



**YEDEK PARÇA ÜRETİMİNDE ARALIKLI TALEP  
PLANLAMA PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM  
YAKLAŞIMLARI**

**Ferhat YUNA**

**Danışman: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN  
Doktora Tezi  
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
2025**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YEDEK PARÇA ÜRETİMİNDE ARALIKLI TALEP PLANLAMA PROBLEMLERİ  
VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

(Intermittent Demand Planning Problems and Solution Approaches in Spare Parts Production)

DOKTORA TEZİ

Ferhat YUNA

Danışman: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN  
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Engin TOPAN

Erzurum  
Ocak, 2025

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Ferhat YUNA tarafından hazırlanan “YEDEK PARÇA ÜRETİMİNDE ARALIKLI TALEP PLANLAMA PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI” başlıklı çalışması 22/01/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Burak ERKAYMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mustafa YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Şeyma EMEÇ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç. Dr. Engin TOPAN <i>Twente Üniversitesi</i>	Enstitü Yönetim Kurulunun 05/10/2023 tarih ve 46/178 sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof. Dr. Alper NUHOĞLU**  
**Enstitü Müdürü**

Aslı ıslak imzalıdır

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Burak ERKAYMAN danışmanlığında sunulan “**Yedek Parça Üretiminde Aralıklı Talep Planlama Problemleri ve Çözüm Yaklaşımları**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Metot	2	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	1	25

*Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ferhat YUNA	Prof. Dr. Burak ERKAYMAN
22.1.2025	22.1.2025
İmza:Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi nedeni ile Enstitü Yönetim Kurulunun ....../.../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun ....../.../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanması sürecinde rehberliğini, tecrübelerini, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danıőmanım Prof. Dr. Burak ERKAYMAN'a, sürecin her aşamasında bana yol gösteren fikirleri ve bilgi birikimi ile bu çalışmanın őekillenmesine sağladığı katkılar için sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Eő danıőmanım Doç. Dr. Engin TOPAN'a da bu çalışmanın bilimsel ve metodolojik altyapısına sağladığı değerli katkılardan dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Değerli gőrüőleri ve tecrübeleriyle bana destek olan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK ve Doç. Dr. Mustafa YILMAZ'a da katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu süreçte sevgileri, duaları ve özverileriyle her zaman yanımda olan annem ve babama en derin teőekkürlerimi sunarım. Sevgili kardeőim Serhat YUNA'ya, bu süreçte gösterdiği anlayıő, sabır ve her zaman yanımda olduğunu hissettiren desteği için gönülden teşekkür ederim.

Sevgili eőim Gizem YUNA'ya, bu süreç boyunca bana gösterdiği sabır, anlayıő ve sevgisi için minnettarım. Zor zamanlarda yanımda durarak beni motive eden, başaracağıma olan inancımı her daim hissettiren eőim, bu yolculuğun en büyük destekçilerinden biri olmuştur.

Ferhat YUNA

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

## YEDEK PARÇA ÜRETİMİNDE ARALIKLI TALEP PLANLAMA PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Ferhat YUNA

Danışman: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Engin TOPAN

**Amaç:** Aralıklı talep konusu hem tahmin edilmesi hem de planlaması zor olan bir alandır. Özellikle bu talep yapısı yedek parça talepleri ile ilişkilendirilir. Taleplerdeki süreksizlikten kaynaklanan aralık ve talep büyüklüklerindeki değişkenlik problemi karmaşıklığa iten en büyük iki faktördür. Bu iki faktör iyi yönetilemezse talepteki aralık durumu stok maliyetlerinin artışına ve talepteki değişkenlik ise kayıp satış durumlarına sebep olabilir. Bu tez çalışmasında aralıklı talepler için bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin amacı stok maliyetlerini ve kayıp satışları dengeleyerek bir kar maksimizasyonu sağlamaktır. Ayrıca bu çalışma, geçmiş dönemlere ait aralıklı talep verileri ile geleceğe yönelik stok seviyelerini optimize etmeyi amaçlamaktadır.

