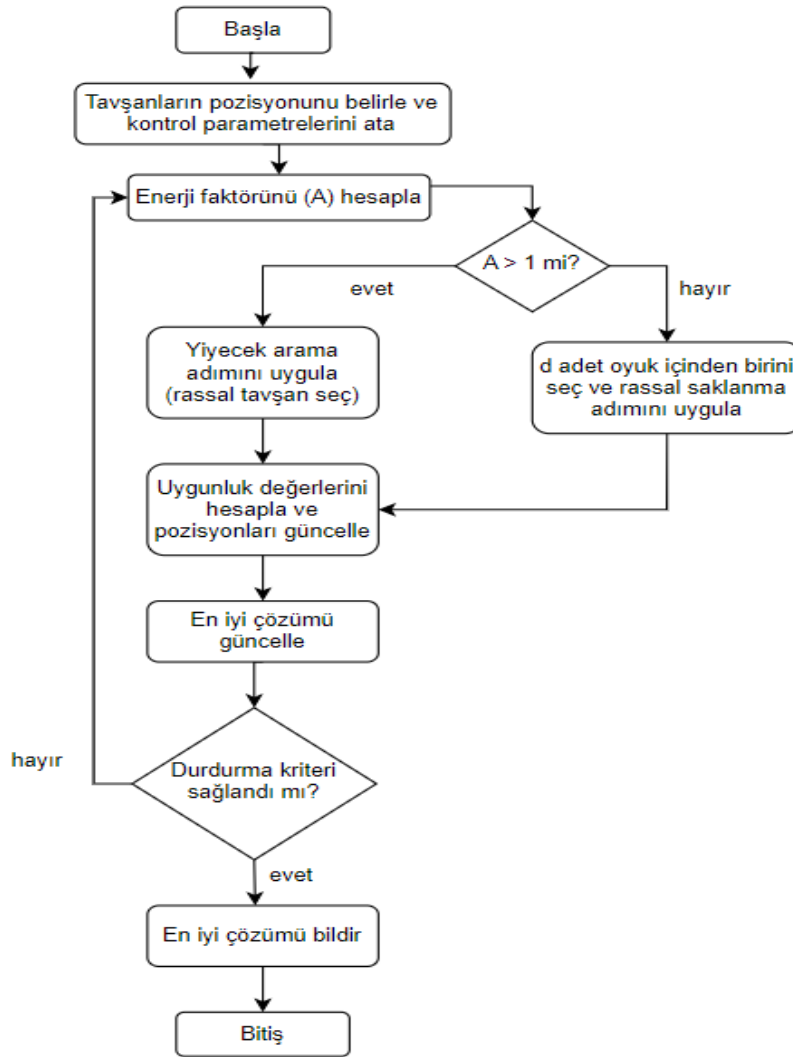
3.2.1. Yapay tavşan algoritması (YTA)

Yapay tavşan algoritması “*Tavşanlar kendi yuvalarının yakınındaki çimleri yemezler*”. (Wang vd., 2022) deyiminden esinlenerek tavşanların doğal hayatta yem arama davranışını modelleyen bir sürü algoritmasıdır. Popülasyondaki her bir tavşan çözüm aranan problemin bir aday çözümüdür. Yapay tavşan algoritmasının parametreleri sadece *popülasyon sayısı* ve *iterasyon sayısı*dır. Parametre sayısının az olması algoritmanın basit ve etkin olmasını sağlamaktadır (Sharma ve Naick, 2024). Optimizasyon problemlerinin çözümünde son zamanlarda kullanılan algoritma tıbbi teşhis verileriyle özellik seçimi (Awadallah vd., 2023), dağıtılmış üretimin optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması (Sharma ve Naick, 2024), hisse senedi fiyat tahmini (Gülmez, 2023), rulman yatağı arıza teşhisi (Wang vd., 2022), çimento basınç

dayanımı tahminleme (Sun, 2024), fotovoltaik sistem optimizasyonunda (Bennet ve Subramaniam, 2024 ve Kumar ve Titus, 2024), köprü yapılarında yapısal hasar tespitinde (Huu vd., 2024), bilişsel radyo spektrum tahsisinde (Wang vd., 2024), ince dönen kirişlerdeki çatlak tespiti (Abella vd., 2024) problemleri için uygulanmıştır.

Tavşanlar enerjileri yüksek iken (yem aramaya ilk çıktıklarında) başka tavşanların bölgesine geçerek yem ararlar. Bu adım sezgisel aramada çözüm uzayının keşfini (exploration) sağlamaktadır. Düşük enerji durumunda ise rassal olarak kendine yakın bir oyuk açarak oraya geçmektedir. Bu adım da sezgisel aramada çözüm uzayında bir bölgenin derinlemesine incelenmesini (exploitation) sağlamaktadır.

Şekil 3.4'te yapay tavşan algoritmasının çalışma adımlarını içeren akış şeması verilmiştir.

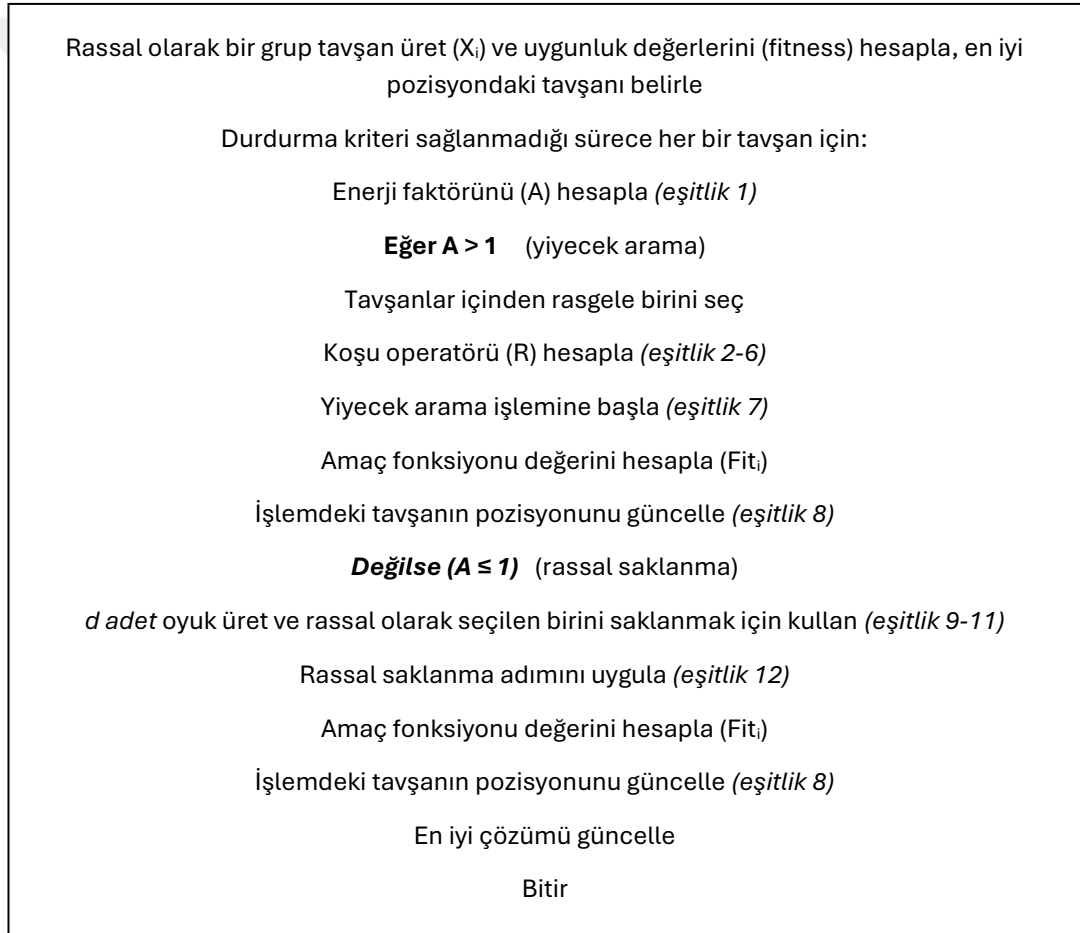


Şekil 3.4. YTA akış şeması.

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi her bir aday çözüm (tavşanlar) için pozisyonlar rasgele belirlenerek algoritma çalışmaya başlar. Enerji faktörü (A) değerinin büyüklüğüne göre rassal saklanma veya yiyecek arama adımları uygulanır. Seçilen adım sonucunda bulunan yeni çözüm değerinin amaç fonksiyon değeri hesaplanarak önceki sonuçlardan daha iyi bir değere sahipse en iyi çözümün güncellenmesi sağlanır. Durdurma kriteri sağlanana kadar algoritma adımları tekrarlanır.

3.2.1.1. Yapay tavşan algoritması formülasyonu

Algoritma adımları boyunca matematiksel formüllerle tavşanların pozisyonları ve değişken değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.5'te algoritma adımlarını gösteren sözde kod verilmiştir (Awadallah vd., 2023).



Şekil 3.5. YTA sözde kodu.

Şekil 3.5'te kullanılan değişkenler ve gerekli olan formüller aşağıda verilmiştir (Sharma vd., 2024).

n: popülasyon büyüklüğü

r: rassal sayı (r_1, r_2, r_3, r_4, r_5)

t: iterasyon sayısı (1, 2, .., T)
sayısı

T: maksimum iterasyon

R: koşu operatörü (running operator)
(running length)

L: adım büyüklüğü

m: yön vektörü (mapping vector)

b_{ij}(t) i. tavşanın j. oyuğu

d: problem boyutu (dimension)
pozisyonu

K_i(t) tavşanın t anındaki

H: saklanma parametresi (hiding parameter)

Yapay tavşan algoritması parametreleri sadece **popülasyon sayısı** ve **iterasyon sayısı**dır. Parametre sayısının az olması algoritmanın basit ve etkin olmasını sağlamaktadır (Sharma ve Naick, 2024).

Formüller:

$$A(t) = 4 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \ln \frac{1}{r} \quad (3.1)$$

$$R = L \cdot m \quad (3.2)$$

$$L = (e^1 - e^{((t-1)/T)^2}) \cdot \sin(2\pi r_2) \quad (3.3)$$

$$m(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p == q(l) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad p = 1, d \text{ and } l = 1, \dots, [r_3 \cdot d] \quad (3.4)$$

$$q = \text{randperm}(d) \quad (3.5)$$

$$n_1 \sim N(0, 1) \quad (3.6)$$

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{K}_{j(t)} + R \cdot (\vec{K}_i(t) - \vec{K}_j(t)) + \text{round}(0.5 \cdot (0.05 + r_1)) \cdot n_1$$
$$i, j = 1, \dots, n \text{ and } j \neq i \quad (3.7)$$

Konum güncelleme (yiycek arama veya rassal saklanmadan sonra konum güncellemesi):

$$\vec{K}_i(t+1) = \begin{cases} \vec{K}_i(t) & \text{if } f(\vec{K}_i(t)) \leq f(\vec{X}_i(t+1)) \\ \vec{X}_i(t+1) & \text{if } f(\vec{K}_i(t)) > f(\vec{X}_i(t+1)) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\vec{b}_{i,j}(t) = \vec{K}_i(t) + H \cdot q \cdot \vec{K}_i(t) \quad (3.9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \text{ and } j = 1, 2, \dots, d$$

$$H = \left(\frac{T-t+1}{T}\right) \cdot r_4 \quad n_2 \sim N(0, 1) \quad (3.10)$$

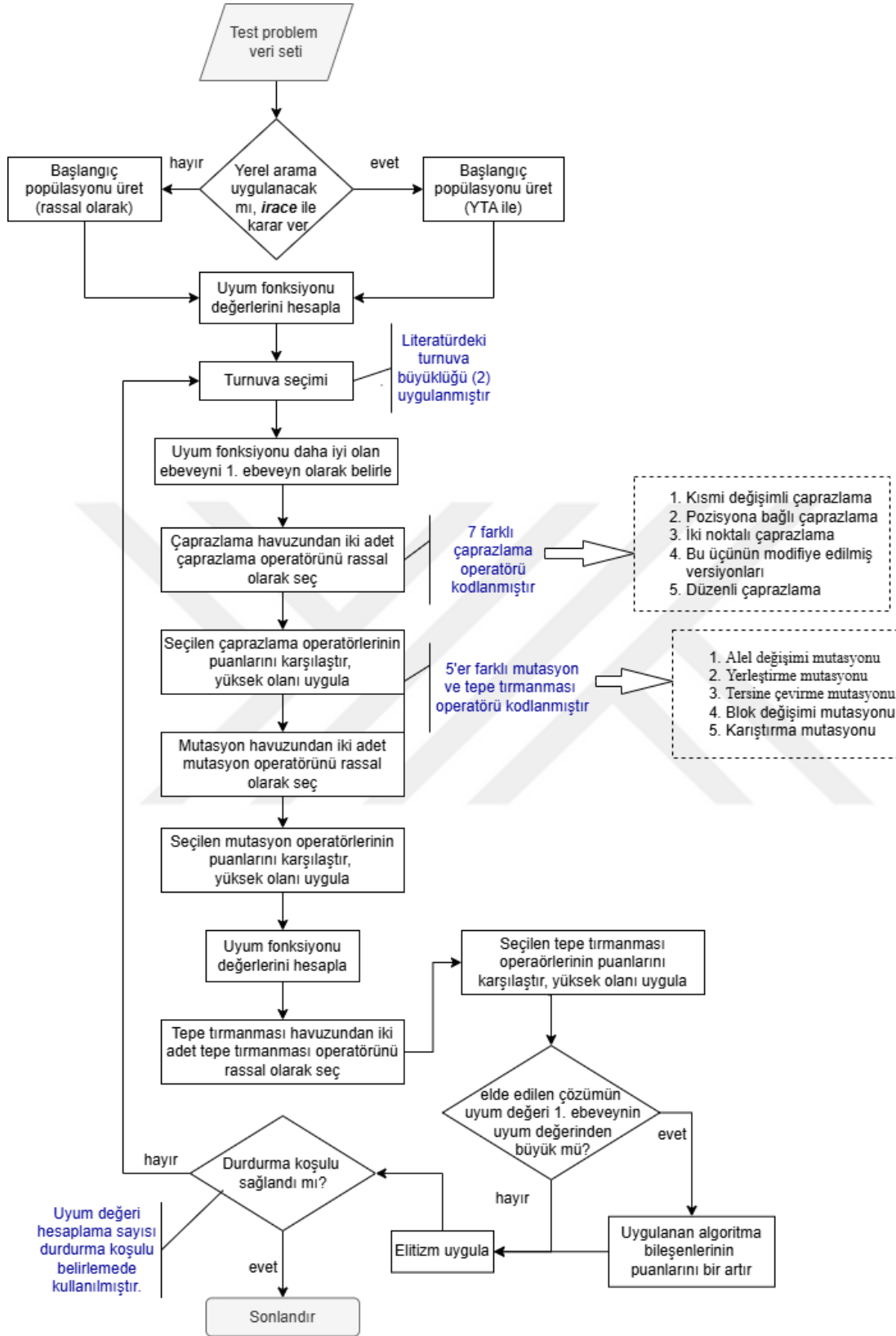
$$q(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p == j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad p = 1, \dots, d \quad (3.11)$$

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{K}_i(t) + R \cdot (r_4 \cdot b_{i,r}(t) - \vec{K}_i(t)) \quad i=1, \dots, n \quad (3.12)$$

Akış tipi grup çizelgeleme problemi kesikli bir problemdir ve sürekli değerlerle çalışan yapay tavşan algoritmasının uygulanması için çözüm değerlerinin sürekli değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Literatürde sürekli çözüm değerleriyle çalışan parçacık sürü optimizasyonu algoritması kesikli yapıdaki probleme uygulanırken **dereceli sıra değeri kodlaması** uygulanarak dönüşüm sağlanmıştır. Yapay tavşan algoritması uygulanırken de dereceli sıra değeri kodlaması (Ranked Order Value encoding) (Hajinejad vd., 2011) kullanılmıştır. Buna göre her bir çözüm değeri (iş ve grup sıraları için) 0 ile 1 arasında ondalıklı sayılar üretilmektedir. Bu sayıların küçükten büyüğe sıralanmasıyla iş (veya grup) sıraları elde edilmektedir. Örneğin çözüm olarak [0,21, 0,85, 0,72] değeri algorithmada lokasyon değerini gösterirken problem için sırasıyla 1., 3. ve 2. işleri ifade etmektedir.

3.2.2. Hibrit hiper sezgisel yöntem

Memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem adaptif yapısı sayesinde her bir adımda kodlanan alt seviye sezgiseller içinden mevcut çözümden daha iyi sonuç veren sezgisellerin skorlarını artırma ve böylece daha sık uygulanmasını sağlama mantığına dayanır. Bu çalışma kapsamında çaprazlama, (7 alternatif) mutasyon (5 alternatif) ve tepe tırmanması (5 alternatif) operatörleri ile mutasyon oranı (5 alternatif) ve arama derinliği (5 alternatif) parametreleri alt seviye sezgisellerdir. Her bir iterasyon sonunda eğer üretilen yeni çözüm (çocuk bireyler) kullanılan ebeveyn çözümlerden daha iyiye ilgili alt seviye sezgiselin puanı 1 artırılır (ödüllendirilir). Bu şekilde geri bildirim sistemi tasarlanması literatürde pekiştirmeli öğrenme (Özcan ve ark, 2012) olarak geçmektedir. Algoritma çalışma mantığı olarak genetik algorithmayla tepe tırmanması operatörü içermesi yönüyle farklılık gösterir. Şekil-3.6'da hibrit hiper sezgisel yöntem akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.6. Hibrit hiper sezgisel yöntem akış şeması.

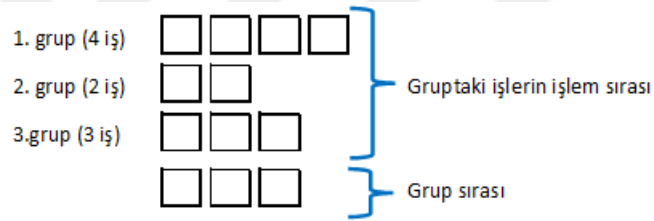
Algoritma ilk olarak başlangıç yerel arama yapılacak mı sorusuna cevap arar. Bu kapsamda parametre optimizasyonu *irace* (R tabanlı parametre konfigürasyon aracı)

ile yapılır ve başlangıç çözümün nasıl olacağına karar verilir. Yerel arama uygulanacaksa başlangıç çözüm YTA ile bulunur, uygulanmayacaksa rassal olarak üretilir.

3.2.2.1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

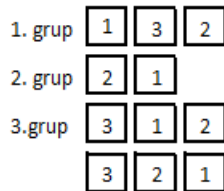
Başlangıç popülasyonu oluşturulması her bir aday çözümün oluşturulması ve bu çözümler için mem yapısının oluşturulmasını ifade eder. Aday çözümler kromozom olarak ifade edilir ve tamsayılardan oluşur. Kromozomdaki her bir sayı iş veya iş grubunu ifade eder. Kromozom yapısı ve mem yapısı aşağıda açıklanmıştır.

Problem için uygun kromozom yapısı permütasyon kodlama olarak belirlenmiştir. Bu kodlamada $g+1$ satırlık (grup sayısından bir fazla satırlık) matris oluşturulmakta ve her satır ilgili gruptaki iş sayısı kadar eleman içermektedir. Son satır ise grup sırasını vermektedir (Naderi & Salmasi, 2012). Şekil 3.7’de kromozom şablonu gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Permütasyon kodlama yapısındaki kromozom şablonu.

Örnek olarak 3 grup ve her grupta sırasıyla 3, 2 ve 3 iş bulunan problem için kromozom yapısı Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu kromozom yapısına göre 3. grup ilk işlem görecektir. Üçüncü grupta ilk olarak 3. operasyon sonra da sırasıyla 1. ve 2. operasyonlar işlem görecektir. 3. gruptan sonra 1. ve 2. gruplar sırasıyla işleme alınacaktır.

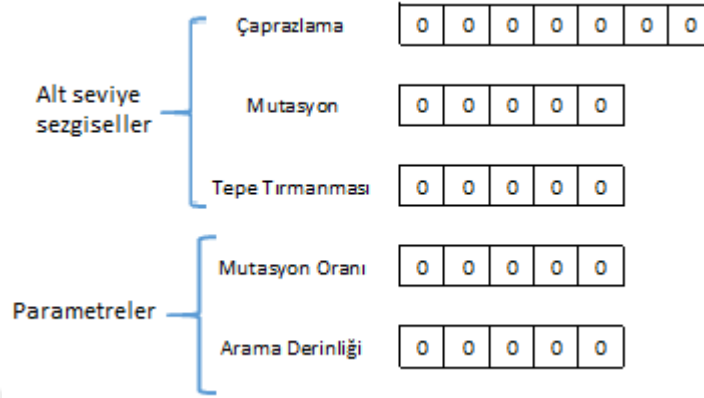


Şekil 3.8. 3 grup ve 8 iş içeren kromozom örneği.

Başlangıç popülasyonu oluşturulurken her bir aday çözüm için kromozom yapısına ek olarak mem yapısı geliştirilir. Memler her bir *alt seviye sezgiselin* ve kodlanan parametrelerin skor değerlerini (puanlarını) kaydeden yapılardır. Algoritma çalışırken iterasyonlar boyunca kromozom yapısı ile mem yapısındaki skorlar da güncellenir. Alt

seviye sezgiseller algoritmada kullanılan operatörler ve parametrelerden oluşmaktadır. Çaprazlama, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri ile mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri alt seviye sezgiselleri oluşturmaktadır.

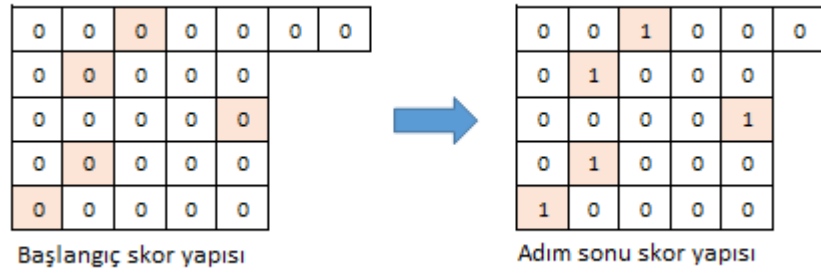
Şekil 3.9’da aday çözümler için başlangıç mem yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Mem yapısı örneği.

Oluşturulan mem yapısı ile çaprazlama için 7, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri için de 5’er opsiyon için skor yapısı oluşturulmuş olur. Ayrıca mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri için de 5’er opsiyon skor yapısında bulunur. Her bir alternatif farklı bir algoritma oluşturacağı için $7 \times 5^4 = 4375$ alternatif kombinasyonu arasından ele alınan problem için iyi sonuç veren algoritma bileşenleri skor yapısı ile öne çıkmaktadır. Başlangıçta tüm skor değerleri 0 değerini alır ve seçim iki (turnuva büyüklüğü 2 alınmıştır) alternatif arasından rassal olarak yapılır. İlgili adım sonunda ebeveyn kromozomdan daha iyi uyum değerine sahip çocuk kromozom elde edildiğinde o iterasyonda kullanılan tüm operatörler ve parametrelerin skor değeri bir artırılır. Böylece adımlar boyunca iyi sonuç bulan bileşenlerin uygulanma oranı artar.

Şekil 3.10’da ilgili iterasyon sonu mem yapısındaki skor değişimi gösterilmiştir. Bu görselde renkli ifade edilen hücreler o iterasyonda seçilen bileşenlerdir. Bu kapsamda, 3. çaprazlama operatörü, 2.mutasyon operatörü, 5. tepe tırmanması operatörü uygulanmıştır. Ayrıca 2. mutasyon oranı ve 1. arama derinliği değeri kullanılmıştır. Adım sonunda elde edilen çözüm ata kromozomdan (1.ebeveyn) daha iyi uyum değerine (TTZ) sahip olduğu için mem yapısındaki skorlar güncellenmiştir (adım sonu skor yapısında ilgili hücrelere 1 eklenmiştir).



Şekil 3.10. Skor yapısı değişim örneği.

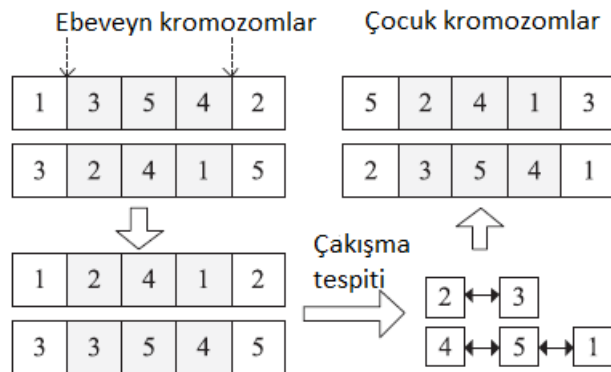
Oluşturulan popülasyondaki bireyler için uyum değeri (amaç fonksiyonu) hesabı için işlerin toplam tamamlanma zamanı hesaplanır. Bu hesaplamanın detayları *Bölüm 1*’de açıklanmıştır.

3.2.2.2. Çaprazlama operatörü

Çaprazlama operatör havuzu için 7 farklı çaprazlama operatörü kodlanmıştır. Bunlardan 4 tanesi literatürde mevcut çaprazlama operatörleridir. 3 çaprazlama operatörü (2, 4 ve 7. operatörler) ise bu çalışma kapsamında mevcut yöntemlerin modifiye edilmesi ile oluşturulmuştur.

Kısmi değişimli çaprazlama (Partial mapping crossover)

Rasgele belirlenen iki nokta arasındaki genler karşılıklı olarak değiştirilir. Bu değişim sonucunda problem detaylarına göre kromozom yapısında bozulmalar varsa çakışma tespiti yapılır (Yuan vd., 2020). Şekil 3.11’de çaprazlamanın nasıl yapıldığı açıklanmıştır.



Şekil 3.11. Kısmi değişimli çaprazlama operatörü çalışma mantığı.

Bu çaprazlama her bir kromozom için *sadece bir kromozom parçası* (matris şeklindeki kromozom gösteriminde tek bir satır) rassal olarak seçilmekte ve çaprazlama uygulanmaktadır.

Modifiye edilmiş kısmi değişimli çaprazlama

Bu operatör çalışma mantığı olarak kısmi değişimli çaprazlama ile aynıdır ancak tek bir kromozom parçası yerine tüm kromozom parçalarında değişim yapılır. Çaprazlama sonucu matris şeklindeki kromozom gösteriminin her satırı değiştirilmiş olur.

Pozisyona bağlı çaprazlama (Position based crossover)

Bu çaprazlamada iki veya daha fazla gen rassal olarak belirlenir. Birinci ebeveyndeki seçilen genlerin sırası ikinci ebeveyndeki sıraya göre değiştirilir. Daha sonra ikinci ebeveyndeki seçilen genlerin sırası birinci ebeveyndeki sıraya göre düzenlenir (Costa vd., (2020), Costa vd., (2017), Fichera vd., (2015), Costa vd., (2014)).

Ebeveyn 1	1	4	3	5	2
Ebeveyn 2	5	1	2	3	4
Çocuk 1	1	2	3	5	4
Çocuk 2	5	1	4	3	2

Şekil 3.12. Pozisyona bağlı çaprazlama operatörü çalışma mantığı.

Şekil 3.12’de iki ebeveyn kromozom parçasından yeni nesillerin oluşma mekanizması gösterilmiştir. Ele alınan problemde kromozomdaki her bir satır pozisyona bağlı çaprazlama yapılabilecek kromozom parçalarıdır. Çaprazlama bu kromozom parçaları üzerinden yapılmaktadır. Her iki ebeveyn kromozomda da aynı kromozom parçası (1. satır, 2. satır vb.) seçilerek çaprazlama yapılmaktadır.

Bu çaprazlama her bir kromozom için *sadece bir kromozom parçası* (matris şeklindeki kromozom gösteriminde tek bir satır) rassal olarak seçilmekte ve çaprazlama uygulanmaktadır.

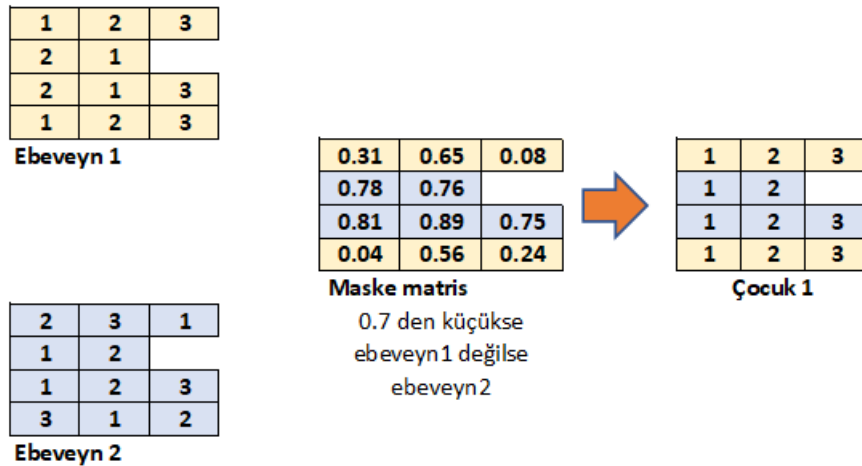
Modifiye edilmiş pozisyona bağlı çaprazlama

Bu operatör çalışma mantığı olarak pozisyona bağlı çaprazlama ile aynıdır ancak tek bir kromozom parçası yerine tüm kromozom parçalarında değişim yapılır. Çaprazlama sonucu matris şeklindeki kromozom gösteriminin her satırı değiştirilmiş olur.

Düzenli çaprazlama (Uniform parametrised crossover)

Popülasyondaki iki kromozom rassal olarak seçilir. Belirlenen kromozom yapısında (belirlenen grup sayısı ve iş sayısına göre) rasgele değerlerden oluşan maske matris oluşturulur. Maske matristeki her bir gen değeri belirlenen değerden (0,7'den) büyükse ilgili gen için birinci ebeveyndeki değer, değilse ikinci ebeveyndeki değer çocuk kromozoma kopyalanır. Çaprazlama için seçilen kromozomlardan hangisinin birinci ebeveyn hangisinin ikinci ebeveyn olarak seçileceğine araştırmacı karar verir (Ebrahimi vd., 2014).

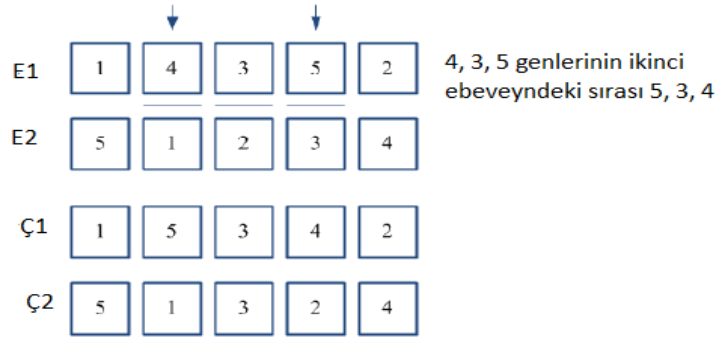
(Ebrahimi vd., 2014) yaptıkları çalışmada daha iyi uygunluk değerine sahip olan kromozomu birinci ebeveyn, diğerini ikinci kromozom olarak seçmişlerdir. Bu çaprazlama örneğinde tek bir çocuk elde edilir. Popülasyonun kalan kısmı rassal olarak oluşturulan kromozomlarla tamamlanır (Kurz & Askin, 2004). Akış tipi grup çizelgeleme problemi için 0,7 olasılık değeri ile uygulanan düzenli çaprazlama örneği Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Düzenli çaprazlama operatörü çalışma mantığı.

İki noktalı çaprazlama (Two point crossover)

Bu çaprazlama operatörü, sıralı çaprazlamanın değiştirilmiş versiyonnu olarak yer almaktadır (Costa vd., (2017); Qin vd., (2016); Fichera vd., (2015) ve Costa vd., (2014)). Operatör seçilen iki geni ve bu genler arasında kalan genleri diğer ebeveyne göre sıralama mantığına dayanır. Şekil 3.14'te iki noktalı çaprazlama operatörü çalışma mantığı görülmektedir.



Şekil 3.14. İki noktalı çaprazlama operatörü çalışma mantığı.

İki noktalı çaprazlamada da her bir kromozom için *sadece bir kromozom parçası* (matris şeklindeki kromozom gösteriminde tek bir satır) rassal olarak seçilmekte ve çaprazlama uygulanmaktadır.

Modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama

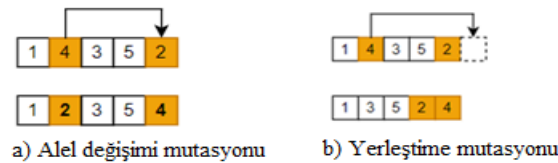
Bu operatör çalışma mantığı olarak iki noktalı çaprazlama ile aynıdır ancak tek bir kromozom parçası yerine tüm kromozom parçalarında değişim yapılır. Çaprazlama sonucu matris şeklindeki kromozom gösteriminin her satırı değiştirilmiş olur.

3.2.4.3. Mutasyon operatörü

Mutasyon operatörü aramanın yerel en iyiden kurtulması için seçilen gen veya gen grubunun değiştirilmesini sağlar. Mutasyon operatör havuzu için 5 farklı mutasyon operatörü kodlanmıştır.

Alel değişimi mutasyonu

Bu mutasyon, rasgele seçilen iki genin yer değiştirmesi prensibiyle çalışmaktadır (Costa vd., (2017), Fichera vd., (2015), Costa vd., (2014)). Şekil 3.15a’da görüldüğü gibi ikinci ve beşinci genler (4 ve 2 değerini alan genler) rassal olarak seçilmiştir. Bu genler karşılıklı olarak değiştirilerek yeni kromozom oluşturulmuştur.



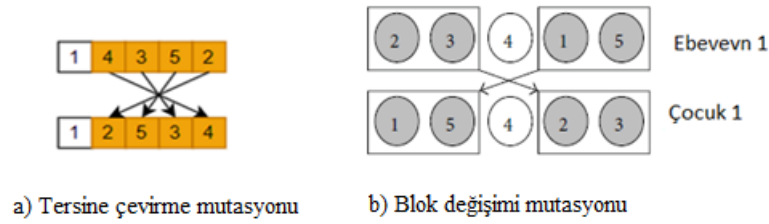
Şekil 3.15. Alel değişimi ve yerleştirme mutasyon örnekleri.

Yerleştirme (insertion) mutasyonu

İş sıralamasındaki bir gen rasgele seçilir ve rasgele seçilen ikinci genin yanına (sağına) yerleştirilir (Liou vd., 2013). Şekil 3.15b’de mutasyonun nasıl uygulandığı gösterilmiştir.

Tersine çevirme mutasyonu (inversion)

İş sıralamasındaki iki gen rasgele seçilir ve bu iki gen arasındaki genler tersten sıralanır. Şekil 3.16a’da tersine çevirme mutasyonu örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Tersine çevirme ve blok değişimi mutasyon örnekleri.

Blok değişimi mutasyonu

Rasgele seçilen iki gen grubu yer değiştirir (Costa vd., (2017), Fichera vd., (2015), Costa vd., (2014)). Şekil 3.16b’de blok değişimi mutasyonu örneği gösterilmiştir.

Karıştırma mutasyonu (scramble)

Rasgele seçilen iki gen ve arasındaki tüm genler rasgele sıralanır (karıştırılır).

3.2.2.3. Tepe tırmanması operatörü (Hill Climbing)

Tepe tırmanması operatörü rassal aramada çözüm uzayındaki belirli bir bölgenin detaylı incelenmesini (exploitation) sağlar. Bu doğrultuda eldeki bir çözümün komşuluğundaki çözümler kümesi belirlenir ve bu küme içinden amaç fonksiyon değeri en küçük olan çözüm alternatifi ebeveyn kromozomdaki çözümle yarışır. Yarış sonucu tepe tırmanması operatörü ile elde edilen çözüm daha iyi bir alternatifse ebeveyn kromozom güncellenir. Mutasyon operatöründe tek bir değişimle aday çözüm bulunur fakat tepe tırmanması operatöründe bir dizi komşu çözüm değerlendirilerek yeni çözüm elde edilir.

Bu tez çalışması kapsamında mutasyon operatörü olarak uygulanan alel değişimi, yerleştirme, tersine çevirme, blok değişimi ve karıştırma mutasyonları tepe tırmanması

operatörü olarak da uygulanmıştır. Bu operatörlerin nasıl çalıştığı bir önceki bölümde anlatıldığı için burada tekrar açıklanmasına gerek görülmemiştir.

Memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel için sözde kod Deliktaş, (2022) çalışmasından düzenlenerek Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekil 3.17’den de görüldüğü gibi yöntem belirlenen popülasyon sayısı kadar bireyin rassal olarak üretilmesiyle başlar. Tüm alt seviye sezgiseller için skorlar mem yapısında “0” olarak atanır. Toplam tamamlanma zamanı hesabı her işin son makineden çıktığı sürelerin toplamı olarak hesaplanır.

Algoritma 1 Memetil Algoritma Tabanlı Hiper Sezgisel Yapay Kodu

Girdi: Algoritma parametreleri ve veri seti
Çıktı: Nesiller boyunca elde edilen en iyi birey
1: Rassal olarak n adet bireyli başlangıç popülasyonu ($Pop_{başl}$) oluştur
2: Mem yapısındaki her fayda değerine 0 ata
3: Her bireyin amaç fonksiyonu değerini hesapla (bknz: Bölüm 2’deki hesaplamalar)
4: $Pop_{güncel} \leftarrow Pop_{başl}$
5: durdurma kriteri sağlanana kadar uygula
6: Ebeveyn₁ $\leftarrow$ Eş seç ($Pop_{güncel}$, tur büyüklüğü)
7: Ebeveyn₂ $\leftarrow$ Eş seç ($Pop_{güncel}$, tur büyüklüğü)
8: **eğer** amaç fonksiyon değeri (Ebeveyn₂) > amaç fonksiyon değeri (Ebeveyn₁) **ise**
9: karşılıklı değiştir (Ebeveyn₁, Ebeveyn₂)
10: **eğer bitiş**
11: Ebeveyn₁ çaprazlama $\leftarrow$ çaprazlama operatörü seç (çaprazlama operatör havuzu, tur büyüklüğü)
12: Ebeveyn₁ mutasyon $\leftarrow$ mutasyon operatörü seç (mutasyon operatör havuzu, tur büyüklüğü)
13: Ebeveyn₁ tepe tırmanması $\leftarrow$ tepe tırmanması operatörü seç (tepe tırmanması operatör havuzu, tur büyüklüğü)
14: Ebeveyn₁ yoğunluk $\leftarrow$ mutasyon yoğunluk değeri seç (mutasyon yoğunluk değeri havuzu, tur büyüklüğü)
15: Ebeveyn₁ derinlik $\leftarrow$ tepe tırmanması derinlik değeri seç (derinlik değeri havuzu, tur büyüklüğü)
16: Çocuk $\leftarrow$ Çaprazlama uygula (Ebeveyn₁ çaprazlama, Ebeveyn₁, Ebeveyn₂)
17: Çocuk' $\leftarrow$ Mutasyon uygula (Ebeveyn₁ mutasyon, Ebeveyn₁ yoğunluk, Çocuk)
18: Çocuk' amaç fonksiyonu değerini hesapla (bknz: Bölüm 2’deki hesaplamalar)
19: Çocuk" $\leftarrow$ Tepe tırmanması operatörünü uygula (Ebeveyn₁ tepe tırmanması, Ebeveyn₁ yoğunluk, Çocuk')
20: Ebeveyn₁ mem yapısını Çocuk" kopyala
21: Çocuk" mem skorlarını güncelle
22: $Pop_{güncel} \leftarrow$ Yer değiştir ($Pop_{güncel}$, Çocuk")
23: **eğer bitiş**

Şekil 3.17. Memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem pseudo kodu.

Tüm popülasyondaki bireyler içinden rassal olarak iki ebeveyn seçilir ve amaç fonksiyon değeri daha küçük olan ebeveyn ilk ebeveyn olarak atanır. Daha sonra sırasıyla çaprazlama, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri ebeveynlere uygulanır. Bu üç operatör için de ilk olarak havuzdan turnuva sayısı kadar (turnuva sayısı 2 olarak alınmıştır) kodlanan operatör rassal olarak seçilir. Seçilen operatörler puanlarına göre kıyaslanarak puanı büyük olan uygulanır. Algoritma başlangıcında tüm puanlar “0” olduğu için seçim puanı eşit iki operatör arasından rassal olarak yapılır. Çaprazlama işlemi önceden belirlenen çaprazlama parametre değerine göre uygulanır. Eğer üretilen rassal değer çaprazlama oranından küçükse çaprazlama gerçekleştirilir, değilse çaprazlama uygulanmaz. Mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri için de

turnuva büyüklüğü kadar (2 tane) operatör seçilip puanı büyük olan uygulanır. Son olarak üretilen çocuk kromozomlardan biri ebeveynlerden daha iyi sonuç buluyorsa o iterasyonda seçilen tüm operatörlerin puanı 1 arttırılır.

3.3. Kullanılan Veri Seti Hakkında Bilgi

Geliştirilen yöntemin etkinliğini ölçmek için Salmasi, (2005) tarafından oluşturulan ve sıklıkla kullanılan (Cheng ve ark, (2021b); Behjat ve Salmasi, (2017); Naderi ve Salmasi, (2012)) test problemleri kullanılmıştır. Toplamda 270 adet problem örneğinin bulunduğu bu veri setinde 2, 3 ve 6 makine içeren problem örnekleri oluşturulmuş ve problemler küçük, orta ve büyük olarak gruplandırılmıştır. Problemler (Salmasi, 2005 tarafından) üretilirken iş sayısı, grup sayısı ve makineler arası ayar zamanı oranları dikkate alınmıştır. Her bir problem örneği için iş sayısı, grup sayısı, işlem zamanı ve ayar zamanları kesikli düzgün dağılıma uygun olarak belirlenen alt ve üst sınır değerleri arasında üretilmiştir. Grup sayıları 1 ile 5 arasında kesikli düzgün dağılıma uygun üretilmiş ise küçük, 6 ile 10 arasında kesikli düzgün dağılıma uygun üretilmişse orta büyüklükte ve 11 ile 16 arasında kesikli düzgün dağılıma uygun üretilmişse de büyük örnekler olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1’de veri setinde yer alan örnek büyüklüğüne göre grup sayıları ve her örnek seti için üretilen problem sayısı verilmiştir. Küçük boyutlu problemlerde toplam iş sayısı 29 ile 49 arasında, orta büyüklükteki problemlerde 65 ile 71 arasında ve büyük boyutlu problemlerde ise 108 ile 117 arasında değişmektedir. Herhangi bir grupta en fazla 10 iş bulunmaktadır.

Tablo 3.1. Problem örneklerindeki grup sayıları ve en büyük iş sayıları.

	Grup sayısı	Örnek sayıları		
		2M	3M	6M
Küçük örnekler	1 – 5	18	54	18
Orta Örnekler	6 – 10	18	54	18
Büyük Örnekler	11 – 16	18	54	18
Toplam örnek sayısı		54	162	54

Ayrıca Tablo 3.2.’de her makine için küçük, orta ve büyük örneklere ait grup sayısı, gruptaki en büyük iş sayısı ve toplam iş sayısı sunulmuştur. Tablodan da görüldüğü gibi toplam iş sayısı en fazla 117 olarak 6 makine örneklerinde, grup sayısı ise en fazla 16 olarak 2 makine problemlerinde yer almaktadır.

Tablo 3.2. Veri setindeki küçük, orta ve büyük boyutlu problem örnekleri.

	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı
2M	2	3	5
	10	10	71
	16	10	108
3M	2	4	7
	10	10	66
	15	10	110
6M	2	4	7
	10	10	65
	15	10	117

Araştırmacılardan talep edilerek elde edilen 270 adet problem örneği geliştirilen yöntem performansını değerlendirmede kullanılmıştır. Kullanılan veri setine ait detaylar Ek Tablo B.1.'de yer alan tabloda verilmiştir. Ayrıca veri seti *GitHub platformu* üzerinden paylaşılmış ve bağlantı adresi Ek B.2.'de verilmiştir. Bu kapsamda her bir örnek dosyasında matris şeklinde işlerin işlem süreleri, gruplar arası ayar süreleri, grup sayısı ve toplam iş sayısı her bir örnek için yöntem performansını test etmede kullanılan verilerdir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında geliştirilen metodun uygulama detayları ve bulunan sonuçlar açıklanmıştır. Geliştirilen yöntemin parametreleri otomatik algoritma konfigürasyon aracı **irace** paket programı ile yapılmıştır. Ön deney aşaması, **irace** ile parametre optimizasyonu, çözülen problemlerden elde edilen sonuçlar, istatistiksel analiz sonuçları ve algoritma bileşenlerinin performans analizi bu bölüm kapsamında açıklanmıştır.

4.1. Otomatik Algoritma Konfigürasyonu: **irace**

Uygulanan algoritma için parametre konfigürasyonu otomatik parametre konfigürasyon aracı olan R programlama dili tabanlı **irace** paket programı ile belirlenmiştir. İlk olarak değerleri belirlenecek olan parametre kümesi oluşturulur. Her bir parametre için alt ve üst sınır değerleri ve parametre yapısı (kesikli, sürekli veya kategorik) belirlenir. Daha sonra **irace** rassal olarak parametre konfigürasyonları oluşturur. Her iterasyonda iyi sonuç veren (elit) konfigürasyonlar ve yeni üretilen konfigürasyonlar test problemleri çözülerek yarışdırılır. Hangi konfigürasyonun başarısız bulunduğu ve eleneceğine istatistiksel test yapılarak karar verilir. İstatistiksel test olarak Friedman'ın parametrik olmayan iki yönlü varyans analizi kullanılarak bağımlı gruplar arasındaki fark analiz edilir. Tüm deneyler sonuçlanınca da en iyi parametre konfigürasyonu bulunmuş olur (López-Ibáñez ve ark, 2016).

Literatürde **irace** ile parametre değerleri bulunan algoritmalara yapay arı kolonisi algoritması (Deliktaş, 2023), genetik ve memetik algoritmalar (Bastos ve ark, 2020), NSGA II parametre belirleme (Nebro ve ark, 2019), çok amaçlı evrimsel algoritma (Prestes ve ark, 2018) örnek olarak gösterilebilir.

4.1.1. Ön deney aşaması

Geliştirilen hibrit hiper sezgisel yöntem için gerekli olan tüm parametreler tek tek değiştirilip sonuçlar incelenerek ön deneyler yapılmıştır. Burada amaç parametreler için belirli bir aralık değeri belirlemek ve otomatik algoritma konfigürasyon aracında (**irace**) kullanılacak parametre seçimi için alt ve üst sınır değerleri belirlemektir. Bu

doğrultuda durdurma koşulları (en büyük iterasyon sayısı ve sabit değer), popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve arama derinliği değerleri her defasında sadece bir parametre değiştirilerek deneyler yapılmıştır. İterasyon sayısı yapay tavşan algoritması için durdurma koşuludur. Hiper sezgisel yöntemde durdurma koşulu ise sabit değer kullanılarak hesaplanmıştır. Belirlenecek sabit değer ile ilgili örnekteki toplam iş sayısı çarpılarak algoritma durdurma koşulu belirlenmektedir.

Hiper sezgisel yöntemde çaprazlama oranı skor yapısına dâhil edilmemekte, mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri ise skor yapısına (mem yapısına) dâhil edilmektedir. Buna bağlı olarak çaprazlama oranı için her defasında tek bir değer denenmiş, mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri için ise bir dizi değer (5'er adet) denenmiştir.

Uygulanan test problemlerinde grup sayısı ve toplam iş sayısına bağlı olarak farklı parametrelerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna bağlı olarak parametre sonuçları raporlanırken makine sayısı (2, 3 ve 6), ve örnek grubu (küçük, orta ve büyük) olarak gruplandırılarak ilenmiştir.

Yapılan deneyler sonucu popülasyon büyüklüğü için 50 ve 100 arası değerler, durdurma sabiti değerinin 800 olduğu, iterasyon değerinin 2000 olduğu deneylerde daha iyi sonuçlar bulunmuştur. Bu değerler her bir örnek için aynı derecede iyi sonuç vermemektedir dolayısıyla parametre optimizasyonu yaparken bu değerler için bir aralık belirlenmesi uygun bulunmuştur.

4.1.2. Algoritma konfigürasyon aracı (irace) ile bulunan parametre değerleri

Ön deney aşamasında elde edilen değerler **irace** için alt ve üst sınır değerlerini oluşturmuştur. Bu parametre değerlerine ek olarak, başlangıç çözümün rassal veya YTA ile üretilmesi alternatiflerinden hangisinin daha iyi sonuç vereceği de **irace** ile belirlenmiştir. Bu kapsamda **irace**'te ikili değişken tanımlanarak başlangıç çözümün YTA ile bulunmasının daha iyi sonuç verip vermediği test edilmiştir. Tüm parametre belirleme analizleri **irace**'de makine sayısı ve problem büyüklüğü (küçük, orta, büyük) dikkate alınarak bağımsız deneyler oluşturularak yapılmıştır. Mutasyon oranı ve arama derinliği değerleri için ön deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Irace ile bulunan parametre değerleri.