**Yöntem:** Bu tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada bir matematiksel model önerisi vardır. Önerilen matematiksel model kayıp satışları dikkate almaktadır. Bu aşamada yedi adet test verisi ile çalışılmıştır. Fakat probleme matematiksel model ile bir uygun çözüm sağlanamamıştır. Metasezgisel yöntemler ile probleme alternatif uygun bir çözüm sağlamak amacıyla bir uygunluk fonksiyonu üretilmiştir. Önerilen uygunluk fonksiyonu genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile çalıştırılmıştır. İkinci aşamada ise sürece Markov yaklaşımı dahil edilmiştir. Bu aşamada ise tavlama benzetimi (SA) ve tabu arama algoritması (TSA) ile çözüm yapılmıştır. Her iki yöntem için Taguchi yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise önerilen uygunluk fonksiyonu yedi farklı metasezgisel yöntem ile çalıştırılarak test edilmiştir. Sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

**Bulgular:** Çalışmanın birinci aşamasında, önerilen matematiksel model ile uygun bir çözüm bulunamamıştır. Bu yüzden önerilen uygunluk fonksiyonu GA ve PSO ile çözülmüştür. Yöntemler çözüm süresi ve çözüm kalitesi açısından karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada Markov sürecinin dahil olduğu ve olmadığı iki yaklaşım SA ve TSA ile karşılaştırılmıştır. Markov yaklaşımının sürece olumlu etkisi görülmüştür. Üçüncü aşamada ise önerilen uygunluk fonksiyonu yedi farklı metasezgisel yöntem ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Metasezgisel yöntemlerin parametre optimizasyonu sonrasında TSA hariç ortalama olarak aynı uygunluk fonksiyonu değerlerine ulaştığı görülmektedir.

**Sonuç:** Önerilen matematiksel modelin bir uygunluk fonksiyonu ile temsil edilmesi alternatif olarak iyi çözümler üretmiştir. Aralıklı talepler için stok seviyesi optimizasyonu metasezgisel yöntemler ve Markov süreci ile sağlanmıştır. Böylece kayıp satışlar ve stok maliyetleri dengelenerek aralıklı taleplerin olumsuz sonuçları minimize edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca Markov süreci ile, aralıklı taleplerin envanter yönetimine proaktif bir yaklaşım getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aralıklı talep, Metasezgiseller, Envanter yönetimi, Stok seviye optimizasyonu, Parametre optimizasyonu

Ocak 2025, 92 sayfa

## ABSTRACT

### DOCTORAL DISSERTATION

#### INTERMITTENT DEMAND PLANNING PROBLEMS AND SOLUTION APPROACHES IN SPARE PARTS PRODUCTION

Ferhat YUNA

**Supervisor: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN**

**Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Engin TOPAN**

**Purpose:** The subject of intermittent demand is a difficult area to both predict and plan. This demand structure is particularly associated with spare parts demands. The intervals resulting from discontinuity in demands and the variability in demand sizes are the two biggest factors that complicate the problem. If these two factors are not managed well, the intervals in demand can cause an increase in inventory costs and the variability in demand can cause lost sales. In this thesis, a mathematical model for intermittent demands is proposed. The aim of the model is to provide profit maximization by balancing inventory costs and lost sales. In addition, this study aims to optimize future stock levels with intermittent demand data from past periods.

**Method:** This thesis consists of three stages. In the first stage, there is a mathematical model proposal. The proposed mathematical model takes into account lost sales. In this stage, seven test data were studied. However, a feasible solution to the problem could not be provided with the mathematical model. A fitness function was produced with metaheuristic methods in order to provide an alternative feasible solution to the problem. The proposed fitness function was run with genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO). In the second stage, Markov approach was included in the process. In this stage, the solution was made with simulated annealing (SA) and tabu search algorithm (TSA). Parameter optimization was done with Taguchi method for both methods. In the third stage, the proposed fitness function was tested by running with seven different metaheuristic methods. The results were compared statistically.