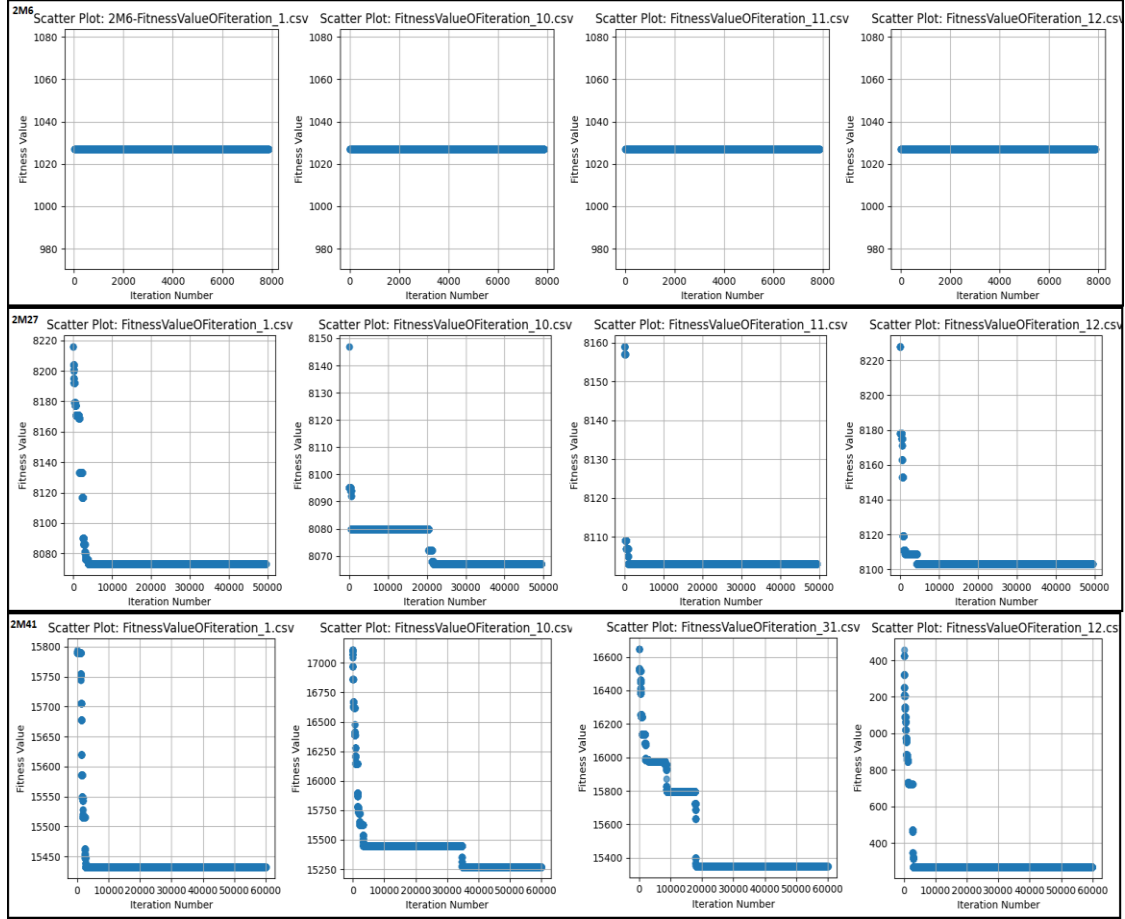
	2M			3M			6M		
	Küçük	Orta	Büyük	Küçük	Orta	Büyük	Küçük	Orta	Büyük
Popülasyon büyüklüğü	130	92	72	150	90	94	88	106	70
YTA ile başlama*	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Durdurma sabiti**	2000	3000	3000	2000	2500	3000	2500	2500	3000
Çaprazlama oranı	0,3587	0,5295	0,4530	0,5761	0,4156	0,4203	0,8985	0,6866	0,4344
İterasyon sayısı	1250	1000	750	1250	1000	-	1250	750	2000
Mutasyon oranı***	{0,01-0,03-0,05-0,07-0,09}	{0,0063-0,0073-0,0083-0,0093-0,0099}	{0,0063-0,0073-0,0083-0,0093-0,0099}	{0,01-0,05-0,0063-0,0083-0,0099}	{0,01-0,05-0,0063-0,0083-0,0099}	{0,01-0,05-0,0063-0,0083-0,0099}	{0,001-0,003-0,005-0,007-0,009}	{0,001-0,003-0,005-0,007-0,009}	{0,01-0,05-0,0063-0,0083-0,0099}
Arama derinliği***	{0,033-0,01-0,05-0,07-0,95}	{0,033-0,01-0,05-0,07-0,95}	{0,033-0,01-0,05-0,07-0,95}	{0,033-0,0013-0,05-0,0019-0,07}	{0,033-0,01-0,05-0,07-0,95}	{0,033-0,01-0,05-0,07-0,95}	{0,132-0,154-0,177-0,182-0,196}	{0,132-0,154-0,177-0,182-0,196}	{0,033-0,0013-0,05-0,0019-0,07}

*1: başlangıç çözüm YTA ile bulunsun, 0: başlangıç çözüm rassal olarak oluşturulsun.

** ilgili örnekteki toplam iş sayısı durdurma sabiti ile çarpılarak durdurma koşulu hesaplanır.

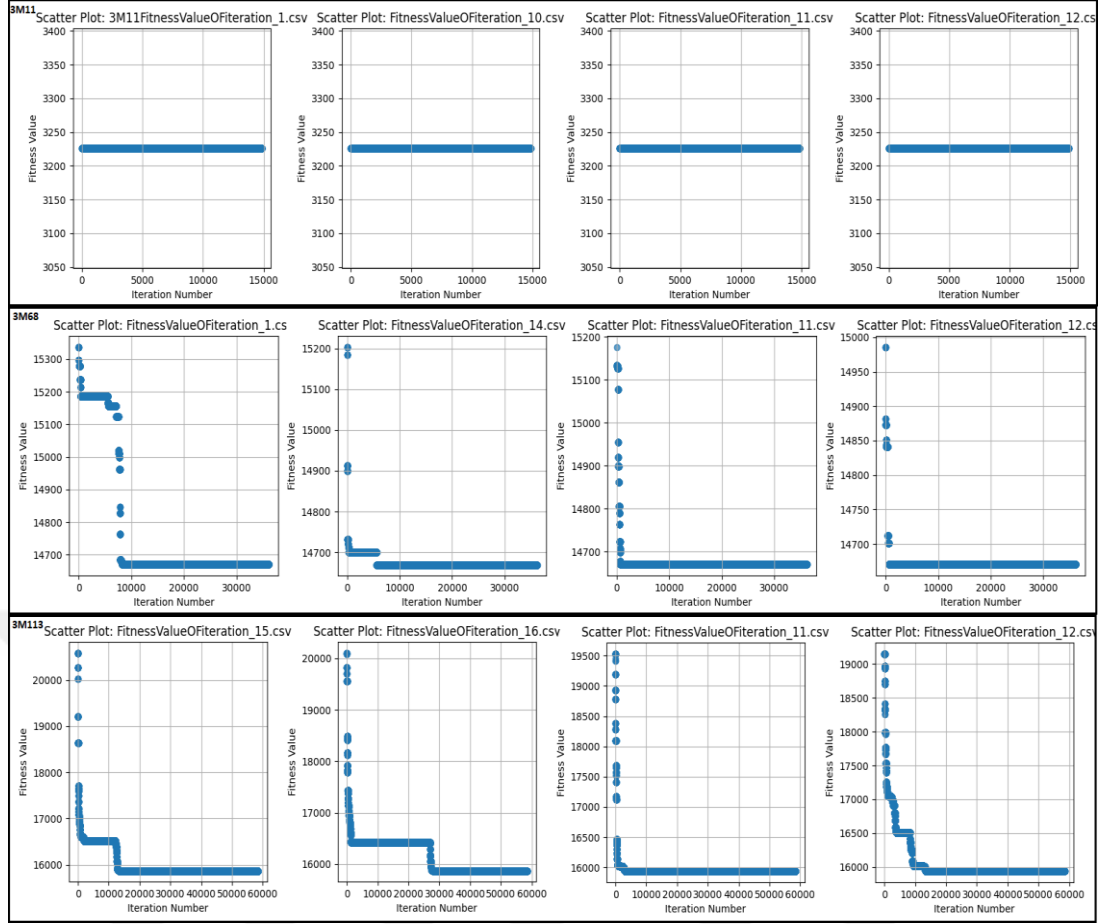
*** Ön deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

Elde edilen parametre değerleri ile tüm problem örnekleri 10 defa çözülerek (10 x 270 deney) elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Çözümde her bir adımda bulunan en küçük toplam tamamlanma zamanı değeri, ortalama ve standart sapma değerleri kaydedilmiştir. Bu kapsamda, her bir adımda elde edilen toplam tamamlanma zamanı değerleri için yakınsama grafikleri çizilerek algoritmanın süreç boyunca bulduğu değerlerin nasıl bir değişim gösterdiği görselleştirilmiştir. Python ortamında yazılan kodla adımlar sonucu bulunan değerler her bir örnek için görselleştirilerek yorumlanmıştır. Burada amaç algoritmanın performans değişimini analiz etmektir.



Şekil 4.1. 2 Makine 6., 27. ve 41. örnekler için yakınsama grafikleri.

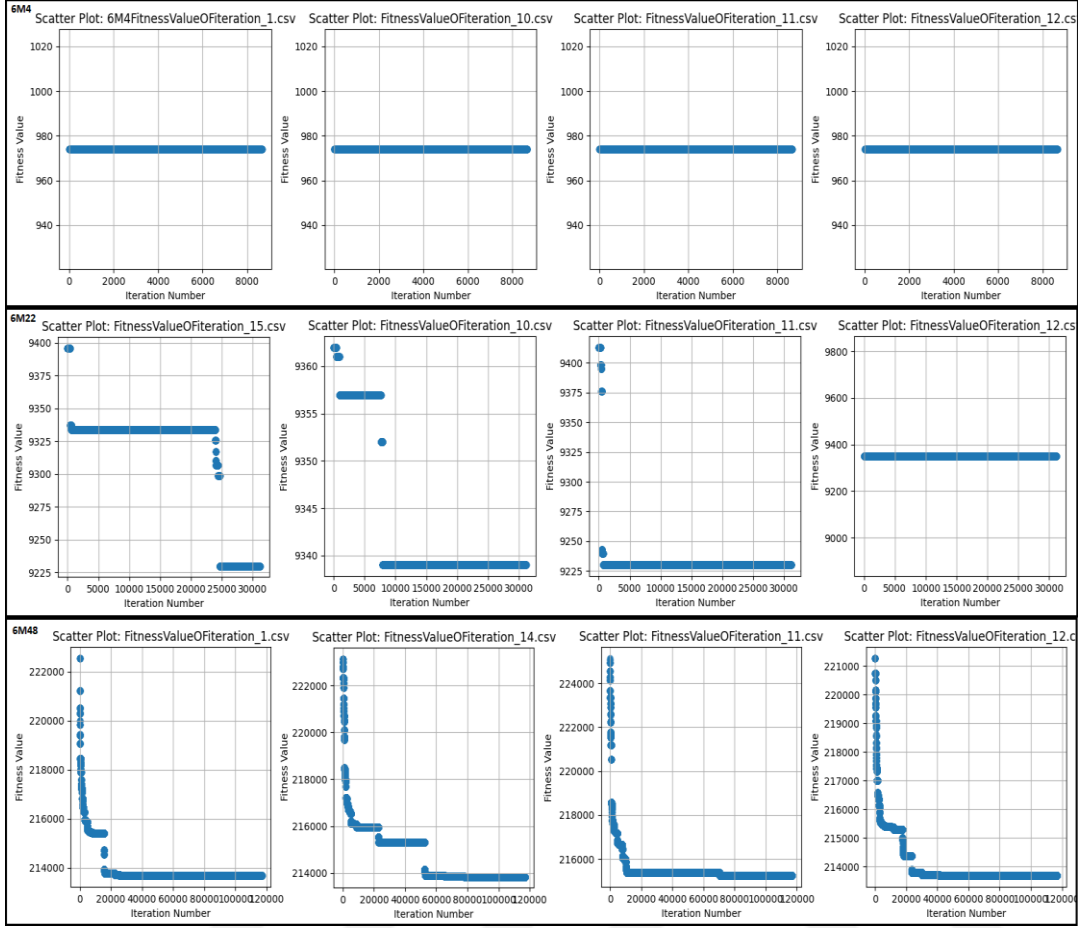
Şekil 4.1’de 2 makine problemleri için çizilen yakınsama grafikleri (3 farklı örnek, 4’er deney için) verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi küçük örnekte algoritma ilk adımlarda bulabileceği en iyi çözümü bulmuştur. Örnek büyüklüğü arttıkça (2M27 ve 2M41 örnekleri) sürecin başında ve ortalarında daha iyi sonuçlara geçildiği görülmektedir.



Şekil 4.2. 3 Makine 11., 68. ve 113. örnekler için yakınsama grafikleri.

Şekil 2 ve Şekil 3'te ise 3 ve 6 makine problemleri için çizilen yakınsama grafikleri (3 farklı örnek, 4'er deney için) verilmiştir. Bu örneklerde de 2 makine örneklerinde olduğu gibi küçük örneklerde ilk adımda bulunan en iyi çözüm bulunmakta, örnek büyüklüğü arttıkça yakınsama sonraki aşamalarda olmaktadır.

Her üç makine için sunulan şekillerden (Şekil 1, 2 ve 3) yakınsama grafikleri incelendiğinde algoritmanın *küçük boyutlu problemlerde* ilk aşamada bulunduğu sonucun adımlar boyunca değişmediği gözlenmiştir. Grup sayısı arttığında (orta ve büyük boyutlu problemler) yakınsama ilerleyen aşamalarda olmaktadır.



Şekil 4.3. 6 Makine 4., 22. ve 48. örnekler için yakınsama grafikleri.

Grafiklerden de görüldüğü gibi adımlar boyunca iyileşme olduktan sonra durdurma koşulu sağlanana kadar algoritma çalışmaya devam etmektedir. Bu süreçte iyileşmenin son adımlarda olmaması durdurma sabitinin yeterince büyük alındığının göstergesidir.

4.2. Bulunan Sonuçlar

Deneyler sonucunda her bir deney için hesaplanan toplam tamamlanma zamanı değerleri (TTZ), ortalama ve standart sapma değerleri düzenlenerek Excel dosyası olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar Cheng ve ark. (2021a) tarafından yapılan araştırma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Cheng ve ark. (2021a) yaptıkları çalışmada akış tipi sıra bağımlı beklemez grup çizelgeleme problemini gözden geçirilmiş çoklu başlangıçlı tavlama benzetimi (RMSA) ve bu yöntemin yerel arama eklenmiş versiyonu (RMSA_LS) ile çözmüş ve her deneyi 10 defa tekrarlamışlardır. Deneyler sonucu elde edilen toplam tamamlanma zamanları, ortalama ve standart sapma değerleri kaydedilmiştir. Kıyaslamanın adil koşullarda yapılabilmesi amacıyla geliştirilen hibrit hiper sezgisel yöntem ile her bir örnek 10 defa çözülmüştür. Bunun

sonucunda elde edilen TTZ, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Bu tablolarda (Tablo 4.4 ve Tablo 4.6’da) ilk olarak her bir örnekteki makine, grup, toplam iş sayısı değerlerini içeren problem özellikleri sütunları bulunmaktadır. Hibrit hiper sezgisel yöntem ve kıyaslanan algoritmalar (RMSA veya RMSA_LS) ile bulunan sonuçların TTZ değeri, ortalama ve standart sapma değerlerine yer verilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel analizi sonucunda elde edilen p değerleri de istatistiksel analiz sütununda verilmiştir.

4.3. İstatistiksel Analiz

Geliştirilen hibrit hiper sezgisel yöntem ile elde edilen sonuçlar ve diğer iki yöntemle (RMSA, RMSA_LS) bulunan sonuçlar arasında anlamlı fark olup olmadığı istatistiksel testlerle analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında deneyler 10’ar defa tekrar edilerek yöntem performansı ölçülmüştür. Yöntem performansının kıyaslandığı Cheng ve ark. (2021a) tarafından geliştirilen yöntemlerin performans analizinde de deneyler 10 defa tekrarlanmıştır. İstatistiksel olarak iki eş arasındaki farkın önemlilik testi deney sayısı 30’dan küçük olduğunda parametrik olmayan Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek testi ile yapılır. Bu tez çalışmasında da Wilcoxon testi uygulanarak bulunan sonuçlar arasındaki farkın anlamlılığı analiz edilmiştir.

Wilcoxon eşleştirilmiş iki örnek testi uygulamasında veriler SPSS ortamında analiz edilmiştir. Kıyaslanacak iki yöntemle elde edilen 10 deney sonucu (TTZ değerleri) 270 örnek problemin her biri için veri seti olarak SPSS’e girilmiş ve analizin yapılması sağlanmıştır.

Analiz sonucu hesaplanan p değerleri anlamlılık düzeyi olan 0.05’ten küçük olduğunda kıyaslanan iki deney sonucu arasında anlamlı fark (tesadüfi değil) olduğu yorumu yapılır.

SPSS ile Wilcoxon testi uygulanarak elde edilen tüm p değerleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.6’da verilmiştir. İstatistiksel analiz 0.05 anlamlılık düzeyinde (α) yapılmış olup hesaplanan p değeri bu değerden küçükse istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu sonucuna ulaşılır. Bu da iki deney sonucu arasında anlamlı fark yoktur (H_0) hipotezinin çürütülmesi anlamı taşır.

Tablo 4.4 ve Tablo 4.6’da yapılan deney sonuçları ve her iki algoritmanın (RMSA ve RMSA_LS) bulduğu sonuçlar verilmiştir. Ayrıca tüm örnekler için hesaplanan p değerleri de verilmiştir. Sonuçlarda toplam tamamlanma zamanı değeri, ortalama ve standart sapma değeri daha düşük değere sahip sonuçlar **koyu olarak** ifade edilmiştir. İki algoritmanın bulduğu sonucu istatistiksel olarak kıyaslarken $<$, $>$, $\geq$, $\leq$ ve $\approx$ sembolleri kullanılmıştır. Bu sembollerin açıklaması şekil 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.2. Wilcoxon test sonuçlarında kullanılan semboller ve açıklamaları.

Sembol	Açıklama
$\approx$	Her iki yöntemle bulunan sonuçlar tüm deneylerde aynıdır (test yapılamamış)
$<$	RMSA(LS) daha iyi - istatistiksel olarak anlamlı fark
$>$	Hibrit hiper sezgisel yöntem daha iyi - istatistiksel olarak anlamlı fark
$\leq$	RMSA(LS) daha iyi İstatistiksel olarak anlamsız fark
$\geq$	Hibrit hiper sezgisel yöntem daha iyi İstatistiksel olarak anlamsız fark

4.3.1. Hibrit Hiper Sezgisel Yöntem Performans Analizi

Hibrit hiper sezgisel yöntem ve RMSA algoritmaları ile bulunan sonuçlar kıyaslandığında denk olan durumlar, istatistiksel anlamlı fark olan / olmayan durumlar Tablo 4.3’te özetlenmiştir.

Toplamda 270 örneğin 197’sinde (%73) geliştirilen yöntem RMSA’dan daha iyi sonuçlar bulmuştur ve 91 (%33,7) örnek için aradaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır.

Denk olan durumlar ise toplam deney sayısının %15,9’unu (43 örnek) oluştururken RMSA’nın geliştirilen yöntemden daha iyi sonuç bulduğu sadece 11 (%4,07) örnek vardır. Sonuçlara genel olarak bakıldığında ise geliştirilen yöntem standart sapma ve ortalama değerler açısından RMSA’dan çok daha üstün bir performans göstermektedir. Sonuçların tüm listesi Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Hiper sezgisel ve RMSA sonuçlarının istatistiksel fark kıyaslaması.

	2M	3M	6M	Toplam	%
$\approx$	10	22	11	43	15,93
$\leq$	4	14	1	19	7,04
$\geq$	16	72	18	106	39,26
$>$	18	50	23	91	33,70
$<$	6	4	1	11	4,07
Toplam	54	162	54	270	

Tablo 4.4. Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri			Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz			RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
1	2 makine	4	13	2067	2067	0	≈	0	2067	2067	0
2	2 makine	3	10	1493	1493	0	≈	0	1493	1493	0
3	2 makine	3	8	814	814	0	≈	0	814	814	0
4	2 makine	2	5	454	454	0	≈	0	454	454	0
5	2 makine	5	16	3189	3189	0	≈	0	3189	3189	0
6	2 makine	3	8	1027	1027	0	≈	0	1027	1027	0
7	2 makine	5	28	6362	6362	0	≈	0	6362	6362	0
8	2 makine	4	22	4492	4492	0	≥	0,317	4492	4492,1	0,316
9	2 makine	3	17	2617	2617	0	≥	0,083264517	2617	2617,3	0,483
10	2 makine	2	13	1290	1290	0	≈	0	1290	1290	0
11	2 makine	5	31	8851	8851	0	<	0,001565402	8472	8472	0
12	2 makine	4	25	5750	5750	0	≥	0,317310508	5750	5750,3	0,949
13	2 makine	5	31	8713	8713	0	>	0,011310671	8713	8728,3	20,822
14	2 makine	2	15	2105	2105	0	≥	0,157299207	2105	2105,2	0,422
15	2 makine	5	35	8793	8793	0	<	0,001565402	8164	8164	0
16	2 makine	5	40	10669	10670,2	0,980	<	0,003867869	9232	9232	0
17	2 makine	4	31	6576	6576	0	≥	0,10880943	6576	6586,3	20,913
18	2 makine	4	28	5982	5982	0	>	0,043114447	5982	5998,6	19,380
19	2 makine	6	17	3369	3369	0	≈	0	3369	3369	0
20	2 makine	8	25	6188	6188	0	≥	0,10880943	6188	6193,6	10,865
21	2 makine	9	22	4363	4363	0	≥	0,102470435	4363	4376	23,594
22	2 makine	9	27	6537	6537	0	≥	0,083264517	6537	6540,9	6,280
23	2 makine	10	33	10467	10467	0	>	0,02601448	10467	10469,8	2,860
24	2 makine	6	16	3194	3194	0	≈	0	3194	3194	0
25	2 makine	9	60	29762	29781,9	15,662	<	0,004376011	28853	28853	0

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
26	2 makine	10	62	28586	28620,7	26,352	≥	0,610066557	28586	28627	41,115
27	2 makine	6	33	8067	8067	0	>	0,007160968	8067	8083,5	13,327
28	2 makine	10	52	18799	18801,5	7,5	>	0,011718686	18799	18820,6	14,774
29	2 makine	6	32	8955	8955	0	>	0,026856696	8955	8960	9,104
30	2 makine	10	49	18977	18977	0	>	0,011209733	18977	19016,2	34,621
31	2 makine	8	41	13419	13444,7	23,984	>	0,037982635	13419	13488	52,616
32	2 makine	8	51	19516	19520,8	5,879	<	0,003867869	19290	19290	0
33	2 makine	10	71	33429	33434,7	9,371	>	0,005062032	33476	33520,7	48,420
34	2 makine	6	29	6275	6284,9	15,122	≤	0,130570018	6275	6276,7	5,376
35	2 makine	9	58	22644	22648,8	9,6	>	0,005005074	22679	22704,3	23,162
36	2 makine	6	31	8823	8823	0	≥	0,317310508	8823	8826,3	10,436
37	2 makine	11	29	8277	8281,4	13,2	>	0,010613156	8277	8313,9	61,461
38	2 makine	13	40	15328	15464,2	65,907	≤	0,959353634	15328	15448,3	87,898
39	2 makine	16	46	15486	15558,3	69,844	≥	0,878167348	15486	15622,8	223,655
40	2 makine	13	40	12337	12341,2	6,416	≥	0,365276044	12337	12346,7	13,098
41	2 makine	14	40	15154	15193,7	52,889	≤	0,205903211	15154	15168,3	35,236
42	2 makine	15	46	19526	19658,2	86,995	≤	0,138640634	19526	19643,2	215,521
43	2 makine	16	79	50053	50426,7	250,827	≥	0,959353634	50135	50436,8	356,863
44	2 makine	13	63	33166	33357,7	108,944	≥	0,57506213	33168	33330	155,850
45	2 makine	16	66	27909	28219,3	165,502	>	0,028416864	27959	28070,5	96,475
46	2 makine	12	65	29038	29062,3	24,779	>	0,006874036	29071	29254,7	235,863
47	2 makine	15	76	44477	44736,6	231,382	>	0,005062032	45077	45406,7	190,632
48	2 makine	14	69	39761	39837,7	72,877	≥	0,114128328	39761	40110,2	565,763
49	2 makine	11	75	37559	37565,4	6,591	>	0,005062032	37597	37655,1	46,808
50	2 makine	15	99	67396	67633,4	209,726	≥	0,05933612	67403	67899,8	348,420
51	2 makine	12	83	40398	40507,1	40,387	>	0,00691043	40488	40840,3	324,981
52	2 makine	16	106	72502	72912,5	225,935	>	0,021824276	72734	73413,5	475,146
53	2 makine	15	79	44783	44787,9	8,312	>	0,005062032	44806	44851,7	40,841
54	2 makine	16	108	79843	80102,9	160,380	<	0,005062032	78616	78616	0
55	3 makine	2	7	1081	1081	0	≈	0	1081	1081	0

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
56	3 makine	5	16	4313	4313	0	>	0,016351222	4313	4315,9	2,470
57	3 makine	4	12	2297	2297	0	≥	0,317310508	2297	2297,3	0,949
58	3 makine	3	10	1398	1398	0	≈	0	1398	1398	0
59	3 makine	3	11	1650	1650	0	>	0,002699796	1650	1658,1	2,846
60	3 makine	5	16	3412	3412	0	≥	0,317310508	3412	3413,2	3,795
61	3 makine	5	15	3855	3855	0	≥	0,317310508	3855	3856,3	4,111
62	3 makine	3	7	1298	1298	0	≈	0	1298	1298	0
63	3 makine	3	8	1272	1272	0	≈	0	1272	1272	0
64	3 makine	4	13	2555	2555	0	≥	0,058781721	2555	2556,5	3,719
65	3 makine	4	15	3226	3226	0	≥	0,317310508	3226	3226,3	0,949
66	3 makine	5	13	2604	2604	0	≥	0,157299207	2604	2604,2	0,422
67	3 makine	5	14	4005	4005	0	≈	0	4005	4005	0
68	3 makine	2	7	1033	1033	0	≈	0	1033	1033	0
69	3 makine	4	13	3091	3091	0	≈	0	3091	3091	0
70	3 makine	5	17	5002	5002	0	≥	0,019630657	5002	5009,2	19,280
71	3 makine	2	5	710	710	0	≈	0	710	710	0
72	3 makine	4	13	3216	3216	0	≥	0,317310508	3216	3216,3	0,949
73	3 makine	3	18	3842	3842	0	≥	0,179712495	3842	3851,2	19,487
74	3 makine	4	22	6217	6217	0	≥	0,317310508	6217	6218,5	4,743
75	3 makine	2	13	2072	2072	0	≈	0	2072	2072	0
76	3 makine	5	31	9262	9262	0	>	0,007526315	9262	9330,1	54,781
77	3 makine	5	23	6029	6029	0	≈	0	6029	6029	0
78	3 makine	4	20	4493	4493	0	≈	0	4493	4493	0
79	3 makine	3	17	4251	4251	0	>	0,014058605	4251	4267,2	12,017
80	3 makine	4	23	6740	6740	0	>	0,004508698	6746	6764,5	19,409
81	3 makine	5	26	7942	7942	0	≥	0,065599692	7942	7964	36,387
82	3 makine	3	19	4238	4238	0	≥	0,065599692	4238	4241,2	5,007
83	3 makine	5	22	5714	5714	0	≥	0,157299207	5714	5718,2	8,854
84	3 makine	2	13	1903	1903	0	≈	0	1903	1903	0

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
85	3 makine	3	15	3814	3814	0	≥	0,179712495	3814	3816,3	5,736
86	3 makine	5	23	7515	7515	0	≥	0,317310508	7515	7527,2	38,580
87	3 makine	4	19	4779	4779	0	>	0,024357916	4779	4783,2	5,453
88	3 makine	3	15	3411	3411	0	>	0,045500264	3411	3426,6	20,140
89	3 makine	2	12	2192	2192	0	≈	0	2192	2192	0
90	3 makine	5	29	10158	10158	0	≥	0,065599692	10158	10170,6	20,700
91	3 makine	4	34	12155	12166,8	15,880	>	0,021653213	12166	12224,5	45,790
92	3 makine	5	38	14923	14923	0,000	>	0,042168197	14923	14938,9	25,653
93	3 makine	4	36	10796	10796	0,000	>	0,010711502	10796	10842,1	67,346
94	3 makine	3	27	6919	6919	0,000	≥	0,157299207	6919	6919,4	0,843
95	3 makine	5	49	19175	19194,8	19,151	>	0,005062032	19197	19313,1	68,564
96	3 makine	2	16	2527	2527	0,000	≥	0,317310508	2527	2528,5	4,743
97	3 makine	2	18	4023	4029	4,899	≤	0,414216178	4023	4027	5,164
98	3 makine	4	31	10475	10475	0,000	≥	0,317310508	10475	10475,1	0,316
99	3 makine	5	49	21005	21037,8	20,644	≥	0,05933612	21005	21105,4	80,448
100	3 makine	4	31	9795	9795,6	0,917	>	0,007368575	9795	9816,4	22,011
101	3 makine	3	24	5998	5998	0,000	<	0,001565402	5932	5932	0
102	3 makine	5	42	15447	15474,5	12,675	<	0,004670906	14891	14891	0
103	3 makine	5	43	19232	19247	8,672	>	0,018981154	19232	19288,2	44,244
104	3 makine	3	23	6877	6877	0	≈	0	6877	6877	0
105	3 makine	5	37	15148	15156,6	12,924	>	0,012772495	15148	15227,6	51,985
106	3 makine	3	23	6605	6605	0	≈	0	6605	6605	0
107	3 makine	5	36	14334	14334	0	≥	0,317310508	14334	14339,2	16,444
108	3 makine	4	36	12880	12880	0	>	0,015764115	12880	12894,4	12,149
109	3 makine	6	19	5879	5879	0	≥	0,317310508	5879	5883,3	13,598
110	3 makine	8	20	6994	7000	4,899	≤	0,563702862	6994	6999	5,270
111	3 makine	6	19	4659	4659	0	>	0,033894854	4659	4661,1	2,846
112	3 makine	7	17	4527	4527	0	≈	0	4527	4527	0
113	3 makine	7	19	4619	4619	0	≈	0	4619	4619	0

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
114	3 makine	9	24	8778	8778	0	≥	0,317310508	8778	8797,1	60,400
115	3 makine	8	23	8918	8918	0	≥	0,317310508	8918	8919,1	3,479
116	3 makine	9	32	13750	13803	63,344	≥	0,506240481	13750	13825,4	82,130
117	3 makine	8	25	8235	8236,2	1,833	≥	0,705456986	8235	8241,5	20,555
118	3 makine	7	21	6598	6598	0	>	0,041226833	6598	6623,6	31,348
119	3 makine	10	34	14149	14153,5	1,5	>	0,035014981	14149	14214,9	78,530
120	3 makine	6	18	4569	4569	0	≥	0,179712495	4569	4575,5	19,191
121	3 makine	7	18	6729	6729	0	≥	0,317310508	6729	6730	3,162
122	3 makine	10	29	14670	14670	0	≈	0	14670	14670	0
123	3 makine	7	21	7148	7148	0	≈	0	7148	7148	0
124	3 makine	9	30	13200	13200	0	≈	0	13200	13200	0
125	3 makine	9	24	9730	9730	0	≈	0	9730	9730	0
126	3 makine	6	18	5560	5560	0	≈	0	5560	5560	0
127	3 makine	7	41	19059	19075,2	13,227	>	0,015155974	19073	19119,9	34,955
128	3 makine	6	28	9651	9651	0	>	0,004892241	9667	9710,2	52,603
129	3 makine	9	50	24265	24282	12,884	>	0,005033508	24318	24411,3	107,698
130	3 makine	8	39	15434	15434	0	>	0,007526315	15434	15533,9	75,087
131	3 makine	8	46	18968	19023	52,146	≥	0,574813694	18972	19038,9	72,041
132	3 makine	9	49	22630	22689,5	38,952	≥	0,385033443	22634	22708,1	69,915
133	3 makine	9	51	29867	29900,8	30,416	>	0,043825584	29867	29964,3	90,216
134	3 makine	6	30	10803	10803	0	>	0,045500264	10803	10805	2,582
135	3 makine	8	36	14261	14262,8	2,227	≥	0,393768635	14261	14263,6	2,066
136	3 makine	10	54	27354	27434,7	34,635	≥	0,139157015	27396	27546,1	257,479
137	3 makine	6	29	9057	9059	2,449	≥	0,654720846	9057	9059,5	2,635
138	3 makine	10	49	23317	23317,6	1,8	>	0,011616045	23317	23372,7	43,632
139	3 makine	9	42	24731	24831,8	59,343	≤	0,475245832	24731	24814,4	94,837
140	3 makine	8	36	18756	18772	18,276	≤	0,463071015	18756	18768,5	11,975
141	3 makine	8	26	10649	10666,1	18,721	≤	0,388323229	10649	10661,6	10,844
142	3 makine	10	40	20444	20464,7	36,715	≥	0,260268783	20444	20491	87,831

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz			RMSA 2021	
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
143	3 makine	9	27	11472	11472	0	≥	0,157299207	11472	11472,6	1,265
144	3 makine	10	48	25900	25922,5	22,5	≤	0,829248459	25900	25916,8	25,969
145	3 makine	9	56	30173	30175,5	2,5	>	0,007632442	30173	30351,3	163,944
146	3 makine	7	43	18679	18679,6	1,8	>	0,017552326	18679	18720,6	43,247
147	3 makine	8	49	21610	21616,3	6,451	>	0,005062032	21680	21811,5	88,197
148	3 makine	9	54	25103	25138,4	17,834	>	0,00691043	25155	25393,6	192,103
149	3 makine	7	33	10097	10099,2	2,6	≥	0,196244727	10097	10115,5	37,521
150	3 makine	10	62	31418	31448	25,278	>	0,005062032	31476	31635,3	99,489
151	3 makine	8	48	23835	23885,8	41,557	≥	0,114128328	23865	23980,2	105,049
152	3 makine	6	41	17958	17967,2	10,098	≥	0,173070921	17958	17978	17,062
153	3 makine	10	63	35218	35231,8	11,931	≥	0,005033508	35258	35312,3	58,439
154	3 makine	8	38	13773	13783,7	9,111	>	0,006837744	13802	13818,9	29,950
155	3 makine	7	48	18929	18940,9	8,203	>	0,005005074	18938	18995,2	59,695
156	3 makine	10	40	18431	18451,2	15,328	≤	0,539232897	18431	18447,9	13,287
157	3 makine	10	66	45421	45465,8	22,860	≥	0,005062032	45552	45719,2	206,321
158	3 makine	8	36	17856	17895,9	60,948	≥	0,280887525	17856	17923,7	66,466
159	3 makine	6	38	16429	16429	0	≥	0,067889155	16429	16470,5	66,825
160	3 makine	9	43	22558	22560,2	5,4	>	0,007473542	22558	22601,7	25,131
161	3 makine	10	50	29065	29068,1	4,392	≥	1	29065	29073,2	16,130
162	3 makine	8	60	35264	35268	2,280	>	0,007685794	35268	35332,4	48,945
163	3 makine	13	37	21044	21173,8	86,117	≥	0,332565615	21047	21129,8	91,604
164	3 makine	15	39	23847	23888,6	27,204	≤	0,092600698	23847	23867,4	20,051
165	3 makine	16	46	24282	24336,1	38,161	≥	0,79885935	24282	24347,9	73,084
166	3 makine	14	42	19681	19772,8	83,755	≥	0,32698935	19681	19801,3	108,355
167	3 makine	13	39	15872	15906,1	28,977	>	0,036414147	15878	15976,1	83,802
168	3 makine	15	45	22281	22451,3	125,727	≥	0,68328633	22281	22496,2	219,161
169	3 makine	15	43	28065	28120,8	74,287	≤	0,498194057	28065	28103,9	52,320
170	3 makine	14	44	28697	28773,5	58,409	<	0,017755923	28697	28709,2	10,612
171	3 makine	11	35	15541	15627,2	75,689	<	0,042062733	15541	15574,9	42,062

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri			Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz			RMSA 2021	
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma	p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
172	3 makine	14	39	20359	20441,7	82,968	≤	0,398492259	20359	20421,6
173	3 makine	11	32	12409	12414,2	6,369	≥	0,487877908	12409	12424,6
174	3 makine	15	50	27259	27361,2	84,547	>	0,021824276	27289	27578
175	3 makine	11	31	17276	17284,8	17,6	≥	0,74631788	17276	17286,2
176	3 makine	15	47	33941	33970	37,291	≥	0,260392944	33944	34002,1
177	3 makine	13	36	20968	20980,5	18,484	≥	0,213524354	20968	21018,8
178	3 makine	12	35	18338	18376,2	47,448	≤	1	18338	18374,2
179	3 makine	14	47	28965	28967,8	6,416	≥	0,587936746	28965	28971,3
180	3 makine	13	40	21995	22014,8	21,752	≥	0,443994376	21995	22028,6
181	3 makine	12	50	28902	28907,8	6,161	≥	0,309628903	28902	28956,6
182	3 makine	14	83	71573	71853,2	124,432	≥	0,05933612	71703	72068,3
183	3 makine	11	64	37383	37759,6	230,090	≥	0,646462203	37607	37815,2
184	3 makine	14	88	70135	70806,4	370,376	≥	0,38627072	70157	70908,1
185	3 makine	11	69	41212	41343,3	165,951	>	0,020879263	41212	41647,2
186	3 makine	16	104	83691	84138,7	394,359	≥	0,168806954	83775	84772,8
187	3 makine	16	69	54705	54904,5	117,232	≥	0,005062032	54992	55267,8
188	3 makine	11	50	28926	29047,5	127,573	≤	0,310494434	28926	28965,9
189	3 makine	12	50	26713	26828,9	76,406	≥	0,57506213	26737	26847,2
190	3 makine	14	53	30145	30292,7	101,660	≥	0,126032729	30183	30371,1
191	3 makine	13	62	36231	36335,8	75,943	≥	0,574813694	36269	36386,1
192	3 makine	15	66	43838	44213,5	206,537	≥	0,284502698	43872	44127,8
193	3 makine	14	75	62225	62303,2	47,625	>	0,036657929	62278	62381,3
194	3 makine	13	54	34433	34457	11,670	>	0,006874036	34458	34539,4
195	3 makine	15	59	42923	43023,7	73,053	>	0,036657929	42993	43129,4
196	3 makine	16	66	51669	52094,3	299,182	≤	0,074461831	51669	51941,1
197	3 makine	13	54	34716	34773,3	89,466	>	0,016604878	34739	34942,1
198	3 makine	15	68	54463	54826	211,429	≥	0,241121368	54612	54948,3
199	3 makine	12	62	40338	40338	0	>	0,005062032	40388	40686,5
200	3 makine	14	74	55652	55710,9	48,312	>	0,005062032	55766	55966,4
201	3 makine	13	81	55588	55796,7	182,630	>	0,012515319	55666	56396,5

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
202	3 makine	15	85	62799	62958,8	102,975	≥	0,005062032	63059	63240,1	190,255
203	3 makine	16	93	71540	72293,4	450,082	≥	0,114128328	71988	72820,9	493,631
204	3 makine	15	110	95141	96372,2	575,083	≥	0,878481743	95610	96503,2	632,503
205	3 makine	15	104	99272	99684,5	182,133	≥	0,005062032	99724	100280,9	527,027
206	3 makine	14	77	62969	63326,6	273,496	≥	0,878481743	62974	63313	235,428
207	3 makine	16	96	78876	79264	171,881	≥	0,005062032	79312	79955,4	388,608
208	3 makine	13	66	42277	42365,6	66,935	>	0,009344113	42336	42591,1	122,486
209	3 makine	14	84	61724	62195,3	357,240	≥	0,332879755	61877	62348,8	378,301
210	3 makine	11	86	60562	60737,5	139,418	>	0,046853285	60667	61019,1	265,107
211	3 makine	13	89	81006	81560,5	351,046	≥	0,092600698	81163	82150,6	809,061
212	3 makine	15	101	104318	104765,1	334,041	>	0,00691043	105022	105602,9	454,239
213	3 makine	15	97	87650	87824,8	120,994	>	0,00691043	87896	88259,6	362,307
214	3 makine	14	86	68258	68431,1	114,846	>	0,012515319	68413	68681,6	145,308
215	3 makine	11	64	39684	39690	5,848	>	0,010862225	39684	39813,4	91,757
216	3 makine	14	77	64942	65138,5	169,230	≤	0,139413973	64962	65378,6	281,810
217	6 makine	5	11	10468	10468	0	≈	0	10468	10468	0
218	6 makine	3	9	5730	5730	0	≈	0	5730	5730	0
219	6 makine	4	10	1865	1865	0	≈	0	1865	1865	0
220	6 makine	2	7	974	974	0	≈	0	974	974	0
221	6 makine	4	15	13227	13227	0	≥	0,317310508	13227	13229,4	7,589
222	6 makine	2	8	4782	4782	0	≈	0	4782	4782	0
223	6 makine	5	29	31789	31789	0	≥	0,083264517	31789	31791,4	3,864
224	6 makine	4	21	19165	19165	0	>	0,025347319	19165	19168	3,162
225	6 makine	2	11	1694	1694	0	≈	0	1694	1694	0
226	6 makine	5	25	7151	7166,2	19,405	>	0,018824873	7182	7187	15,811
227	6 makine	4	15	12116	12116	0	≈	0	12116	12116	0
228	6 makine	5	20	17974	17974	0	≥	0,317310508	17974	17986,1	38,264
229	6 makine	2	13	6614	6614	0	>	0,045500264	6614	6616,4	3,098
230	6 makine	3	29	23383	23394,7	12,264	>	0,0356919	23389	23422,4	22,352
231	6 makine	4	28	10007	10008,3	3,9	>	0,010320739	10007	10029,9	17,078

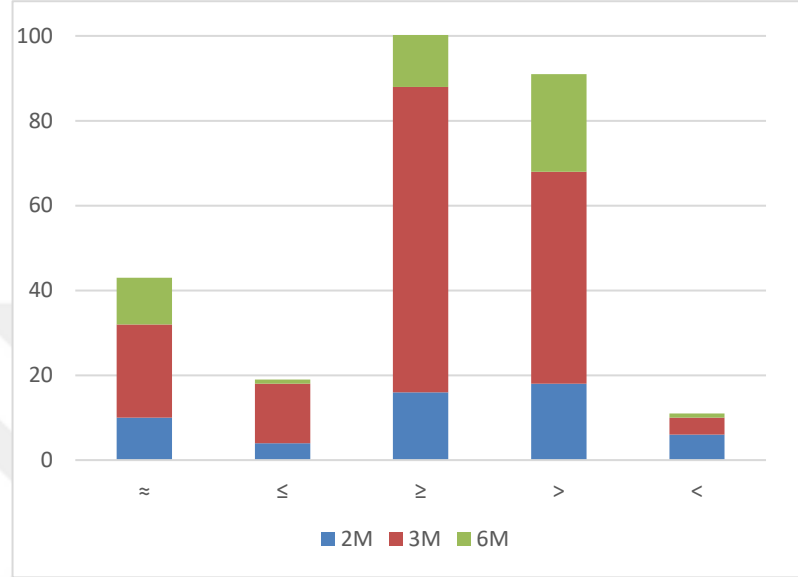
Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz		RMSA 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
232	6 makine	4	21	5857	5857	0	≥	0,179712495	5857	5862,9	15,191
233	6 makine	4	28	27198	27198	0	>	0,045500264	27198	27222,8	32,017
234	6 makine	3	21	15786	15786	0	≥	0,10880943	15786	15795,6	19,744
235	6 makine	9	31	49540	49540	0	≈	0	49540	49540	0
236	6 makine	8	19	26024	26024	0	≈	0	26024	26024	0
237	6 makine	6	22	6842	6842	0	≥	0,179712495	6842	6859,2	36,310
238	6 makine	9	25	9230	9230	0	>	0,033894854	9230	9271,4	44,488
239	6 makine	8	24	34814	34814	0	≥	0,317310508	34814	34814,4	1,265
240	6 makine	6	16	18099	18099	0	≈	0	18099	18099	0
241	6 makine	6	28	30438	30438	0	≥	0,065599692	30438	30472,4	70,108
242	6 makine	7	29	35553	35553	0	≈	0	35553	35553	0
243	6 makine	8	33	12562	12564,5	7,5	>	0,009747807	12562	12622	46,629
244	6 makine	9	38	16902	16914,6	17,957	>	0,028263033	16902	16961,1	65,404
245	6 makine	7	34	44857	44857	0	>	0,045500264	44857	44873,8	21,689
246	6 makine	6	31	36407	36407	0	>	0,015764115	36407	36422,9	18,959
247	6 makine	9	50	78865	78865	0	>	0,005033508	78888	78930,7	23,972
248	6 makine	8	49	70202	70227,2	30,941	>	0,011718686	70202	70382,9	167,920
249	6 makine	7	46	21559	21633	48,553	≤	0,168806954	21553	21728,8	177,631
250	6 makine	10	65	42969	43099,5	92,260	>	0,005062032	43078	43374,2	302,684
251	6 makine	8	46	65836	65841,8	11,6	>	0,011616045	65836	66030,2	156,487
252	6 makine	10	56	104437	104437	0	>	0,039359509	104437	104584,3	361,829
253	6 makine	16	45	113421	113421	0	≥	0,10880943	113421	113467,6	99,003
254	6 makine	12	32	61759	61759	0	≥	0,317310508	61759	61760,5	4,743
255	6 makine	14	37	18389	18486,5	38,085	<	0,035465865	18389	18443,5	51,778
256	6 makine	13	40	20972	21048,3	49,631	≥	0,161429462	20972	21126,5	173,559
257	6 makine	11	34	65745	65745	0	≥	0,317310508	65745	65748,7	11,700
258	6 makine	14	45	108766	108820,8	56,457	≥	0,715000655	108766	108827	67,444
259	6 makine	13	47	96441	96441	0	≥	0,083264517	96441	96486,3	72,940
260	6 makine	16	63	153647	153647	0	≥	0,006655605	153647	153773,3	131,831
261	6 makine	15	71	53733	54407,8	256,208	≥	0,332879755	53752	54297,5	665,994

Tablo 4.4. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Geliştirilen Hiper Sezgisel			İstatistiksel Analiz			RMSA 2021	
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
262	6 makine	14	60	39271	39400	103,156	≥	0,109744639	39281	39488,4	100,492
263	6 makine	15	69	165621	165621	0	>	0,017148033	165621	165780	278,119
264	6 makine	16	78	213553	213661,4	66,559	>	0,028211367	213576	213853,9	246,307
265	6 makine	13	95	231906	231906	0	>	0,007685794	231906	232570,4	573,403
266	6 makine	14	80	189552	189588,3	51,740	>	0,021738681	189552	189860,5	280,788
267	6 makine	13	72	53574	54045,3	271,352	≥	0,79885935	53666	54051	334,321
268	6 makine	15	77	60976	61269,9	165,774	>	0,012515319	61304	61694	359,684
269	6 makine	16	100	285154	285194,4	37,267	>	0,007685794	285179	286089,6	815,909
270	6 makine	15	117	354389	354679,1	285,360	>	0,00691043	354840	356218,9	883,372

Tablo 4.4'teki değerler makine sayılarını gösterecek şekilde sütun grafiği olarak görselleştirilmiştir (Şekil 4.4). Bu şekilde de görüldüğü gibi geliştirilen hiper sezgiselin performans olarak üstün olduğu durumlar ($\geq$ ve $>$ içerenler) çoğunluktadır. Bu başarı çoğunlukla 3 makine örneklerinde gerçekleşmiştir. 3 makine içeren örnekleri (denk olan durumları da dikkate aldığımızda) 6 makine problemleri takip etmektedir.



Şekil 4.4. Geliştirilen yöntem ve RMSA ile elde edilen sonuçların Wilcoxon test sonuçlarının makinelere göre dağılımı.

Hibrit hiper sezgisel yöntem ile RMSA_LS algoritmaları kıyaslandığında denk olan durumlar, istatistiksel anlamlı fark olan / olmayan durumlar Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

Tablo 4.5. Hiper sezgisel ve RMSA_LS sonuçlarının istatistiksel fark kıyaslaması.