**Findings:** In the first stage of the study, a feasible solution could not be found with the proposed mathematical model. Therefore, the proposed fitness function was solved with GA and PSO. The methods were compared in terms of solution time and solution quality. In the second stage, two approaches with and without Markov process were compared with SA and TSA. The positive effect of the Markov approach on the process was observed. In the third stage, the proposed fitness function was compared statistically with seven different metaheuristic methods. It is seen that the metaheuristic methods reached the same fitness function values on average after parameter optimization except for TSA.

**Results:** Representing the proposed mathematical model with a fitness function produced good solutions as an alternative. Stock level optimization for intermittent demands was provided with metaheuristic methods and Markov process. Thus, the negative results of intermittent demands were tried to be minimized by balancing lost sales and inventory costs. In addition, a proactive approach was brought to the inventory management of intermittent demands with the Markov process.

**Keywords:** Intermittent demand, Metaheuristics, Inventory management, Stock level optimization, Parameter optimization

**January 2025, 92 pages**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
MATERYAL ve METOT .....	14
Yedek Parça Taleplerinin Yapısı .....	14
Problemin Varsayımları .....	18
Matematiksel Model.....	18
Markov Süreci.....	21
Test Verisi ve Uygunluk Fonksiyonu .....	24
Taguchi Metodu .....	28
Genetik Algoritma.....	30
Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	31
Tavlama Benzetimi .....	32
Tabu Arama Algoritması.....	33
Guguk Kuşu Arama Algoritması (CSA).....	34
Yusufçuk Algoritması (DA).....	35
Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AVOA).....	36
Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) .....	37
Yapay Goril Birlikleri Optimizasyonu (AGTO).....	38
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	40
Birinci Aşama Sonuçları .....	40
İkinci Aşama Sonuçları .....	48
Üçüncü Aşama Sonuçları.....	54

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	65
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	76



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Aralıklı Talep Çalışmalarının Kategorizasyonu .....	13
<b>Tablo 2.</b> Zaman Serisi Temelli Yöntemler .....	15
<b>Tablo 3.</b> 250 Dönem için Rassal Olarak Üretilmiş Aralıklı Talep .....	16
<b>Tablo 3.</b> 250 Dönem için Rassal Olarak Üretilmiş Aralıklı Talep (devamı) .....	17
<b>Tablo 4.</b> Kümeler .....	18
<b>Tablo 5.</b> Parametreler .....	19
<b>Tablo 6.</b> Karar Değişkenleri .....	19
<b>Tablo 7.</b> 250 Dönemlik Talebin Geçiş Olasılık Matrisi .....	23
<b>Tablo 8.</b> Sıfır Olmayan Taleplere Ait İstatistiksel Bilgiler (Arena Input Analyzer Çıktıları) .....	23
<b>Tablo 9.</b> Test Verilerine Ait ADI ve CV2 Değerleri .....	24
<b>Tablo 10.</b> Markov Yaklaşımında Kullanılan Test Verilerinin Olasılık Dağılımları ve Geçiş Olasılıkları .....	28
<b>Tablo 11.</b> GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (Yuna <i>et al.</i> 2023) .....	40
<b>Tablo 11.</b> GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı) .....	41
<b>Tablo 11.</b> GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı) .....	42
<b>Tablo 12.</b> PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (Yuna <i>et al.</i> 2023) .....	43
<b>Tablo 12.</b> PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı) .....	44
<b>Tablo 12.</b> PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı) .....	45
<b>Tablo 13.</b> Aralıklı Talep Boyutlarına Göre Doluluk Oranları (Yuna <i>et al.</i> 2023) .....	46
<b>Tablo 14.</b> GA ve PSO Karşılaştırmalı Sonuçları (Yuna <i>et al.</i> 2023) .....	46
<b>Tablo 15.</b> SA için Taguchi Deney Tasarımı ve Deneysel Veriler .....	49
<b>Tablo 16.</b> TSA için Taguchi Deney Tasarımı ve Deneysel Veriler .....	50
<b>Tablo 17.</b> Deney Tasarımları Sonucunda Belirlenen Parametreler .....	51
<b>Tablo 18.</b> TSA'ya Ait Çözümler .....	51
<b>Tablo 19.</b> SA'ya Ait Çözümler .....	52
<b>Tablo 20.</b> Adım II-A ve Adım II-B'nin Sayısal Olarak Karşılaştırması .....	52
<b>Tablo 21.</b> Parametreler ve Faktör Seviyeleri .....	54
<b>Tablo 22.</b> SA için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{18}(2^13^3)$ .....	55
<b>Tablo 23.</b> TSA için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{16}(4^2)$ .....	56
<b>Tablo 24.</b> CSA için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{16}(4^3)$ .....	57
<b>Tablo 25.</b> DA için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{16}(4^2)$ .....	58