	2M	3M	6M	Toplam	%
≈	21	62	30	113	41,85
≤	10	44	8	62	22,96
≥	13	19	5	37	13,70
>	0	3	1	4	1,48
<	10	34	10	54	20
Toplam	54	162	54	270	100,00

Toplamda 270 örneğin 154'ünde (%57,04) geliştirilen yöntem RMSA_LS'den daha iyi veya eşit sonuçlar bulmuştur. 62 örnekte ise (%22,96) geliştirilen yöntem ile RMSA_LS arasındaki fark anlamlı değildir. Bu oran toplam 270 örneğin 216'sına denk gelmekte ve %80'ini oluşturmaktadır. %20'lik kısımda ise RMSA_LS geliştirilen yöntemden daha iyi performans göstermiştir ve bu fark istatistiksel anlamlıdır. Tablo 4.6'da tüm sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.6. Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
1	2	4	13	2067	2067	0	≈	0	2067	2067	0
2	2	3	10	1493	1493	0	≈	0	1493	1493	0
3	2	3	8	814	814	0	≈	0	814	814	0
4	2	2	5	454	454	0	≈	0	454	454	0
5	2	5	16	3189	3189	0	≈	0	3189	3189	0
6	2	3	8	1027	1027	0	≈	0	1027	1027	0
7	2	5	28	6362	6362	0	≈	0	6362	6362	0
8	2	4	22	4492	4492	0	≈	0	4492	4492	0
9	2	3	17	2617	2617	0	≈	0	2617	2617	0
10	2	2	13	1290	1290	0	≈	0	1290	1290	0
11	2	5	31	8851	8851	0	<	0,001565402	8472	8472	0
12	2	4	25	5750	5750	0	≈	0	5750	5750	0
13	2	5	31	8713	8713	0	≈	0	8713	8713	0
14	2	2	15	2105	2105	0	≈	0	2105	2105	0
15	2	5	35	8793	8793	0	<	0,001565402	8164	8164	0
16	2	5	40	10669	10670,2	0,979795897	<	0,003867869	9232	9232	0
17	2	4	31	6576	6576	0	≈	0	6576	6576	0
18	2	4	28	5982	5982	0	≈	0	5982	5982	0
19	2	6	17	3369	3369	0	≈	0	3369	3369	0
20	2	8	25	6188	6188	0	≈	0	6188	6188	0
21	2	9	22	4363	4363	0	≈	0	4363	4363	0
22	2	9	27	6537	6537	0	≥	0,317310508	6537	6555,5	58,50213671
23	2	10	33	10467	10467	0	≥	0,058781721	10467	10471,2	10,21763182
24	2	6	16	3194	3194	0	≈	0	3194	3194	0
25	2	9	60	29762	29781,9	15,66173681	<	0,004376011	28853	28853	0
26	2	10	62	28586	28620,7	26,35166029	≤	0,122875388	28586	28604,9	26,40896312

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
27	2	6	33	8067	8067	0	≈	0	8067	8067	0
28	2	10	52	18799	18801,5	7,5	≥	0,563702862	18799	18804	10,54092553
29	2	6	32	8955	8955	0	≥	0,157299207	8955	8955,2	0,421637021
30	2	10	49	18977	18977	0	≥	0,317310508	18977	18993,3	51,54512586
31	2	8	41	13419	13444,7	23,98353602	<	0,033966233	13419	13421,6	4,221637386
32	2	8	51	19516	19520,8	5,878775383	<	0,003867869	19290	19290	0
33	2	10	71	33429	33434,7	9,370699013	≤	0,495868185	33429	33431	1,825741858
34	2	6	29	6275	6284,9	15,12249979	≤	0,083264517	6275	6275	0
35	2	9	58	22644	22648,8	9,6	≥	0,333998256	22644	22652,6	10,98686084
36	2	6	31	8823	8823	0	≈	0	8823	8823	0
37	2	11	29	8277	8281,4	13,2	≤	0,317310508	8277	8277	0
38	2	13	40	15328	15464,2	65,9072075	<	0,020879263	15328	15361,5	63,17568098
39	2	16	46	15486	15558,3	69,84418372	<	0,027297649	15486	15508,6	67,3567616
40	2	13	40	12337	12341,2	6,415605973	≤	0,083264517	12337	12337	0
41	2	14	40	15154	15193,7	52,88865663	≤	0,202102044	15154	15165,3	35,73373756
42	2	15	46	19526	19658,2	86,99517228	≥	0,623638826	19526	19659,7	193,7730918
43	2	16	79	50053	50426,7	250,8274507	≥	0,074461831	50078	50215,9	122,5048298
44	2	13	63	33166	33357,7	108,9440682	<	0,007685794	33166	33175,5	30,04163777
45	2	16	66	27909	28219,3	165,5016918	≤	0,241121368	27909	28115,4	239,0942167
46	2	12	65	29038	29062,3	24,77922517	≥	0,766898218	29038	29160,6	194,4040466
47	2	15	76	44477	44736,6	231,3820218	≤	0,284502698	44397	44643,2	313,8296778
48	2	14	69	39761	39837,7	72,87667665	≤	0,527598505	39761	39823,2	113,2164103
49	2	11	75	37559	37565,4	6,590902821	≥	0,798088089	37559	37567,8	16,89707404
50	2	15	99	67396	67633,4	209,7261071	≥	0,779434528	67396	67659,8	245,351358
51	2	12	83	40398	40507,1	40,38675525	≥	0,57506213	40398	40529,8	164,7151076
52	2	16	106	72502	72912,5	225,9354996	≤	0,021824276	72502	72783,4	419,9323226
53	2	15	79	44783	44787,9	8,312039461	≥	0,671496922	44783	44794,2	18,32909042
54	2	16	108	79843	80102,9	160,3804539	<	0,005062032	78616	78616	0
55	3	2	7	1081	1081	0	≈	0	1081	1081	0
56	3	5	16	4313	4313	0	≈	0	4313	4313	0

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
57	3	4	12	2297	2297	0	≈	0	2297	2297	0
58	3	3	10	1398	1398	0	≈	0	1398	1398	0
59	3	3	11	1650	1650	0	≥	0,317310508	1650	1650,9	2,846049894
60	3	5	16	3412	3412	0	≈	0	3412	3412	0
61	3	5	15	3855	3855	0	≈	0	3855	3855	0
62	3	3	7	1298	1298	0	≈	0	1298	1298	0
63	3	3	8	1272	1272	0	≈	0	1272	1272	0
64	3	4	13	2555	2555	0	≈	0	2555	2555	0
65	3	4	15	3226	3226	0	≈	0	3226	3226	0
66	3	5	13	2604	2604	0	≈	0	2604	2604	0
67	3	5	14	4005	4005	0	≈	0	4005	4005	0
68	3	2	7	1033	1033	0	≈	0	1033	1033	0
69	3	4	13	3091	3091	0	≈	0	3091	3091	0
70	3	5	17	5002	5002	0	≈	0	5002	5002	0
71	3	2	5	710	710	0	≈	0	710	710	0
72	3	4	13	3216	3216	0	≈	0	3216	3216	0
73	3	3	18	3842	3842	0	≈	0	3842	3842	0
74	3	4	22	6217	6217	0	≈	0	6217	6217	0
75	3	2	13	2072	2072	0	≈	0	2072	2072	0
76	3	5	31	9262	9262	0	≈	0	9262	9262	0
77	3	5	23	6029	6029	0	≈	0	6029	6029	0
78	3	4	20	4493	4493	0	≈	0	4493	4493	0
79	3	3	17	4251	4251	0	≈	0	4251	4251	0
80	3	4	23	6740	6740	0	≈	0	6740	6740	0
81	3	5	26	7942	7942	0	≈	0	7942	7942	0
82	3	3	19	4238	4238	0	≈	0	4238	4238	0
83	3	5	22	5714	5714	0	≈	0	5714	5714	0
84	3	2	13	1903	1903	0	≈	0	1903	1903	0
85	3	3	15	3814	3814	0	≈	0	3814	3814	0
86	3	5	23	7515	7515	0	≈	0	7515	7515	0
87	3	4	19	4779	4779	0	≈	0	4779	4779	0

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
88	3	3	15	3411	3411	0	≈	0	3411	3411	0
89	3	2	12	2192	2192	0	≈	0	2192	2192	0
90	3	5	29	10158	10158	0	≈	0	10158	10158	0
91	3	4	34	12155	12166,8	15,87954659	<	0,344118496	12155	12160,6	17,7087549
92	3	5	38	14923	14923	0	≈	0	14923	14923	0
93	3	4	36	10796	10796	0	≈	0	10796	10796	0
94	3	3	27	6919	6919	0	≈	0	6919	6919	0
95	3	5	49	19175	19194,8	19,15097909	≤	0,396332761	19175	19184,7	23,96316618
96	3	2	16	2527	2527	0	≈	0	2527	2527	0
97	3	2	18	4023	4029	4,898979486	<	0,014305878	4023	4023	0
98	3	4	31	10475	10475	0	≈	0	10475	10475	0
99	3	5	49	21005	21037,8	20,64364309	<	0,03815171	21005	21014,6	15,8408754
100	3	4	31	9795	9795,6	0,916515139	≤	0,654720846	9795	9795,4	0,843274043
101	3	3	24	5998	5998	0	<	0,001565402	5932	5932	0
102	3	5	42	15447	15474,5	12,6747781	<	0,005005074	15444	15453,9	12,16963434
103	3	5	43	19232	19247	8,671793355	<	0,011616045	19232	19234,5	6,553201084
104	3	3	23	6877	6877	0	≈	0	6877	6877	0
105	3	5	37	15148	15156,6	12,92439554	≤	0,065599692	15148	15148	0
106	3	3	23	6605	6605	0	≈	0	6605	6605	0
107	3	5	36	14334	14334	0	≈	0	14334	14334	0
108	3	4	36	12880	12880	0	≈	0	12880	12880	0
109	3	6	19	5879	5879	0	≈	0	5879	5879	0
110	3	8	20	6994	7000	4,898979486	≤	0,014305878	6994	6994	0
111	3	6	19	4659	4659	0	≈	0	4659	4659	0
112	3	7	17	4527	4527	0	≈	0	4527	4527	0
113	3	7	19	4619	4619	0	≈	0	4619	4619	0
114	3	9	24	8778	8778	0	≥	0,317310508	8778	8797,1	60,39950331
115	3	8	23	8918	8918	0	≈	0	8918	8918	0
116	3	9	32	13750	13803	63,34350795	<	0,02601448	13750	13761,6	35,64080059
117	3	8	25	8235	8236,2	1,833030278	≤	0,083264517	8235	8235	0
118	3	7	21	6598	6598	0	≥	0,317310508	6598	6604,8	21,50348809

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
119	3	10	34	14149	14153,5	1,5	≥	0,851554898	14149	14157,4	15,79169965
120	3	6	18	4569	4569	0	≈	0	4569	4569	0
121	3	7	18	6729	6729	0	≈	0	6729	6729	0
122	3	10	29	14670	14670	0	≈	0	14670	14670	0
123	3	7	21	7148	7148	0	≈	0	7148	7148	0
124	3	9	30	13200	13200	0	≈	0	13200	13200	0
125	3	9	24	9730	9730	0	≈	0	9730	9730	0
126	3	6	18	5560	5560	0	≈	0	5560	5560	0
127	3	7	41	19059	19075,2	13,22724461	≥	0,563702862	19059	19077,9	13,04223907
128	3	6	28	9651	9651	0	≈	0	9651	9651	0
129	3	9	50	24265	24282	12,88409873	<	0,022586888	24265	24273	10,85254706
130	3	8	39	15434	15434	0	≈	0	15434	15434	0
131	3	8	46	18968	19023	52,14594903	≤	0,02347739	18968	18970,4	2,065591118
132	3	9	49	22630	22689,5	38,95189341	<	0,008150972	22630	22630	0
133	3	9	51	29867	29900,8	30,41644292	≤	0,122564764	29867	29882,7	13,67926249
134	3	6	30	10803	10803	0	≈	0	10803	10803	0
135	3	8	36	14261	14262,8	2,227105745	≤	0,063317787	14261	14261	0
136	3	10	54	27354	27434,7	34,63538653	≤	0,109433022	27354	27400,3	93,29290791
137	3	6	29	9057	9059	2,449489743	<	0,045500264	9057	9057	0
138	3	10	49	23317	23317,6	1,8	≥	0,276302917	23317	23321	8,432740427
139	3	9	42	24731	24831,8	59,34273334	<	0,010711502	24731	24731,4	1,264911064
140	3	8	36	18756	18772	18,27566688	<	0,023140931	18756	18756	0
141	3	8	26	10649	10666,1	18,72137815	≤	0,068365313	10649	10651,1	6,640783086
142	3	10	40	20444	20464,7	36,71525568	≤	0,10880943	20444	20444	0
143	3	9	27	11472	11472	0	≈	0	11472	11472	0
144	3	10	48	25900	25922,5	22,5	<	0,025347319	25900	25900	0
145	3	9	56	30173	30175,5	2,5	<	0,025347319	30173	30173	0
146	3	7	43	18679	18679,6	1,8	≤	0,317310508	18679	18679	0
147	3	8	49	21610	21616,3	6,450581369	≤	0,750485419	21610	21615,8	11,55470082
148	3	9	54	25103	25138,4	17,83367601	<	0,027281171	25103	25124,1	20,90959376
149	3	7	33	10097	10099,2	2,6	<	0,03843393	10097	10097	0

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
150	3	10	62	31418	31448	25,27844932	≥	0,593954675	31420	31470,4	71,81643266
151	3	8	48	23835	23885,8	41,55670824	≤	0,207020997	23835	23859,6	49,0922035
152	3	6	41	17958	17967,2	10,09752445	<	0,02601448	17958	17958	0
153	3	10	63	35218	35231,8	11,93147099	≥	0,514669723	35218	35232,2	25,32806963
154	3	8	38	13773	13783,7	9,110982384	≤	0,058088626	13773	13777,2	2,898275349
155	3	7	48	18929	18940,9	8,203048214	≤	0,283344742	18929	18936,4	8,630694577
156	3	10	40	18431	18451,2	15,32840501	<	0,011412036	18431	18431	0
157	3	10	66	45421	45465,8	22,8595713	≤	0,332879755	45421	45451,4	45,95698472
158	3	8	36	17856	17895,9	60,94825674	≤	0,083264517	17856	17856	0
159	3	6	38	16429	16429	0	≈	0	16429	16429	0
160	3	9	43	22558	22560,2	5,4	≤	0,179712495	22558	22558	0
161	3	10	50	29065	29068,1	4,392038251	<	0,033894854	29065	29065	0
162	3	8	60	35264	35268	2,28035085	<	0,010515246	35264	35264	0
163	3	13	37	21044	21173,8	86,11712954	<	0,016746269	21044	21046,7	0,948683298
164	3	15	39	23847	23888,6	27,20367622	<	0,020879263	23847	23856,4	10,96661601
165	3	16	46	24282	24336,1	38,1613679	≤	0,049949976	24282	24302,1	26,49716966
166	3	14	42	19681	19772,8	83,75535804	<	0,026434454	19681	19681	0
167	3	13	39	15872	15906,1	28,97740499	≤	0,270181096	15872	15891,5	21,8644816
168	3	15	45	22281	22451,3	125,7267275	≤	0,068703574	22281	22331,8	101,1915675
169	3	15	43	28065	28120,8	74,28701098	≤	0,864812504	28065	28110,4	36,70967175
170	3	14	44	28697	28773,5	58,40933145	<	0,017755923	28697	28702,8	13,10470653
171	3	11	35	15541	15627,2	75,68857245	<	0,017755923	15541	15550,8	24,516661
172	3	14	39	20359	20441,7	82,96752377	≤	0,398492259	20359	20404,6	93,73153151
173	3	11	32	12409	12414,2	6,368673331	<	0,045500264	12409	12409	0
174	3	15	50	27259	27361,2	84,54679178	≤	0,905612997	27285	27368,9	96,92660453
175	3	11	31	17276	17284,8	17,6	≤	0,157299207	17276	17276	0
176	3	15	47	33941	33970	37,29074952	≤	0,062508916	33941	33944,5	2,121320344
177	3	13	36	20968	20980,5	18,48377667	≤	0,257450372	20968	20970,8	5,692099788
178	3	12	35	18338	18376,2	47,4484984	≤	0,785494747	18338	18367,5	49,12173088
179	3	14	47	28965	28967,8	6,415605973	≥	0,604907155	28965	28969,4	9,27601447
180	3	13	40	21995	22014,8	21,75224126	<	0,03843393	21995	21995	0

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
181	3	12	50	28902	28907,8	6,16116872	≥	0,338724148	28902	28919,1	54,07494799
182	3	14	83	71573	71853,2	124,4321502	≤	0,139413973	71573	71712,8	248,466765
183	3	11	64	37383	37759,6	230,0896347	≤	0,085830958	37383	37515,4	202,4385778
184	3	14	88	70135	70806,4	370,3760791	<	0,046853285	70135	70459,1	318,1370948
185	3	11	69	41212	41343,3	165,9512278	≤	0,175523351	41212	41227,8	18,21354807
186	3	16	104	83691	84138,7	394,3592398	≤	0,444586739	83691	84033,5	536,6277936
187	3	16	69	54705	54904,5	117,2324614	≤	0,293029259	54705	54841,6	122,1903797
188	3	11	50	28926	29047,5	127,5729203	<	0,043114447	28926	28926	0
189	3	12	50	26713	26828,9	76,40608615	≤	0,050612432	26713	26753,8	67,3181501
190	3	14	53	30145	30292,7	101,6602676	≤	0,173070921	30145	30226,5	121,5823909
191	3	13	62	36231	36335,8	75,94313662	≤	0,507624344	36231	36310,6	132,4405108
192	3	15	66	43838	44213,5	206,5368006	≤	0,374259319	43838	44107	279,9230053
193	3	14	75	62225	62303,2	47,62520341	≤	0,202621608	62220	62266,1	57,49676319
194	3	13	54	34433	34457	11,67047557	<	0,010613156	34433	34442,5	8,83490552
195	3	15	59	42923	43023,7	73,05347357	≤	0,109744639	42923	42962,7	40,01957854
196	3	16	66	51669	52094,3	299,1815669	<	0,00691043	51669	51689,4	32,84712062
197	3	13	54	34716	34773,3	89,46625062	≥	0,440085616	34716	34813,4	118,7239562
198	3	15	68	54463	54826	211,4289479	≤	0,284502698	54463	54748	292,9505078
199	3	12	62	40338	40338	0	≥	0,102470435	40338	40364,6	53,04756775
200	3	14	74	55652	55710,9	48,31242076	≥	0,320986013	55652	55724,9	50,43907216
201	3	13	81	55588	55796,7	182,6302549	≥	0,905612997	55588	55960	524,3836594
202	3	15	85	62799	62958,8	102,97456	≥	0,44429079	62818	62930,3	122,7246693
203	3	16	93	71540	72293,4	450,0816	≈	0	71540	72186,3	785,1324092
204	3	15	110	95141	96372,2	575,0827419	>	0,028416864	95305	95847	481,2583044
205	3	15	104	99272	99684,5	182,1330558	≥	0,721276699	99294	99656,7	286,8131602
206	3	14	77	62969	63326,6	273,4963254	>	0,016604878	62980	63051	105,6009259
207	3	16	96	78876	79264	171,8813544	≥	0,444586739	78879	79183,7	322,9482415
208	3	13	66	42277	42384,8	66,3005279	>	0,024744672	42301	42312,1	16,21007917
209	3	14	84	61724	62195,3	357,2397094	<	0,009344113	61724	61842,8	100,4952182
210	3	11	86	60562	60737,5	139,4175384	<	0,046853285	60439	60565,3	135,5425722
211	3	13	89	81006	81560,5	351,0456523	<	0,012515319	81006	81059	52,9444153

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

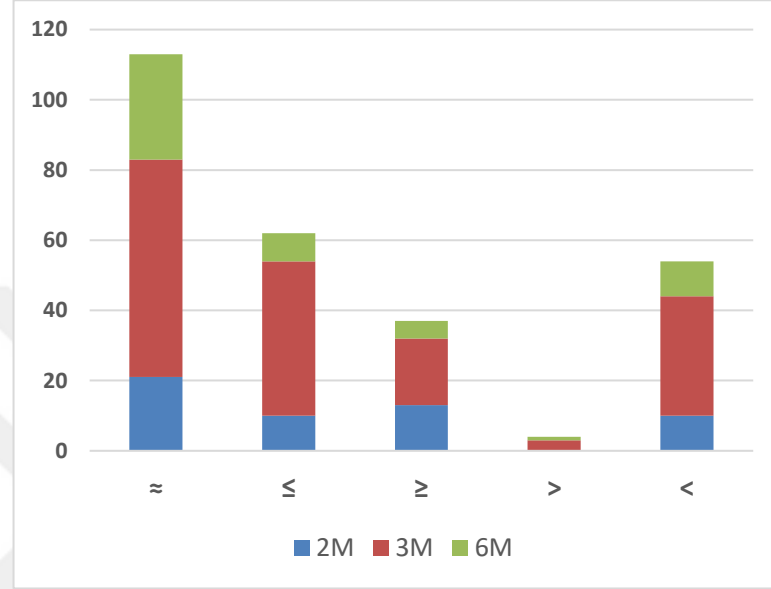
Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
212	3	15	101	104318	104765,1	334,0414495	≤	0,79885935	104297	104755,2	605,0558836
213	3	15	97	87650	87824,8	120,9940494	≥	0,47495854	87727	87835,4	104,6552011
214	3	14	86	68258	68431,1	114,8463757	≤	0,332879755	68212	68380,5	86,00807456
215	3	11	64	39684	39690	5,848076607	≥	0,260858048	39684	39700,4	22,66274476
216	3	14	77	64942	65138,5	169,2301687	≤	0,085830958	64942	65006,7	128,0139315
217	6	5	11	10468	10468	0	≈	0	10468	10468	0
218	6	3	9	5730	5730	0	≈	0	5730	5730	0
219	6	4	10	1865	1865	0	≈	0	1865	1865	0
220	6	2	7	974	974	0	≈	0	974	974	0
221	6	4	15	13227	13227	0	≈	0	13227	13227	0
222	6	2	8	4782	4782	0	≈	0	4782	4782	0
223	6	5	29	31789	31789	0	≈	0	31789	31789	0
224	6	4	21	19165	19165	0	≈	0	19165	19165	0
225	6	2	11	1694	1694	0	≈	0	1694	1694	0
226	6	5	25	7151	7166,2	19,40515395	≤	0,058781721	7151	7151	0
227	6	4	15	12116	12116	0	≈	0	12116	12116	0
228	6	5	20	17974	17974	0	≈	0	17974	17974	0
229	6	2	13	6614	6614	0	≈	0	6614	6614	0
230	6	3	29	23383	23394,7	12,26417547	<	0,033894854	23383	23383	0
231	6	4	28	10007	10008,3	3,9	≤	0,317310508	10007	10007	0
232	6	4	21	5857	5857	0	≈	0	5857	5857	0
233	6	4	28	27198	27198	0	≈	0	27198	27198	0
234	6	3	21	15786	15786	0	≈	0	15786	15786	0
235	6	9	31	49540	49540	0	≈	0	49540	49540	0
236	6	8	19	26024	26024	0	≈	0	26024	26024	0
237	6	6	22	6842	6842	0	≈	0	6842	6842	0
238	6	9	25	9230	9230	0	≈	0	9230	9230	0
239	6	8	24	34814	34814	0	≈	0	34814	34814	0
240	6	6	16	18099	18099	0	≈	0	18099	18099	0
241	6	6	28	30438	30438	0	≈	0	30438	30438	0
242	6	7	29	35553	35553	0	≈	0	35553	35553	0

Tablo 4.6. (Devamı). Geliştirilen hiper sezgisel ve RMSA_LS ile bulunan sonuçlar

Problem Özellikleri				Hibrit hiper sezgisel yöntem			İstatistiksel Analiz		RMSA_LS 2021		
Örnek No	Makine Sayısı	Grup Sayısı	Toplam İş Sayısı	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma		p değerleri	TTZ en iyi	TTZ ortalama	TTZ Std Sapma
243	6	8	33	12562	12564,5	7,5	≤	0,317310508	12562	12562	0
244	6	9	38	16902	16914,6	17,95661438	≤	0,067889155	16902	16903,9	4,01248053
245	6	7	34	44857	44857	0	≈	0	44857	44857	0
246	6	6	31	36407	36407	0	≈	0	36407	36407	0
247	6	9	50	78865	78865	0	>	0,045500264	78865	78874,2	11,87714893
248	6	8	49	70202	70227,2	30,94123462	≥	0,915345283	70202	70229,8	58,60754597
249	6	7	46	21559	21633	48,55306376	<	0,009298223	21553	21564,2	14,45913783
250	6	10	65	42969	43099,5	92,25968784	<	0,005062032	42958	42958	0
251	6	8	46	65836	65841,8	11,6	≥	1	65836	65862,4	83,48413023
252	6	10	56	104437	104437	0	≈	0	104437	104437	0
253	6	16	45	113421	113421	0	≥	0,317310508	113421	113422,2	3,794733192
254	6	12	32	61759	61759	0	≈	0	61759	61759	0
255	6	14	37	18389	18486,5	38,08477386	<	0,007473542	18389	18399,3	16,80641412
256	6	13	40	20972	21048,3	49,63073644	<	0,011513828	20972	20986,1	22,7031569
257	6	11	34	65745	65745	0	≈	0	65745	65745	0
258	6	14	45	108766	108820,8	56,45670908	≤	0,256839258	108766	108796	48,30458915
259	6	13	47	96441	96441	0	≈	0	96441	96441	0
260	6	16	63	153647	153647	0	≥	0,317310508	153647	153650,1	9,803060747
261	6	15	71	53733	54407,8	256,2080405	<	0,00691043	53714	53737,7	12,16598172
262	6	14	60	39271	39400	103,1561923	≥	0,202621608	39281	39357	62,68262208
263	6	15	69	165621	165621	0	≈	0	165621	165621	0
264	6	16	78	213553	213661,4	66,55854566	<	0,010711502	213553	213555	6,32455532
265	6	13	95	231906	231906	0	≤	0,10880943	231906	231938,8	64,50460793
266	6	14	80	189552	189588,3	51,73982992	≤	0,130797062	189552	189557,1	16,12761607
267	6	13	72	53574	54045,3	271,3518196	<	0,010862225	53574	53652,7	124,9409194
268	6	15	77	60976	61269,9	165,7736107	≤	0,05933612	60936	61111,4	138,3467463
269	6	16	100	285154	285194,4	37,26714371	<	0,010711502	285154	285161,5	12,07614729
270	6	15	117	354389	354679,1	285,3599306	<	0,200825123	354389	354514,8	175,1315696

Geliştirilen hiper sezgiselin toplam tamamlanma zamanı değerlerinin çoğunda eşit değerlere ulaştığını ve sadece ortalama veya standart sapma değerlerinde RMSA_LS yönteminin bulunduğu sonuçların nispeten iyi olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4.6'daki değerler makine sayılarını gösterecek şekilde sütun grafiği olarak görselleştirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Geliştirilen yöntem ve RMSA_LS ile elde edilen sonuçların Wilcoxon test sonuçlarının makinelerle göre dağılımı.

Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi hibrit hiper sezgiselin performans olarak üstün veya denk olduğu durumlar ($>$, $\geq$ ve $\approx$ içerenler) çoğunluktadır. Bu başarı çoğunlukla 3 makine örneklerinde gerçekleşmiştir. 2 makine ve 6 makine örneklerinde ise durum denk veya daha iyi değer bulunan sonuçlar çoğunluktadır (54 örnekten 44 örnek).

4.4. Alt Seviye Sezgisel ve Parametre Performansları

Hibrit hiper sezgisel yöntem her iterasyonda alt seviye sezgisellerden seçim yaparak ilerlemektedir. Bu çalışmada çaprazlama, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri ile mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri alt seviye sezgiselleri oluşturmaktadır. Yöntem operatör ve parametre havuzlarından seçim yaparak ilerlemektedir. Çalışma kapsamında çaprazlama için yedi, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri için ise beşer farklı alt seviye sezgisel alternatifi uygulanmıştır. Mutasyon oranı ve arama derinliği parametreleri için ise beşer farklı değer uygulanmıştır. Uygulanan operatör listesi Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Alt seviye sezgisel listesi.

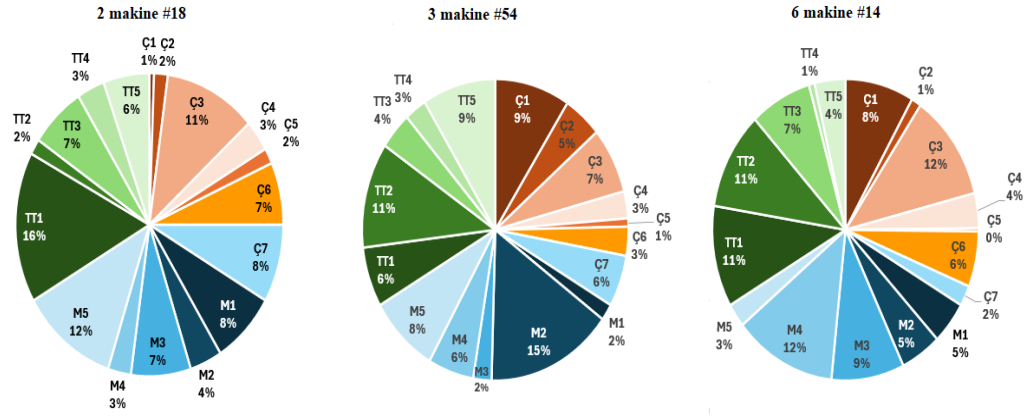
Ç1: kısmi değişimli çaprazlama	Ç2: modifiye edilmiş kısmi değişimli çaprazlama
Ç3: pozisyona bağlı çaprazlama	Ç4: modifiye edilmiş pozisyona bağlı çaprazlama
Ç5: iki noktalı çaprazlama	Ç6: modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama
Ç7: düzenli çaprazlama	
M1 & TT1: alel değişimi	M2 & TT2: yerleştirme mutasyonu
M3 & TT3: tersine çevirme mutasyonu	M4 & TT4: blok değişimi mutasyonu
M5 & TT5: karıştırma mutasyonu	

Tablo 4.7’deki alt seviye sezgisel ve parametre alternatiflerinin performansı oluşturulan mem yapısında skor değerleri olarak kaydedilmiştir. Skor değeri yüksek olan alternatif eldeki çözümden daha iyi çözüm bulmada başarılı olan alternatifi ifade etmektedir. Bölüm 3.2’de yöntemin uygulama detayları açıklanmıştır.

Bu kapsamda çaprazlama için kodlanan yedi, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri için kodlanan beşer farklı alternatifin kıyaslanması bazı örnekler için kaydedilen skor yapısındaki değerler üzerinden analiz edilmiştir. Skor değerleri pasta grafiği oluşturularak görselleştirilmiştir. Ayrıca mutasyon oranı (MO) ve arama derinliği (AD) parametrelerinin başarı durumları da pasta grafikleri ile gösterilmiştir. Küçük, orta ve büyük problem örneklerinden farklı makinelerdeki 3’er örnek seçilmiş ve skor değerleri görselleştirilmiştir.

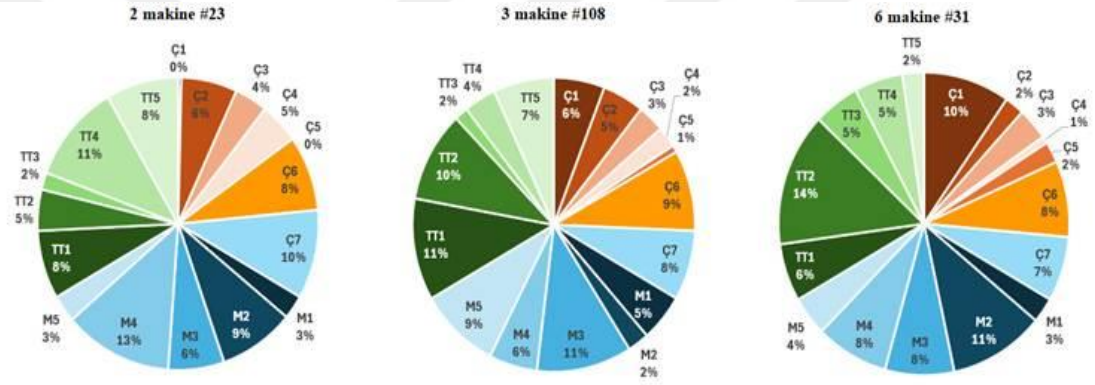
Şekil 4.6’da küçük boyutlu problemler için skor değerleri görülmektedir. Çaprazlama operatörü olarak pozisyona bağlı çaprazlama (Ç3) her üç örnek için de iyi performans göstermiştir. Bunu kısmi değişimli çaprazlama (Ç1) ve modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama (Ç6) takip etmektedir. *Modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama* (Ç6) modifiye edilen diğer alternatifler içinden en iyi olanıdır.

Mutasyon ve tepe tırmanması olarak karıştırma mutasyonu (M5) ile alel değişimi (TT1) nispeten daha iyi performans göstermiştir. Düşük performans gösterme açısından örneğe bağlı değişim gözlenirken alel değişimi mutasyonu (M1) ve blok değişimi tepe tırmanması (TT4) genel olarak düşük performans göstermiştir.



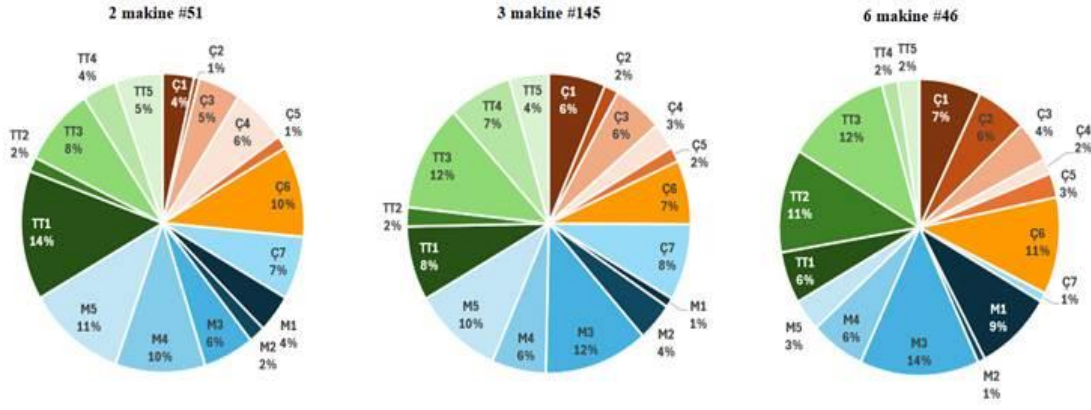
Şekil 4.6. Küçük boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları

Orta ve büyük boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları için oluşturulan pasta grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Orta boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları

Orta ve büyük boyutlu problemlerde için modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama (Ç6) ve düzenli çaprazlama (Ç7) iyi performans gösterirken iki noktalı çaprazlama (Ç5) ise düşük performans göstermiştir. Mutasyon olarak tersine çevirme ve blok değişimi mutasyonları (M3 ve M4) her üç makine için de iyi performans göstermiştir, alel değişimi mutasyonu (M1) ise düşük performans göstermiştir. Tepe tırmanması operatörü olarak da alel değişimi ve yerleştirme (TT1 ve TT2) operatörleri iyi performans gösterirken, tersine çevirme operatörü (TT3) zayıf performans göstermiştir.



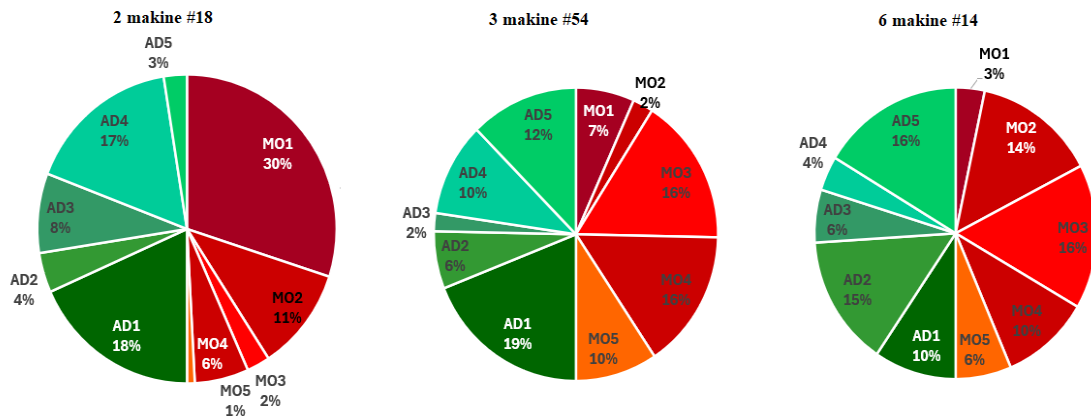
Şekil 4.8. Büyük boyutlu problemler için alt seviye sezgisel performansları

Genel olarak değerlendirildiğinde ise problem boyutuna bağlı değişim gözlenirse de, alt seviye sezgisellerden modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama (Ç6), TT1 ve M5 problem boyutu değişmeksizin iyi performans göstermiştir.

Küçük orta ve büyük boyutlu problemler için seçilen parametre değerlerinin başarısını göstermek için mem yapısında kaydedilen skorlar pasta grafiği olarak sunulmuştur.

Mem yapısındaki skorlar her bir parametre değerinin iterasyonlar boyunca ebeveyn kromozomdan daha iyi çözüm bulmada ne kadar başarılı olduğunu ifade etmektedir. Arama derinliği ve mutasyon oranı parametreleri değerleri bölüm 4.1.2.'de sunulan **irace** ile bulunan değerlerdir.

İlk olarak küçük boyutlu problemler için mem yapısındaki parametre değerlerinin skorları ise Şekil 4.9'da görülmektedir. Mutasyon oranı 1 (MO1) ve arama derinliği 1 (AD1) değerleri ebeveyn kromozomdan daha iyi amaç fonksiyon değerine sahip çocuk üretilmesinde başarılı olan değerlerdir.



Şekil 4.9. Küçük boyutlu problemlerde parametre skorları.

Şekil 4.9’da pasta grafiği olarak skorları verilen parametre değerleri Tablo 4.8’de (puanları yüksek olan parametreler **koyu renkli** olarak) sunulmuştur. Tablo 4.8’de de görüldüğü gibi problem boyutu küçük olduğunda mutasyon oranı ve arama derinliği değerleri 0.1’den küçük değerler **irace**’te etkin sonuç veren parametrelerdir.

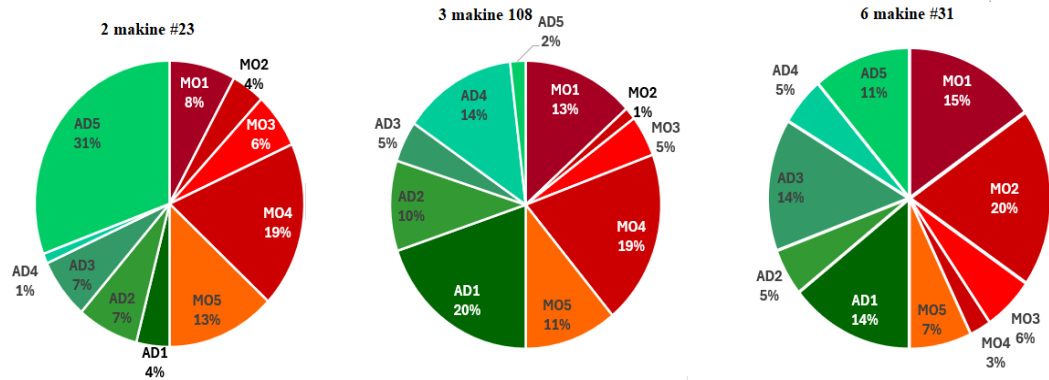
Tablo 4.8. Küçük boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.

	Küçük Problemler		
	2M	3M	6M
Mutasyon oranı	{ 0,01 - 0,03- 0,05- 0,07- 0,09}	{0,01- 0,05- 0,0063 - 0,0083 - 0,0099}	{0,01- 0,05 - 0,0063 - 0,0083- 0,0099}
Arama derinliği	{ 0,033 - 0,01- 0,05- 0,07 - 0,95}	{ 0,033 - 0,0013- 0,05- 0,0019- 0,07 }	{0,033- 0,0013 - 0,05- 0,0019- 0,07 }

* Skor değeri yüksek olan parametreler koyu ile ifade edilmiştir.

Tablo 4.8’de de görüldüğü gibi mutasyon oranı için iyi sonuç veren tek bir değer olmasa da genellikle 0,01 ve daha küçük değerler iyi performans göstermiştir. Mutasyon oranının tersine arama derinliği parametresi tek bir değer her üç makinede de 0,07 değeri iyi performans göstermiştir.

Orta boyutlu problemlerin parametre değerlerinin skorları da Şekil 4.10’da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi mutasyon oranı 4 ve mutasyon oranı 2 ile arama derinliği 5 ve arama derinliği 1 sırasıyla 2, 3 ve 6 makine örnekleri için iyi sonuç bulmuştur.



Şekil 4.10: Orta boyutlu problemlerde parametre skorları

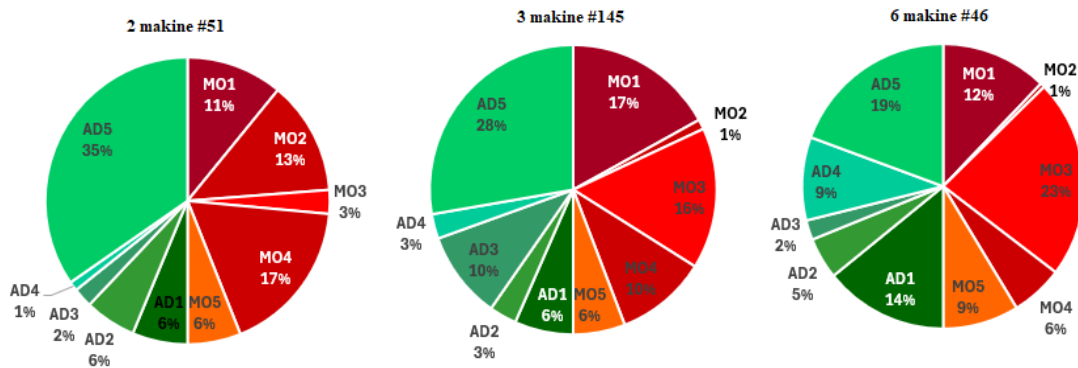
Şekil 4.10’deki pasta grafiğindeki parametre değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir. Tablo 4.9’da da görüldüğü gibi mutasyon oranı için küçük değerler (0,01 ve daha küçük değerler) daha iyi çözüm bulmada başarılıdır. Arama derinliği için ise 3 ve 6 makine problemleri için 0,1’e yakın değerler, 2 makine için ise 0,95 değeri iyi sonuç bulmuştur.

Tablo 4.9. Orta boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.

	Orta Problemler		
	2M	3M	6M
Mutasyon oranı	{0,0063- 0,0073- 0,0083- 0,0093- 0,0099 }	{ 0,01 - 0,05- 0,0063- 0,0083 - 0,0099}	{ 0,001 - 0,003 - 0,005- 0,007- 0,009}
Arama derinliği	{0,033- 0,01- 0,05- 0,07- 0,95 }	{ 0,033 - 0,01- 0,05- 0,07 - 0,95}	{ 0,132 - 0,154- 0,177 - 0,182- 0,196}

* Skor değeri yüksek olan parametreler koyu ile ifade edilmiştir.

Son olarak büyük boyutlu problemler için parametrelerin skorları Şekil 4.11’de verilmiştir.

**Şekil 4.11.** Büyük boyutlu problemlerde parametre skorları.

Şekil 4.11’den de görüldüğü gibi arama derinliği 5 (AD5) her üç makine örneklerinde de iyi performans göstermiştir. Bu parametrelerin değerleri Tablo 4.10’da verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi AD5 değeri 2 ve 3 makine için 0,95 değerine, 6 makine için ise 0,07 değerine denk gelmektedir.

Tablo 4.10. Büyük boyutlu problemlerde uygulanan parametre değerleri.

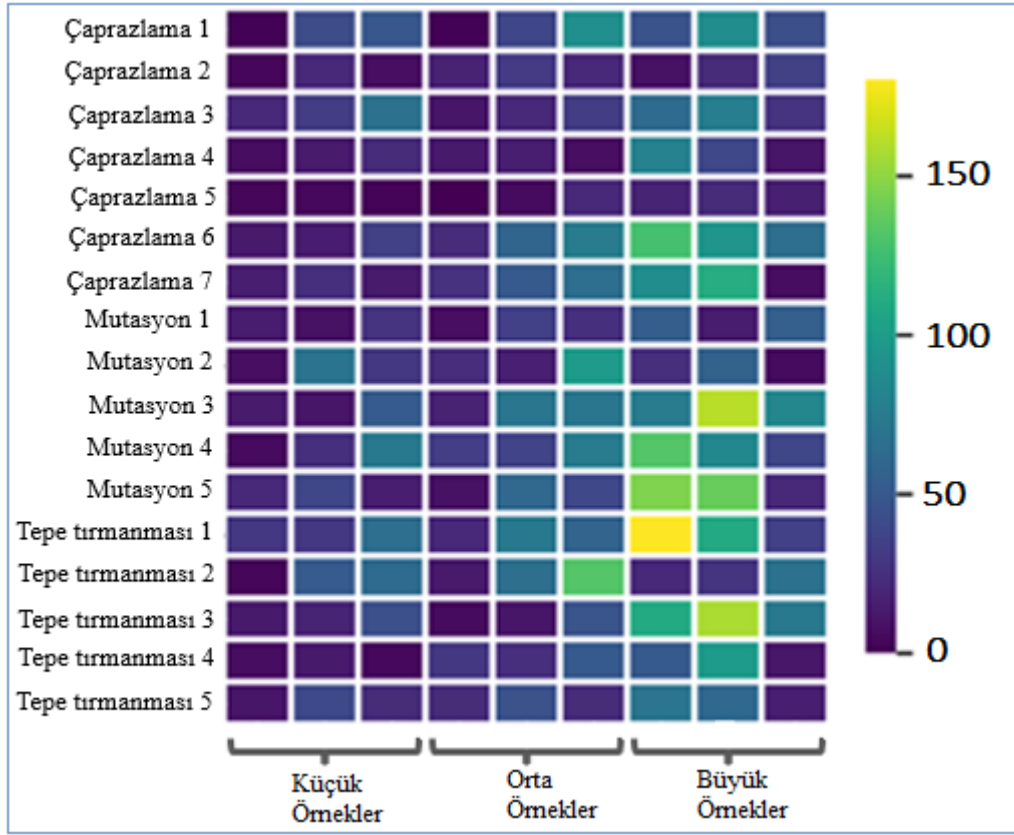
	Büyük Problemler		
	2M	3M	6M
Mutasyon oranı	{0,0063- 0,073 - 0,0083- 0,0093 - 0,0099}	{ 0,01 - 0,05- 0,0063 - 0,0083- 0,0099}	{0,01- 0,05- 0,0063 - 0,0083- 0,0099}
Arama derinliği	{0,033- 0,01- 0,05- 0,07- 0,95 }	{0,033- 0,01- 0,05- 0,07- 0,95 }	{ 0,033 - 0,0013- 0,05- 0,0019- 0,07 }

* Skor değeri yüksek olan parametreler koyu ile ifade edilmiştir.

Büyük boyutlu problemlerde mutasyon oranı için iyi sonuç veren değerler ise çoğunlukla 0,0063 ve bu değere yakın çok küçük değerlerdir.

Her bir alt seviye sezgiselin problemin büyüklüğüne bağlı olarak performans analizini yapmak amacıyla ısı grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.12’de sunulan grafikte küçük, orta ve büyük örneklerin skorları görselleştirilmiştir. Grafikte x eksenini her bir örneği

(toplamda 9 örnek), y eksenini ise alternatifleriyle uygulanan alt seviye sezgiselleri (7 çaprazlama, 5 mutasyon ve 5 tepe tırmanması) ifade etmektedir.



Şekil 4.12. Alt seviye sezgisellerin skor değerleri için oluşturulan ısı haritası.

Şekil 4.12’den de görüldüğü gibi alt seviye sezgisel performansları problem büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Küçük boyutlu problemlerde yakınsama grafiklerinde de gösterildiği gibi (Bölüm 4.2) uygulanan hibrit hiper sezgisel ilk adımlarda bulabileceği en iyi çözümü bulmuş ve sonraki adımlar boyunca da sonuç değişmemiştir. Bu durumun alt seviye sezgisel seçiminden bağımsız olduğu ve alt seviye sezgisel performansları arasında ciddi fark olmadığı görülmektedir. Orta boyutlu problemlerde bu durum biraz değişmiştir. 1.çaprazlama operatörü (kısmi değişimli çaprazlama), 2. mutasyon (yerleştirme mutasyonu) ve 2. tepe tırmanması operatörü (yerleştirme tepe tırmanması) orta boyutlu problemlerde daha iyi sonuçlar bulmuştur. Son olarak büyük boyutlu problemlerde daha değişken skor değerleri gözlemlenmektedir. Özellikle 6. çaprazlama (iki noktalı çaprazlama), 3. mutasyon (tersine çevirme mutasyonu) ve 1. tepe tırmanması (alel değişimi) operatörleri üstün performans göstermiştir.



5. BÖLÜM SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde artan rekabet koşulları imalat yapan firmalar için süreç optimizasyonunu zorunlu hale getirmiştir. Müşteriler, çeşitliliği fazla ürünleri, istenilen kalitede ve kısa sürede temin etmek istemektedir. Bu durum imalat ortamlarının değişken talebe cevap verecek şekilde esnek tasarlanması, imalat süreçlerindeki her türlü faaliyetin optimizasyonunu gerekli kılmıştır. Ürün çeşitliliğinin artması makinelerdeki ürün değişim sürelerinin (ayar zamanı) artması dolayısıyla üretimde kullanılması gereken etkin sürenin israf edilmesine sebep olmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla geliştirilen grup teknolojisi yaklaşımında işler belirli benzerliklerine göre gruplandırılır. Grup içindeki işler arası ürün değişim süresi ortadan kalmakta, sadece gruplar arası ayar zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da üretim zamanının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda gruplandırılan işlerin çizelgelenmesinde ilk olarak grupların hangi sırayla işlem göreceği belirlenmekte ve devamında da grup içindeki işlerin sırası belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasının konusu gruplandırılan işlerin hangi sırada işlem göreceğini ve her grup içindeki işin işlem sırasını belirlemektir. Problem literatürde akış tipi olarak ifade edilmekte ve işler makinelerde aynı sırada işlem görmektedir. Ürün değişim süreleri (ayar zamanı) bir önceki işlem gören gruba göre değişmekte (sıra bağımlı) ve makineler arasında yarı mamul stok alanı bulunmamaktadır. Kısıtlı alanda işlem gören her bir iş bir makinede işlem gördükten hemen sonra sonraki makinede işleme alınmaktadır. Böylece yalın üretimdeki akış mantığı sağlanmakta, üretimdeki israf azaltılmaktadır. Toplam tamamlanma zamanı en küçüklenmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında cevabı araştırılan hipotezler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için hiper sezgisel yöntemler etkin sonuçlar buluyor mu?
- Yapay tavşan algoritması çizelgeleme problemlerinde etkin sonuç veriyor mu?
- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için kullanılan ve literatürde yer alan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden etkin sonuç bulanlar hangileridir?

- Bu çalışma kapsamında modifiye edilerek uygulanan çaprazlama operatörleri çözüm uzayının etkin taranmasını sağlıyor mu?
- Literatürdeki yöntemler ve geliştirilen yöntem sonuçları nasıl farklılık göstermektedir?

Araştırma kapsamında ilk olarak literatürde 2022 yılında yer alan yapay tavşan algoritması uygulanmıştır. Bu algoritma mevcut sürü zekâsı içeren algoritmalarından parametre içermemesi yönüyle üstünlük göstermektedir. Algoritma sadece popülasyon ve iterasyon sayısı parametrelerine sahiptir dolayısıyla uygulandıktan sonra parametre optimizasyonuna gerek kalmamaktadır. Literatürde sadece yapay tavşan algoritmasının sürekli problemlere uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Yöntem kesikli problemlere veya araştırmanın konusu olan çizelgeleme problemlerinin herhangi bir versiyonuna uygulanmamıştır. Tez çalışmasının konusu olan sıra bağımlı akış tipi beklemez grup çizelgeleme problemi kesikli bir problemidir. Dolayısıyla uygun dönüşümler yapılarak algoritmanın uygulanması sağlanmıştır.