<b>Tablo 26.</b> AVOA için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{27}(3^8)$ .....	59
<b>Tablo 27.</b> GWO için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{16}(4^2)$ .....	60
<b>Tablo 28.</b> AGTO için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{27}(3^5)$ .....	61
<b>Tablo 28.</b> AGTO için Taguchi Deney Tasarımı- $L_{27}(3^5)$ (devamı) .....	62
<b>Tablo 29.</b> Optimum Parametrelerle Hesaplanan Uygunluk Fonksiyon Değerleri.....	62
<b>Tablo 30.</b> Varyans Analizi (ANOVA) için Hipotezler .....	63
<b>Tablo 31.</b> Faktör Bilgileri .....	63
<b>Tablo 32.</b> Tanımlayıcı İstatistikler.....	63
<b>Tablo 33.</b> ANOVA.....	63
<b>Tablo 34.</b> Tukey Yöntemi ile Gruplama .....	64



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yedek parça anahtar kelimesi için ağ analizi.....	6
Şekil 2. Yedek parça anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı. ....	6
Şekil 3. Aralıklı talep anahtar kelimesi için ağ analizi. (Yuna & Erkayman, 2021).....	7
Şekil 4. Aralıklı talep anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı. ....	7
Şekil 5. Bir yedek parça talebi örneği. ....	14
Şekil 6. Yedek parça ürün talebi sınıflandırması. ....	14
Şekil 7. Aralıklı talebin sınıflandırılma grafiği. ....	17
Şekil 8. Markov süreci ile aralıklı talep türetme yöntemi. ....	22
Şekil 9. Önerilen uygunluk fonksiyonu akış şeması. ....	25
Şekil 10. Markov süreci için önerilen uygunluk fonksiyonu akış şeması. ....	26
Şekil 11. Markov tabanlı aralıklı talep envanter yönetimi yaklaşımı.....	27
Şekil 12. Taguchi yöntemi ile metasezgisellerin parametre optimizasyonu. ....	29
Şekil 13. GA akış şeması (Jahandideh-Tehrani et al. 2021). ....	31
Şekil 14. PSO akış şeması (Jahandideh-Tehrani et al. 2021).....	32
Şekil 15. SA akış şeması (Lian et al. 2019). ....	33
Şekil 16. TSA akış şeması (Ali, 2016). ....	34
Şekil 17. CSA akış şeması (Palanisamy & Rajaguru, 2024).....	35
Şekil 18. DA akış şeması (Mirjalili, 2016).....	36
Şekil 19. AVOA akış şeması (Abdollahzadeh et al. (2021).....	37
Şekil 20. GWO akış şeması (Mohammad Aghdam et al. 2021). ....	38
Şekil 21. AGTO akış şeması (Abdollahzadeh et al. 2021). ....	39
Şekil 22. GA ve PSO'nun çözüm süreleri arasındaki farklar (Yuna et al. 2023).....	47
Şekil 23. GA ve PSO'nun uygunluk fonksiyonu değerleri arasındaki farklar (Yuna et al. 2023). ....	47
Şekil 24. GA ve PSO'nun alt stok limitleri (Yuna et al. 2023). ....	48
Şekil 25. GA ve PSO'nun üst stok limitleri (Yuna et al. 2023).....	48
Şekil 26. SA için faktörlerin etkileri. ....	49
Şekil 27. TSA için faktörlerin etkileri. ....	50
Şekil 28. Adım II-A ve Adım II-B'nin karşılaştırması. ....	53
Şekil 29. SA için faktörlerin etkileri. ....	55
Şekil 30. TSA için faktörlerin etkileri. ....	56