Ele alınan problem için ikinci olarak ise memetik algoritma tabanlı hiper sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Hiper sezgisel yöntem pekiştirmeli öğrenmeye dayalı geri bildirim sistemi entegre edilerek tasarlanmış ve algoritmanın iterasyonlar boyunca etkili algoritma bileşenlerini seçmesi sağlanmıştır. Böylece tek bir yöntemle birden fazla konfigürasyonu içeren yöntem geliştirilmiştir. Hiper sezgisel yöntem çaprazlama, mutasyon, tepe tırmanması operatörlerini bir grup alternatif içinden belirlemektedir. Uygulamada yedi farklı çaprazlama, beşer farklı mutasyon ve tepe tırmanması kodlanmıştır. Ayrıca mutasyon ve tepe tırmanması oranları da yine beşer farklı alternatif içinden puanlanarak seçilmektedir. Geri bildirim sistemi skor yapısı ile oluşturulmuş ve süreç içinde başarılı bileşenlerin puanları artırılmıştır. Sonuç olarak adaptif yapıda etkin bir metodoloji ele alınan problem için ilk kez uygulanmıştır. Hem yapay tavşan algoritması hem de hiper sezgisel yöntem C# programlama dili kullanılarak nesne tabanlı olarak kodlanmış ve modüler bir tasarım geliştirilmiştir.

Çalışma kapsamında uygulanan yöntemlerin parametre değerleri **irace** R tabanlı paket programı kullanılarak yapılmıştır. Programda belirlenecek parametre değerleri için alt-üst sınır değerleri bir dizi ön deney yapılarak belirlenmiştir. Parametre değerlerine ek olarak, **irace** programıyla yapay tavşan algoritmasının hiper sezgisele başlangıç çözüm bulmada entegre edilip edilmemesi durumu da belirlenmiştir. Bu kapsamda

ıkan sonuçlara bakıldığında yapay tavşan algoritmasının 3 makine büyük problem seti hariç örneklerde sonuç başarısını olumlu yönde etkilediğı belirlenmiştir. Yöntemin performans etkinliğini ölçmek için YTA yöntemi 3 makine büyük problemler hariç başlangıç çözümlü bulmada kullanılmıştır.

Geliştirilen yöntemin etkinliği literatürdeki problem örnekleri (270 örnek) çözümlere ölçülmüştür. Bu örnekler 2, 3, ve 6 makine içeren grup sayısına bağılı olarak küçük, orta ve büyük olarak gruplandırılan örneklerdir. Her bir grup için toplamda 90 adet örnek bulunmaktadır. Yapılan deneylerle elde edilen en iyi toplam tamamlanma zamanı, deneylerin ortalama ve standart sapma değeri kaydedilmiştir. Bu sonuçlar 2021 yılında geliştirilen gözden geçirilmiş tavlama benzetimi ve yöntemin yerel arama içeren versiyonu ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar tablo olarak sunulmuştur. Literatürdeki yöntemlerle ve bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntemle bulunan sonuçlar arasında anlamlı bir fark olup olmadığı Wilcoxon eşleştirilmiş ikili örnek testi ile yapılmıştır.

Geliştirilen yöntemin literatürdeki gözden geçirilmiş tavlama benzetimi yöntemine kıyasla üstün performans gösterdiği sonuçlarda açık bir şekilde görülmüştür. Geliştirilen yöntem en küçük toplam tamamlanma zamanı, ortalama ve standart sapma hesabında gözden geçirilmiş tavlama benzetimi yönteminden iyi sonuçlar bulmuştur. Sonuçların istatistiksel olarak analizine bakıldığında ise deney sonuçları arasında geliştirilen yöntemin lehine olacak şekilde anlamlı fark olduğu sonucu çıkarılmıştır. Literatürdeki gözden geçirilmiş tavlama benzetimi yönteminin yerel arama içeren versiyonu ile elde edilen sonuçlar kıyaslandığında ise tüm problemlerin %57'sinde geliştirilen yöntem daha iyi veya denk sonuçlar bulmuştur. Bununla birlikte yöntemin daha iyi toplam tamamlanma zamanı bulduğu durumlar da vardır. Bazı örneklerde ise yerel arama içeren gözden geçirilmiş tavlama benzetimi ortalama ve standart sapma değeriinde geliştirilen yöntemden biraz daha iyi değeriilere sahiptir.

Deney sonuçlarından yola çıkılarak problem için etkin sonuç veren çaprazlama, mutasyon ve tepe tırmanması operatörleri belirlenmiştir. Modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama, alel değeriimi tepe tırmanması operatörü ve karıştırma mutasyonu problem boyundan bağımsız olarak iyi sonuç veren alt seviye sezgisellerdir. Modifiye edilmiş iki noktalı çaprazlama bu araştırma kapsamında uygulanan ve literatürdeki iki noktalı çaprazlamanın değeriştirilmiş halidir. Bu operatör ele alınan problemde uygulanan yedi alternatif çaprazlama içinden en başarılı olan operatördür. Bu tez çalışmasında araştırılan hipotezlerden biri de literatürdeki üç çaprazlamanın modifiye edilerek

uygulanması ve yapılan modifikasyonun etkinliğinin araştırılmasıydı. Dolayısıyla yapılan modifikasyonun performans üzerinde olumlu etkisinin olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. Mutasyon oranı ve arama derinliği parametrelerinden hangi değerlerin iyi sonuç bulduğu belirlenmiştir.

Araştırmada cevabı aranan hipotezler aşağıdaki gibidir.

- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için hiper sezgisel yöntemler etkin sonuçlar buluyor mu?
- Yapay tavşan algoritması çizelgeleme problemlerinde etkin sonuç veriyor mu?
- Akış tipi grup çizelgeleme problemleri için kullanılan ve literatürde yer alan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden etkin sonuç bulanlar hangileridir?
- Bu çalışma kapsamında modifiye edilerek uygulanan çaprazlama operatörleri çözüm uzayının etkin taranmasını sağlıyor mu?
- Literatürdeki yöntemler ve geliştirilen yöntem sonuçları nasıl farklılık göstermektedir?

Elde edilen sonuçlar geliştirilen hiper sezgisel yöntemin etkin sonuç bulduğunu göstermiştir. Literatürde 2022 yılında yer alan ve ilk defa kesikli problemlere uygulanan yapay tavşan algoritması ise probleme başlangıç çözüm sunmada başarıyla katkı sunmaktadır. Araştırılan problem sadece bu yöntemle çözüldüğünde nispeten düşük performans göstermektedir. Çalışmada özellikle modifiye edilen iki noktalı çaprazlama et etkin sonuç veren çaprazlama operatörüdür. Karıştırma mutasyonu ve alel değişimi tepe tırmanması operatörü ise başarılı sonuç veren diğer operatörlerdir. Çaprazlama operatörlerinde yapılan modifikasyon orijinal versiyonlarına kıyasla iyileştirme sağlamıştır. Ancak problem boyutuna ve makine sayısına bağlı olarak performanslar değişim göstermektedir.

Literatürdeki yöntemler ve geliştirilen yöntem sonuçları en iyi toplam tamamlanma zamanı, ortalama ve standart sapma açısından değerlendirilmiştir. Geliştirilen yöntemin gözden geçirilmiş tavlama benzetimini geçtiği, bu yöntemin yerel arama içeren versiyonuyla kıyaslandığında da etkin sonuç bulduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda oluşturulan altyapı sayesinde hiper sezgisel yöntemler üzerinde daha fazla araştırma yapılabilir. Yöntemde uygulanan pekiştirmeli öğrenme yerine diğer geri bildirim sistemlerini uygulayarak performans analizi yapmak farklı alt

seviye sezgiselleri uygulamak yöntemin detaylı araştırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca geliştirilen yöntemde farklı yerel arama tekniklerinin uygulanması, yöntem performansının gerçek hayat problemlerine uygulanarak değerlendirilmesi de gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

Yapay tavşan algoritması bu çalışma kapsamında ilk defa çizelgeleme problemlerine uygulanmıştır. Bu algoritmanın bulduğu sonuçları ayrıca değerlendirerek optimizasyon problemlerinde iyi sonuç verdiği bilinen genetik algoritma gibi algoritmaların uygulanması ve yapay tavşan algoritmasının performans değerlendirmesinin yapılması gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

Bunlara ek olarak, farklı amaç fonksiyonları uygulamak, yöntemi diğer çizelgeleme problemlerine de uygulamak gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.



KAYNAKLAR

- Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. E., & Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European journal of operational research*, 187(3), 985-1032.
- Aslan, Ş. (2024). Energy-aware scheduling in flow shops: a novel artificial neural network-driven multi-objective optimization. *Engineering Optimization*, 1-28.
- Awadallah, M. A., Braik, M. S., Al-Betar, M. A., & Abu Doush, I. (2023). An enhanced binary artificial rabbits optimization for feature selection in medical diagnosis. *Neural Computing and Applications*, 35(27), 20013-20068.
- Bacha, S. Z. A., Belahdji, M. W., Benatchba, K., & Tayeb, F. B. S. (2019). A new hyper-heuristic to generate effective instance GA for the permutation flow shop problem. *Procedia Computer Science*, 159, 1365-1374.
- Bastos, R. E. M., Goldberg, M. C., Goldberg, E. F. G., & da Silva Menezes, M. (2020, July). Evolutionary Algorithms for the Traveling Salesman with Multiple Passengers and High Occupancy Problem. In *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Behjat, S., & Salmasi, N. (2017). Total completion time minimisation of no-wait flowshop group scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Industrial Engineering*, 11(1), 22-48.
- Behnamian, J., Zandieh, M., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2010). Due windows group scheduling using an effective hybrid optimization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5), 721-735.
- Bennet, G. S. D., & Subramaniam Nachimuthu, D. (2024). Solar PV system with modified artificial rabbit optimization algorithm for MPPT. *Electrical Engineering*, 1-17.
- Bouabda, R., Jarboui, B., Eddaly, M., & Rebaï, A. (2011). A branch and bound enhanced genetic algorithm for scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *Computers & Operations Research*, 38(1), 387-393.
- Bouazza, W. (2023). Hyper-heuristics applications to manufacturing scheduling: overview and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 935-940.
- Bozorgirad, M. A., & Logendran, R. (2012). Sequence-dependent group scheduling problem on unrelated-parallel machines. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 9021-9030.
- Bozorgirad, M. A., & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling in hybrid flowshops. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 599-612.
- Burbidge, J. L. (1975). The introduction of group technology. New York: Wiley.

- Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., & Woodward, J. R. (2010). A classification of hyper-heuristic approaches. *Handbook of metaheuristics*, 449–468.
- Burke, E. K., Gendreau, M., Hyde, M., Kendall, G., McCollum, B., Ochoa, G., ... & Petrovic, S. (2011). The cross-domain heuristic search challenge—an international research competition. In *Learning and Intelligent Optimization: 5th International Conference, LION 5, Rome, Italy, January 17-21, 2011. Selected Papers 5* (pp. 631-634). Springer Berlin Heidelberg.
- Burke, E. K., Gendreau, M., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., & Qu, R. (2013). Hyper-heuristics: A survey of the state of the art. *Journal of the Operational Research Society*, 64(12), 1695-1724.
- Celano, G., Costa, A., & Fichera, S. (2011). Flow Shop Group Scheduling with Limited Buffer Capacity and Different Workforce. *ICINCO* (2), 486–491.
- Chen, C.-F., Wu, M.-C., & Lin, K.-H. (2013). Effect of solution representations on Tabu search in scheduling applications. *Computers & Operations Research*, 40(12), 2817–2825.
- Cheng, H. M., & Ying, K. C. (2011). Minimizing makespan in a flow-line manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 15517-15522.
- Cheng, C. Y., Pourhejazy, P., Ying, K. C., & Huang, S. Y. (2021a). New benchmark algorithm for minimizing total completion time in blocking flowshops with sequence-dependent setup times. *Applied Soft Computing*, 104, 107229.
- Cheng, C. Y., Pourhejazy, P., Ying, K. C., & Liao, Y. H. (2021b). New benchmark algorithms for No-wait flowshop group scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Applied Soft Computing*, 111, 107705.
- Ciavotta, M., Minella, G., & Ruiz, R. (2013). Multi-objective sequence dependent setup times permutation flowshop: A new algorithm and a comprehensive study. *European Journal of Operational Research*, 227(2), 301-313.
- Costa, A., Cappadonna, F. A., & Fichera, S. (2014). A hybrid metaheuristic approach for minimizing the total flow time in a flow shop sequence dependent group scheduling problem. *Algorithms*, 7(3), 376-396.
- Costa, A., Cappadonna, F. A., & Fichera, S. (2017). A hybrid genetic algorithm for minimizing makespan in a flow-shop sequence-dependent group scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1269–1283.
- Costa, A., Cappadonna, F. V., & Fichera, S. (2020). Minimizing makespan in a Flow Shop Sequence Dependent Group Scheduling problem with blocking constraint. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89, 103413.
- Deliktaş, D., & Aydin, D. (2023). An artificial bee colony based-hyper heuristic algorithm with local search for the assembly line balancing problems. *Engineering Computations*, 40(9/10), 2453-2482.
- Deliktaş, D. (2022). Self-adaptive memetic algorithms for multi-objective single machine learning-effect scheduling problems with release times. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 34(3), 748-784.

- E. Taillard, Benchmarks for basic scheduling problems, *European J. Oper. Res.* 64 (1993) 278–285.
- Ebrahimi, M., Ghomi, S. F., & Karimi, B. (2014). Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied mathematical modelling*, 38(9-10), 2490-2504.
- Eghtesadifard, Mahmood, Mojtaba Khalifeh, and Morteza Khorram. "A systematic review of research themes and hot topics in assembly line balancing through the web of science within 1990–2017." *Computers & Industrial Engineering* 139 (2020): 106182.
- Fadaei, M., & Zandieh, M. (2013). Scheduling a bi-objective hybrid flow shop with sequence-dependent family setup times using metaheuristics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(8), 2233-2244.
- Fichera, S., Costa, A., & Cappadonna, F. (2015). Scheduling jobs families with learning effect on the setup. *Advances in Operations Research*, 2015.
- Gao, L., Ma, S., He, J., Yin, L., Kong, X., & Luo, J. (2024, March). Research on Multi-objective Optimal Scheduling Model of Industrial Text Information Based on Machine Learning. In 2024 6th International Conference on Natural Language Processing (ICNLP) (pp. 25-30). IEEE.
- Gelogullari, C. A., & Logendran, R. (2010). Group-scheduling problems in electronics manufacturing. *Journal of scheduling*, 13, 177-202.
- Ghorbanzadeh, M., & Ranjbar, M. (2023). Energy-aware production scheduling in the flow shop environment under sequence-dependent setup times, group scheduling and renewable energy constraints. *European Journal of Operational Research*, 307(2), 519-537.
- Goli, A., & Keshavarz, T. (2022). Just-in-time scheduling in identical parallel machine sequence-dependent group scheduling problem. *Journal of Industrial & Management Optimization*.
- Gülmez, B. (2023). Stock price prediction with optimized deep LSTM network with artificial rabbits optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 227, 120346.
- Hajinejad, D., Salmasi, N., & Mokhtari, R. (2011). A fast hybrid particle swarm optimization algorithm for flow shop sequence dependent group scheduling problem. *Scientia Iranica*, 18(3), 759–764.
- He, S., Yang, G., & Pan, C. (2019). Scheduling of Multi-variety and Small-Batch Motor Manufacturing Based on Simulated Annealing Adaptive Genetic Algorithms. 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 461–467.
- He, X., Liu, Y.-F., Pan, Q.-K., Yu, Y., & Li, Y.-Z. (2021). A Novel Constructive Heuristic for Flowshop Group Scheduling Problems to Minimize Total Flow Time. 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), 1639–1644.
- He, X., Pan, Q. K., Gao, L., Wang, L., & Suganthan, P. N. (2023a). A greedy cooperative co-evolutionary algorithm with problem-specific knowledge for multiobjective flowshop group scheduling problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 27(3), 430-444.

- He, X., Pan, Q. K., Gao, L., & Neufeld, J. S. (2023b). An asymmetric traveling salesman problem based matheuristic algorithm for flowshop group scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 310(2), 597-610.
- Huang, Z., & Yang, J. (2020). Scheduling Optimization in Flowline Manufacturing Cell Considering Intercell Movement with Harmony Search Approach. *Mathematics*, 8(12), 2225.
- Huu, Q. N., Ngoc, L. N., Tien, T. B., Ngoc, H. T., Tran, H. N., & Xuan, T. N. (2024). An improved Artificial Rabbit Optimization for structural damage identification. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 21(1), e523.
- İnce, N., Deliktaş, D., & Hakan Selvi, İ. (2024). A comprehensive literature review of the flowshop group scheduling problems: systematic and bibliometric reviews. *International Journal of Production Research*, 62(12), 4565-4594.
- Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: a multi-phase approach. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4024-4032.
- Karimi, N., Zandieh, M., & Najafi, A. A. (2011). Group scheduling in flexible flow shops: a hybridised approach of imperialist competitive algorithm and electromagnetic-like mechanism. *International Journal of Production Research*, 49(16), 4965-4977.
- Keonys. (2020, April). *Digital transformation in production planning and scheduling*. <https://www.keonys.com/wp-content/uploads/2020/04/digital-transformation-production-planning-scheduling.pdf>. Erişim tarihi: 6 Nisan 2025.
- Keshavarz, T., & Salmasi, N. (2013). Makespan minimisation in flexible flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 51(20), 6182-6193.
- Keshavarz, T., & Salmasi, N. (2014). Efficient upper and lower bounding methods for flowshop sequence-dependent group scheduling problems. *European Journal of Industrial Engineering*, 8(3), 366-387.
- Keshavarz, T., Salmasi, N., & Varmazyar, M. (2015). Minimizing total completion time in the flexible flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 226, 351-377.
- Keshavarz, T., Salmasi, N., & Varmazyar, M. (2019). Flowshop sequence-dependent group scheduling with minimisation of weighted earliness and tardiness. *European Journal of Industrial Engineering*, 13(1), 54-80.
- Kheiri, A. (2014). *Multi-stage hyper-heuristics for optimisation problems*. University of Nottingham.
- Krasnogor, N., & Smith, J. (2005). A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 9(5), 474-488.
- Li, Y., Li, X., & Gupta, J. N. (2015). Solving the multi-objective flowline manufacturing cell scheduling problem by hybrid harmony search. *Expert Systems with Applications*, 42(3), 1409-1417.

- Libralesso, L., Focke, P. A., Secardin, A., & Jost, V. (2021). Iterative beam search algorithms for the permutation flowshop. *European Journal of Operational Research*.
- Lin, S. W., Ying, K. C., Lu, C. C., & Gupta, J. N. (2011). Applying multi-start simulated annealing to schedule a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *International Journal of Production Economics*, 130(2), 246-254.
- Lin, S. W., & Ying, K. C. (2019). Makespan optimization in a no-wait flowline manufacturing cell with sequence-dependent family setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 1-7.
- Liou, C. D., & Liu, C. H. (2010). A novel encoding scheme of PSO for two-machine group scheduling. In International Conference in Swarm Intelligence (pp. 128-134). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Liou, C. D., Hsieh, Y. C., & Chen, Y. Y. (2013). A new encoding scheme-based hybrid algorithm for minimising two-machine flow-shop group scheduling problem. *International Journal of Systems Science*, 44(1), 77-93.
- Liou, C. D., & Hsieh, Y. C. (2015). A hybrid algorithm for the multi-stage flow shop group scheduling with sequence-dependent setup and transportation times. *International Journal of Production Economics*, 170, 258-267.
- Logendran, R., Gelogullari, C. A., & Sriskandarajah, C. (2003). Minimizing the mean flow time in a two-machine group-scheduling problem with carryover sequence dependency. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(1-2), 21-33.
- Logendran, R., deszoeke, P., & Barnard, F. (2006). Sequence-dependent group scheduling problems in flexible flow shops. *International Journal of Production Economics*, 102(1), 66-86.
- López-Ibáñez, M., Dubois-Lacoste, J., Cáceres, L. P., Birattari, M., & Stützle, T. (2016). The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, 3, 43-58.
- Lu, D., & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling with sequence-dependent setup time in a flow shop. *Journal of the Operational Research Society*, 64(4), 530-546.
- Luo, H., Huang, G. Q., Shi, Y., Qu, T., & Zhang, Y. F. (2012). Hybrid flowshop scheduling with family setup time and inconsistent family formation. *International Journal of Production Research*, 50(6), 1457-1475.
- Muñoz-Abella, B., Rubio, L., & Rubio, P. (2024). Identification of cracks in low-speed rotating slender cracked beams using frequencies and artificial rabbit algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 21(2), e530.
- Naderi, B., & Salmasi, N. (2012). Permutation flowshops in group scheduling with sequence-dependent setup times. *European Journal of Industrial Engineering*, 6(2), 177-198.
- Nebro, A. J., López-Ibáñez, M., Barba-González, C., & García-Nieto, J. (2019, July). Automatic configuration of NSGA-II with jMetal and irace. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (pp. 1374-1381).

- Neri, F., & Cotta, C. (2012). Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, 1-14.
- Neufeld, J. S., Gupta, J. N. D., & Buscher, U. (2015). Minimising makespan in flowshop group scheduling with sequence-dependent family set-up times using inserted idle times. *International Journal of Production Research*, 53(6), 1791-1806.
- Neufeld, Janis S., Jatinder ND Gupta, and Udo Buscher. "A comprehensive review of flowshop group scheduling literature." *Computers & Operations Research* 70 (2016): 56-74.
- Neufeld, J. S., Teucher, F. F., & Buscher, U. (2020). Scheduling flowline manufacturing cells with inter-cellular moves: non-permutation schedules and material flows in the cell scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 58(21), 6568–6584.
- Nguyen, S., Mei, Y., & Zhang, M. (2017). Genetic programming for production scheduling: a survey with a unified framework. *Complex & Intelligent Systems*, 3, 41-66.
- Nikjo, B., & Zarook, Y. (2014). A non-permutation flow shop manufacturing cell scheduling problem with part's sequence dependent family setup times. *International Journal of Applied Metaheuristic Computing (IJAMC)*, 5(4), 70–86.
- Özcan, E., Misir, M., Ochoa, G., & Burke, E. K. (2012). A reinforcement learning: great-deluge hyper-heuristic for examination timetabling. In *Modeling, analysis, and applications in metaheuristic computing: advancements and trends* (pp. 34-55). IGI Global.
- Özcan, E., Drake, J. H., Altıntaş, C., & Asta, S. (2016). A self-adaptive multimeme memetic algorithm co-evolving utility scores to control genetic operators and their parameter settings. *Applied Soft Computing*, 49, 81-93.
- Peng, Z., & Qin, H. (2024). A single-individual based variable neighborhood search algorithm for the blocking hybrid flow shop group scheduling problem. *Egyptian Informatics Journal*, 27, 100509.
- Philibus, E., Zain, A. M., Prasetya, D. D., Bahari, M., bin Yusup, N., Jalil, R. A., ... & Samah, A. A. Marine Predator Algorithm and Related Variants: A Systematic Review.
- Prestes, L., Delgado, M. R., Lüders, R., Gonçalves, R., & Almeida, C. P. (2018, July). Boosting the performance of MOEA/D-DRA with a multi-objective hyper-heuristic based on irace and UCB method for heuristic selection. In *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Qin, H., Zhang, Z. H., & Bai, D. (2016). Permutation flowshop group scheduling with position-based learning effect. *Computers & Industrial Engineering*, 92, 1-15.
- Riahi, V., Chiong, R., & Zhang, Y. (2020). A new iterated greedy algorithm for no-idle permutation flowshop scheduling with the total tardiness criterion. *Computers & Operations Research*, 117, 104839. (Riahi, Chiong, ve Zhang 2020)

- Ruiz, R., Maroto, C., & Alcaraz, J. (2005). Solving the flowshop scheduling problem with sequence dependent setup times using advanced metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 34-54.
- Sabouni, M. Y., & Logendran, R. (2013). Carryover sequence-dependent group scheduling with the integration of internal and external setup times. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 8-22.
- Sabouni, M. Y., & Logendran, R. (2018). Lower bound development in a flow shop electronic assembly problem with carryover sequence-dependent setup time. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 149-160.
- Salesforce. (2021). *The future of customer experience in manufacturing*. Harvard Business Review. <https://hbr.org/resources/pdfs/comm/salesforce/TheFutureofCustomerExperienceinManufacturing.pdf>. Erişim tarihi: 7 Nisan 2025.
- Salmasi, N. (2005). Multi-stage group scheduling problems with sequence dependent setups. Oregon State University.
- Salmasi, N., Logendran, R., & Skandari, M. R. (2010). Total flow time minimization in a flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 37(1), 199-212. (Salmasi ve ark, 2010)
- Salmasi, N., Logendran, R., & Skandari, M. R. (2011). Makespan minimization of a flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 699-710.
- Sarıçiçek, İ. (2018). Özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemlerinin çözümü için bir karar destek sistemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 108-116.
- Schaller, J. E., Gupta, J. N., & Vakharia, A. J. (2000). Scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *European Journal of Operational Research*, 125(2), 324-339.
- Sekkal, D. N., and F. Belkaid. 2022. "A Bi-objective Optimization for Flow Shop Group Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Time." In 2022 14th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), 1-7. EL JADIDA, Morocco: IEEE.
- Sekkal, D. N., & Belkaid, F. (2023). A multi-objective optimization algorithm for flow shop group scheduling problem with sequence dependent setup time and worker learning. *Expert Systems with Applications*, 233, 120878.
- Shahvari, O., Salmasi, N., Logendran, R., & Abbasi, B. (2012). An efficient tabu search algorithm for flexible flow shop sequence-dependent group scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4237-4254.
- Shahvari, O., & Logendran, R. (2017). An enhanced tabu search algorithm to minimize a bi-criteria objective in batching and scheduling problems on unrelated-parallel machines with desired lower bounds on batch sizes. *Computers & Operations Research*, 77, 154-176.
- Shahvari, O., & Logendran, R. (2018). A comparison of two stage-based hybrid algorithms for a batch scheduling problem in hybrid flow shop with learning effect. *International Journal of Production Economics*, 195, 227-248.

- Sharma, R. K., & Naick, B. K. (2024). A Novel Artificial Rabbits Optimization Algorithm for Optimal Location and Sizing of Multiple Distributed Generation in Radial Distribution Systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-32.
- Solimanpur, M., & Elmi, A. (2011). A tabu search approach for group scheduling in buffer-constrained flow shop cells. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(3), 257-268.
- Sun, Q. (2024). Artificial rabbit optimization-based ANFIS model development for predicting the compressive strength of GGBFS-based concrete. *Structural Concrete*, 25(1), 334-348.
- Vallada, E., Ruiz, R., & Framinan, J. M. (2015). New hard benchmark for flowshop scheduling problems minimising makespan. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 666-677.
- Van Der Zee, D. J., Gaalman, G. J., & Nomden, G. (2011). Family based dispatching in manufacturing networks. *International Journal of Production Research*, 49(23), 7059-7084.
- Van der Zee, D. J. (2013). Family based dispatching with batch availability. *International Journal of Production Research*, 51(12), 3643-3653.
- Vázquez-Rodríguez, J. A., & Ochoa, G. (2011). On the automatic discovery of variants of the NEH procedure for flow shop scheduling using genetic programming. *Journal of the Operational Research Society*, 62(2), 381-396.
- Villadiego, H. M. M., Arroyo, J. E. C., Jacob, V. V., dos Santos, A. G., & Gonçalves, L. B. (2012, December). An efficient ILS heuristic for total flow time minimization in a flow shop sequence dependent group scheduling problem. In 2012 12th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS) (pp. 259-264). IEEE.
- Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 105082.
- Wang, S., Liu, R., & Chen, Q. (2024). A Binary Artificial Rabbit Optimization Algorithm for Improved Cognitive Radio Spectrum Allocation. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2450270.
- Wang, Y., Han, Y., Pan, Q. K., Li, H., & Wang, Y. (2023). Redefining hybrid flow shop group scheduling: Unveiling a novel hybrid modeling paradigm and assessing 48 MILP and CP models. *Swarm and Evolutionary Computation*, 83, 101416.
- Wang, X., Li, J., Zhang, Y., Gao, K., Zheng, Z., Li, J., & Xu, Y. (2024a). A bi-evolutionary cooperative multi-objective algorithm for blocking group flow shop with outsourcing option. *Expert Systems with Applications*, 258, 125101.
- Wang, Y., Han, Y., Li, H., Pan, Q. K., & Gong, D. (2024b). Theoretical analysis and methods of rapid evaluation: Solving the blocking flowshop group scheduling problem with the total flow time and total tardiness time criteria. *Swarm and Evolutionary Computation*, 88, 101604.

- Wolniak, R. (2024). Analyzing customer behavior—employing business analytics within Industry 4.0 ecosystems. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*.
- Yahyaoui, H., Krichen, S., Derbel, B., & Talbi, E.-G. (2015). A hybrid ILS-VND based hyper-heuristic for permutation flowshop scheduling problem. *Procedia computer science*, 60, 632–641.
- Yazdani Sabouni, M. T., & Logendran, R. (2014). A simplified branch-and-price mechanism for a three-machine dynamic PCB assembly. *Applied Mechanics and Materials*, 598, 398–403.
- Ying, K. C., Gupta, J. N., Lin, S. W., & Lee, Z. J. (2010). Permutation and non-permutation schedules for the flowline manufacturing cell with sequence dependent family setups. *International Journal of Production Research*, 48(8), 2169-2184.
- Ying, K. C., Lee, Z. J., Lu, C. C., & Lin, S. W. (2012). Metaheuristics for scheduling a no-wait flowshop manufacturing cell with sequence-dependent family setups. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 671-682.
- Yuan, S., Li, T., & Wang, B. (2020). A co-evolutionary genetic algorithm for the two-machine flow shop group scheduling problem with job-related blocking and transportation times. *Expert Systems with Applications*, 152, 113360.
- Yuan, S., Li, T., & Wang, B. (2021). A discrete differential evolution algorithm for flow shop group scheduling problem with sequence-dependent setup and transportation times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(2), 427-439.
- Zandieh, M., & Karimi, N. (2011). An adaptive multi-population genetic algorithm to solve the multi-objective group scheduling problem in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22, 979-989.
- Zhang, Z. Q., Qian, B., Hu, R., & Yang, J. B. (2023). Q-learning-based hyper-heuristic evolutionary algorithm for the distributed assembly blocking flowshop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 146, 110695.
- Zhang, Y., Li, J., Xu, Y., & Duan, P. (2024). Multi-population cooperative multi-objective evolutionary algorithm for sequence-dependent group flow shop with consistent sublots. *Expert Systems with Applications*, 237, 121594.
- Zheng, R., Li, Z., Li, L., Ma, S., & Li, X. (2024). Group technology empowering optimization of mixed-flow precast production in off-site construction. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 11781-11800.



EKLER

EK A. Literatürdeki makalelerin özet tabloları



EK A.1. Problem yapısına eklenen gerçek hayat kısıtları listesi (devam)

[illegible]

EK A.1. Problem yapısına eklenen gerçek hayat kısıtları listesi (devam)

[illegible]

EK A.1. Problem yapısına eklenen gerçek hayat kısıtları listesi (devam)

Kaynak	Sıra- bağımlı ayar zamanı	Beklemesiz durumlar	Taşıma zamanı	Bloke etme kısıtı	Aylak zaman ekleme	Öğrenme etkisi	Hücreler arası taşıma	Belirsiz teslim zamanı	Çıkarma / sökme zamanı	Sınırlı tampon	Teslim tarihi	İşe en erken başlama zamanı
Celano ve ark. (2011)	✓									✓		
Cheng ve Ying (2011)	✓											
Hajinejad ve ark. (2011)	✓											
Karimi ve ark. (2011) ^a	✓											
Lin ve ark. (2011)	✓											
Salmasi ve ark. (2011)	✓											
Solimanpur ve Elmi (2011)										✓		
Zandieh ve Karimi (2011) ^a	✓											
Behnamian ve ark. (2010)	✓										✓	
Gelogullari ve Logendran (2010)	✓											
Karimi ve ark. (2010) ^a	✓											
Liou ve Liu (2010)	✓		✓									
Salmasi ve ark. (2010)	✓											
Ying ve ark. (2010)	✓											

^a : esnek akış tipi çizelgeleme problemi araştırılmıştır

EK A.2. Literatürdeki makalelerde araştırılan amaç fonksiyonları listesi

Kaynak	Yayılım zamanı (Cmax)	Toplam tamamlanma zamanı	Toplam ağırlıklandırılmış gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı	Toplam gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış erken ve geç tamamlanma zamanı	Erken ve geç tamamlanma zamanı	Toplam enerji tüketimi	Açıklamalar
Aslan, (2024)	✓							✓	
Peng ve ark. (2024) ^a								✓	
Wang ve ark. (2024a)	✓							✓	dış kaynak maliyet minimizasyonu
Wang ve ark. (2024b)		✓			✓				
Zhang ve ark. (2024)	✓							✓	
Zheng ve ark. (2024)							✓		karbon emisiyonu minimizasyonu
Ghorbanzadeh ve ark. (2023)								✓	
He ve ark. (2023a)	✓	✓						✓	
He ve ark. (2023b)	✓								
Sekkal ve Belkaid (2023)	✓							✓	
Goli ve Keshavarz, (2022)						✓			
Sekkal ve Belkaid (2022)	✓								
Cheng ve ark. (2021)	✓								
Yuan ve ark. (2021)	✓								
He ve ark. (2021)		✓							
Huang ve Yang (2020)	✓								

EK A.2. Literatürdeki makalelerde araştırılan amaç fonksiyonları listesi (devam)

Kaynak	Yayılım zamanı (Cmax)	Toplam tamamlanma zamanı	Toplam ağırlıklandırılmış gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı	Toplam gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış erken ve geç tamamlanma zamanı	Erken ve geç tamamlanma zamanı	Toplam enerji tüketimi	Açıklamalar
Yuan ve ark. (2020)	✓								
Costa ve ark. (2020)	✓								
Neufeld ve ark. (2020)	✓								
Keshavarz ve ark. (2019)			✓			✓			
Lin ve Ying (2019)	✓								
Sabouni ve Logendran (2018)		✓			✓				
Behjat ve Salmasi (2017)		✓							
Costa ve ark. (2017)	✓								
Qin ve ark. (2016)	✓	✓		✓					
Fichera ve ark. (2015)	✓								
Liou ve Hsieh (2015)	✓								
Keshavarz ve ark. (2015) ^a		✓							
Neufeld ve ark. (2015)	✓								
Li ve ark. (2015)		✓			✓				
Keshavarz ve Salmasi (2014)		✓							
Costa ve ark. (2014)		✓							

EK A.2. Literatürdeki makalelerde araştırılan amaç fonksiyonları listesi (devam)

Kaynak	Yayılım zamanı (Cmax)	Toplam tamamlanma zamanı	Toplam ağırlıklandırılmış gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı	Toplam gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış erken ve geç tamamlanma zamanı	Erken ve geç tamamlanma zamanı	Toplam enerji tüketimi	Açıklamalar
Ebrahimi ve ark. (2014)	✓				✓				
Nikjo ve Zarook (2014)	✓								
Yazdani Sabouni ve Logendran (2014)			✓	✓					
Bozorgirad ve Logendran (2013)			✓	✓					
Chen ve ark. (2013)	✓								
Fadaei ve Zandieh (2013)	✓				✓				
Keshavarz ve Salmasi (2013) ^a	✓								
Liou ve ark. (2013)		✓							
Lu ve Logendran (2013)			✓	✓					
Sabouni ve Logendran (2013)		✓	✓						
Bozorgirad ve Logendran (2012)			✓	✓					
Liao ve ark. (2012)				✓					
Naderi ve Salmasi (2012)		✓							
Shahvari ve ark. (2012) ^a	✓								
Ying ve ark. (2012)									
Villadiego ve ark. (2012)		✓							

EK A.2. Literatürdeki makalelerde araştırılan amaç fonksiyonları listesi (devam)

Kaynak	Yayılım zamanı (Cmax)	Toplam tamamlanma zamanı	Toplam ağırlıklandırılmış gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanı	Toplam gecikme	Toplam ağırlıklandırılmış erken ve geç tamamlanma zamanı	Erken ve geç tamamlanma zamanı	Toplam enerji tüketimi	Açıklamalar
Bouabda ve ark. (2011)	✓								
Celano ve ark. (2011)		✓							
Cheng ve Ying (2011)	✓								
Hajinejad ve ark. (2011)		✓							
Karimi ve ark. (2011) ^a	✓								
Lin ve ark. (2011)	✓								
Salmasi ve ark. (2011)	✓								
Solimanpur ve Elmi (2011)	✓								
Zandieh ve Karimi (2011) ^a	✓		✓						
Behnamian ve ark. (2010)							✓		
Gelogullari ve Logendran (2010)		✓							
Karimi ve ark. (2010) ^a	✓		✓						
Liou ve Liu (2010)		✓							
Salmasi ve ark. (2010)		✓							
Ying ve ark. (2010)	✓								

^a : esnek akış tipi çizelgeleme problemi araştırılmıştır

EK A.3. Literatürdeki makalelerde kullanılan yöntemler listesi

Kaynak	Matematiksel model	Alt sınır geliştirme	Genetik algoritma	Tabu arama	Parçacık sürü optimizasyonu	Tavlama benzetimi	Değişken komşuluk arama	Memetik algoritma	NSGA-II	Çok amaçlı genetik algoritma	Karınca kolonisi optimizasyonu	Açıklamalar
Aslan, (2024)			✓									yapay sinir ağları tabanlı çok amaçlı genetik algoritma
Peng ve ark. (2024) ^a							✓					
Wang ve ark. (2024a)					✓							iki evrimsel (bi-evolutionary) algoritma
Wang ve ark. (2024b)												hızlı değerlendirme yöntemleri (rapid evaluation methods)
Zhang ve ark. (2024)												çok popülasyonlu / amaçlı evrimsel algoritma
Zheng ve ark. (2024)									✓			
Ghorbanzadeh ve ark. (2023)	✓											ayırıştırma (decomposition) tabanlı sezgisel
He ve ark. (2023a)												aç gözlü işbirlikçi ortak evrim algoritması
He ve ark. (2023b)												dal ve kesme alg. / yinelenen açgözlü arama tabanlı matematiksel sezgisel (matheuristic)
Sekkal ve Belkaid (2023)	✓					✓						
Wang ve ark. (2023) ^a	✓											
Goli ve Keshavarz (2022)	✓						✓					biyocoğrafya temelli optimizasyon algoritması
Sekkal ve Belkaid (2022)	✓											
Cheng ve ark. (2021)	✓					✓						

EK A.3. Literatürdeki makalelerde kullanılan yöntemler listesi (devam)

Kaynak	Matematiksel model	Alt sınır geliştirme	Genetik algoritma	Tabu arama	Parçacık sürü optimizasyonu	Tavlama benzetimi	Değişken komşuluk arama	Memetik algoritma	NSGA-II	Çok amaçlı genetik algoritma	Karınca kolonisi optimizasyonu	Açıklamalar
He ve ark. (2021)												yapboz tabanlı LRx algoritması
Yuan ve ark. (2021)	✓	✓										kesikli diferansiyel evrimsel algoritma
Costa ve ark. (2020)	✓		✓									paralel uyarlanabilir genetik algoritma
Huang ve Yang (2020)												hibrit harmoni araması
Neufeld ve ark. (2020)						✓						
Yuan ve ark. (2020)	✓		✓									evrimsel genetik algoritma
Keshavarz ve ark. (2019)	✓				✓							
Lin ve Ying (2019)												matematiksel sezgisel (matheuristic)
Sabouni ve Logendran (2018)	✓	✓										
Behjat ve Salmasi (2017)	✓				✓		✓					
Costa ve ark. (2017)			✓									rastgele örnekleme araması
Qin ve ark. (2016)			✓									kuantum diferansiyel algoritma
Fichera ve ark. (2015)	✓		✓									
Keshavarz ve ark. (2015) ^a	✓	✓						✓				dal ücret algoritması
Sabouni ve Logendran (2018)	✓	✓										dal ücret algoritması, sütun geliştirme

EK A.3. Literatürdeki makalelerde kullanılan yöntemler listesi (devam)

Kaynak	Matematiksel model	Alt sınır geliştirme	Genetik algoritma	Tabu arama	Parçacık sürü optimizasyonu	Tavlama benzetimi	Değişken komşuluk arama	Memetik algoritma	NSGA-II	Çok amaçlı genetik algoritma	Karınca kolonisi optimizasyonu	Açıklamalar
Li ve ark. (2015)												hibrit harmoni araması
Liou ve Hsieh (2015)		✓	✓		✓							
Neufeld ve ark. (2015)												NEH sezgiseli tabanlı algoritma
Costa ve ark. (2014)			✓									tarafli rastgele örnekleme
Ebrahimi ve ark. (2014)			✓						✓	✓		
Keshavarz ve Salmasi (2014)		✓	✓									dal ücret algoritması
Nikjo ve Zarook (2014)			✓	✓								
Yazdani Sabouni ve Logendran (2014)	✓	✓										dal ücret algoritması
Bozorgirad ve Logendran (2013)	✓			✓								
Chen ve ark. (2013)			✓	✓								
Fadaei ve Zandieh (2013)			✓						✓	✓		
Keshavarz ve Salmasi (2013) ^a	✓	✓						✓				
Liou ve ark. (2013)		✓	✓		✓							
Lu ve Logendran (2013)	✓			✓								
Sabouni ve Logendran (2013)	✓		✓	✓								

EK A.3. Literatürdeki makalelerde kullanılan yöntemler listesi (devam)

[illegible]

EK A.3. Literatürdeki makalelerde kullanılan yöntemler listesi (devam)

Kaynak	Matematiksel model	Alt sınır geliştirme	Genetik algoritma	Tabu arama	Parçacık sürü optimizasyonu	Tavlama benzetimi	Değişken komşuluk arama	Memetik algoritma	NSGA-II	Çok amaçlı genetik algoritma	Karınca kolonisi optimizasyonu	Açıklamalar
Behnamian ve ark. (2010)	✓				✓	✓	✓					
Gelogullari ve Logendran (2010)	✓			✓								sütun üretimi
Karimi ve ark. (2010) ^a	✓		✓									evrimsel algoritma, emperyalist rekabetçi algoritma
Liou ve Liu (2010)		✓			✓							
Salmasi ve ark. (2010)	✓	✓		✓							✓	dal ücret algoritması
Ying ve ark. (2010)						✓						

^a : esnek akış tipi çizelgeleme problemi araştırılmıştır

EK B TEST PROBLEMLERİ ÖZELLİKLERİ

EK B.1. 2, 3 ve 6 makine problemleri için detaylar

2 makine problem örnekleri											
Küçük Örnekler				Orta Örnekler				Büyük Örnekler			
Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı
1	4	4	13	19	6	4	17	37	11	4	29
2	3	4	10	20	8	4	25	38	13	4	40
3	3	4	8	21	9	3	22	39	16	4	46
4	2	3	5	22	9	4	27	40	13	4	40
5	5	4	16	23	10	4	33	41	14	4	40
6	3	4	8	24	6	4	16	42	15	4	46
7	5	7	28	25	9	7	60	43	16	7	79
8	4	6	22	26	10	7	62	44	13	7	63
9	3	7	17	27	6	7	33	45	16	7	66
10	2	7	13	28	10	7	52	46	12	7	65
11	5	7	31	29	6	7	32	47	15	7	76
12	4	7	25	30	10	7	49	48	14	7	69
13	5	10	31	31	8	9	41	49	11	10	75
14	2	8	15	32	8	10	51	50	15	10	99
15	5	9	35	33	10	10	71	51	12	10	83
16	5	10	40	34	6	8	29	52	16	10	106
17	4	9	31	35	9	9	58	53	15	10	79
18	4	10	28	36	6	10	31	54	16	10	108

EK B.1. 2, 3 ve 6 makine problemleri için detaylar (devam)

3 makine problem örnekleri											
Küçük Örnekler				Orta Örnekler				Büyük Örnekler			
Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı
1	2	4	7	55	6	4	19	109	13	4	37
2	5	4	16	56	8	4	20	110	15	4	39
3	4	4	12	57	6	4	19	111	16	4	46
4	3	4	10	58	7	4	17	112	14	4	42
5	3	4	11	59	7	4	19	113	13	4	39
6	5	4	16	60	9	4	24	114	15	4	45
7	5	4	15	61	8	4	23	115	15	4	43
8	3	3	7	62	9	4	32	116	14	4	44
9	3	3	8	63	8	4	25	117	11	4	35
10	4	4	13	64	7	4	21	118	14	4	39
11	4	4	15	65	10	4	34	119	11	4	32
12	5	4	13	66	6	4	18	120	15	4	50
13	5	4	14	67	7	3	18	121	11	4	31
14	2	4	7	68	10	4	29	122	15	4	47
15	4	4	13	69	7	4	21	123	13	4	36
16	5	4	17	70	9	4	30	124	12	4	35
17	2	3	5	71	9	4	24	125	14	4	47
18	4	4	13	72	6	4	18	126	13	4	40
19	3	6	18	73	7	7	41	127	12	7	50
20	4	6	22	74	6	5	28	128	14	7	83
21	2	7	13	75	9	7	50	129	11	7	64
22	5	7	31	76	8	6	39	130	14	7	88
23	5	6	23	77	8	7	46	131	11	7	69
24	4	6	20	78	9	7	49	132	16	7	104
25	3	6	17	79	9	7	51	133	16	7	69
26	4	7	23	80	6	6	30	134	11	7	50
27	5	6	26	81	8	5	36	135	12	7	50
28	3	7	19	82	10	6	54	136	14	7	53
29	5	5	22	83	6	6	29	137	13	7	62

EK B.1. 2, 3 ve 6 makine problemleri için detaylar (devam)

3 makine problem örnekleri											
Küçük Örnekler				Orta Örnekler				Büyük Örnekler			
Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı
30	2	7	13	84	10	6	49	138	15	7	66
31	3	7	15	85	9	6	42	139	14	7	75
32	5	6	23	86	8	5	36	140	13	7	54
33	4	6	19	87	8	5	26	141	15	7	59
34	3	5	15	88	10	7	40	142	16	7	66
35	2	7	12	89	9	5	27	143	13	7	54
36	5	7	29	90	10	7	48	144	15	7	68
37	4	10	34	91	9	10	56	145	12	9	62
38	5	9	38	92	7	9	43	146	14	10	74
39	4	10	36	93	8	9	49	147	13	10	81
40	3	10	27	94	9	10	54	148	15	10	85
41	5	10	49	95	7	8	33	149	16	9	93
42	2	8	16	96	10	10	62	150	15	10	110
43	2	10	18	97	8	9	48	151	15	10	104
44	4	9	31	98	6	10	41	152	14	9	77
45	5	10	49	99	10	10	63	153	16	10	96
46	4	8	31	100	8	9	38	154	13	9	66
47	3	9	24	101	7	10	48	155	14	10	84
48	5	9	42	102	10	8	40	156	11	10	86
49	5	9	43	103	10	10	66	157	13	10	89
50	3	8	23	104	8	7	36	158	15	10	101
51	5	8	37	105	6	10	38	159	15	10	97
52	3	9	23	106	9	8	43	160	14	10	86
53	5	8	36	107	10	7	50	161	11	10	64
54	4	10	36	108	8	10	60	162	14	8	77

EK B.1. 2, 3 ve 6 makine problemleri için detaylar (devam)

6 makine problem örnekleri											
Küçük Örnekler				Orta Örnekler				Büyük Örnekler			
Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı	Problem	Grup sayısı	Gruptaki en büyük iş sayısı	Toplam iş sayısı
1	5	3	11	19	9	4	31	37	16	4	45
2	3	4	9	20	8	4	19	38	12	4	32
3	4	3	10	21	6	4	22	39	14	4	37
4	2	4	7	22	9	4	25	40	13	4	40
5	4	4	15	23	8	4	24	41	11	4	34
6	2	4	8	24	6	4	16	42	14	4	45
7	5	7	29	25	6	7	28	43	13	6	47
8	4	6	21	26	7	7	29	44	16	7	63
9	2	7	11	27	8	6	33	45	15	7	71
10	5	7	25	28	9	7	38	46	14	7	60
11	4	6	15	29	7	7	34	47	15	7	69
12	5	7	20	30	6	7	31	48	16	7	78
13	2	10	13	31	9	9	50	49	13	10	95
14	3	10	29	32	8	10	49	50	14	10	80
15	4	10	28	33	7	10	46	51	13	10	72
16	4	9	21	34	10	10	65	52	15	10	77
17	4	9	28	35	10	10	56	53	16	9	100
18	3	9	21	36	8	10	46	54	15	10	117

EK B.2. Kullanılan veri seti için github bağlantı adresi:

<https://github.com/nilgibi/FSGSP-Test-Problem-Data.git>



ÖZGEÇMİŞ

Ad -Soyad : Nilgün İnce

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2013, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
- **Yükseklisans** : 2017, Warwick Üniversitesi, Üretim Sistemleri Mühendisliği ve Yönetimi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-2014 yılları arasında Atatürk Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2012 yılında MEB yurt dışı (Y.L.S.Y.) bursunu kazandı.
- 2017 yılında Jaguar Land Rover Firması'nda çalıştı (İngiltere).
- 2018 yılında Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi'nde çalışmaya başladı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- İnce, N., Deliktaş, D., & Hakan Selvi, İ. 2024. A comprehensive literature review of the flowshop group scheduling problems: systematic and bibliometric reviews. *International Journal of Production Research*, 62(12), 4565-4594.

DİĞER ESERLER:

- Karakuzu, N., Karadağ, S., ve İnce, N. (2024). Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Bulanık Hata Türü ve Etkileri Analizi (Bulanık HTEA): Mobilya Sektöründe Bir Uygulama, *Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(2), 581-591.
- İnce N., Çelik C., İki Taraflı Eşleşme Algoritması ve Bir Uygulama. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YA/EM 2013) 33. Ulusal Kongresi İstanbul, Türkiye, 26 - 28 Haziran 2013, cilt.1, ss.306