<b>Şekil 31.</b> CSA için faktörlerin etkileri.....	57
<b>Şekil 32.</b> DA için faktörlerin etkileri.....	58
<b>Şekil 33.</b> AVOA için faktörlerin etkileri.....	60
<b>Şekil 34.</b> GWO için faktörlerin etkileri.....	61
<b>Şekil 35.</b> AGTO için faktörlerin etkileri.....	62



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

OEM	: Orijinal Ekipman Üreticisi (Original Equipment Manufacturer)
AB-LCC	: Faaliyet Tabanlı Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme (Activity-Based Life Cycle Costing)
ABC	: Faaliyet Tabanlı Maliyetlendirme (Activity-Based Costing)
LCC	: Yaşam Döngüsü Maliyetleme (Life Cycle Costing)
BOM	: Servis Malzeme Listesi (Bill of Materials)
LSO	: Lojistik Destek Kuruluşları (Logistics Support Organizations)
BN	: Bayes Ağları (Bayesian Networks)
$\varepsilon$ -SVR	: $\varepsilon$ -Destek Vektör Regresyonu ( $\varepsilon$ - Support Vector Regression)
SVM	: Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine)
AUSVM	: Tek Değişkenli Destek Vektör Makinesi (Adaptive Univariate Support Vector Machine)
SBA	: Syntetos-Boylan Yaklaşımı (Syntetos-Boylan Approximation)
TSB	: Teunter-Syntetos-Babai Yöntemi
MMCM	: Değiştirilmiş Markov Zinciri Modeli (Modified Markov Chain Model)
ADI	: Ortalama Talep Aralığı (Average Demand Interval)
CV	: Varyans Katsayısı (Coefficient of Variance)
MINLP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
TSA	: Tabu Arama Algoritması (Tabu Search Algorithm)
SA	: Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
CSA	: Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search Algorithm)
DA	: Yusufçuk Algoritması (Dragonfly Algorithm)
BDA	: İkili Yusufçuk Algoritması (Binary Dragonfly Algorithm)
MODA	: Çok Amaçlı Yusufçuk Algoritması (Multi-Objective Dragonfly Algorithm)
ALO	: Karınca Aslanı Optimizasyonu (Ant Lion Optimization)
MOCS	: Çok Amaçlı Guguk Kuşu Arama (Multi-Objective Cuckoo Search)
ICS	: İyileştirilmiş Guguk Kuşu Arama Algoritması (Improved Cuckoo Search Algorithm)

AVOA	: Afrika Akbabası Optimizasyon Algoritması (African Vulture Optimization Algorithm)
ExpAVOA	: Üstel Afrika Akbabası Optimizasyon Algoritması (Exponential African Vulture Optimization Algorithm)
GWO	: Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization)
MOGWO	: Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyonu (Multi-Objective Grey Wolf Optimization)
$T$	: Aralıklı talep dönemlerinin sayısı
$C_p$	: Ürün maliyeti
$C_o$	: Sipariş maliyeti
$C_h$	: Elde bulundurma maliyeti
$C_{LS}$	: Kayıp satış maliyeti
$P$	: Satış fiyatı
$D_i$	: $i$ . dönemdeki talep miktarı
$I_{LB}$	: Alt stok limiti
$I_{UB}$	: Üst stok limiti
$y_i$	: $i$ . periyotta sipariş açılırsa 1, aksi takdirde 0
$u_i$	: $i$ . periyotta kayıp satış varsa 1, aksi takdirde 0
$k1_i, k2_i$	: $i$ . periyotta açılan siparişlerle ilgili değişkenler
$k3_i, k4_i$	: $i$ . periyotta gerçekleşen kayıp satışlarla ilgili değişkenler
$Q_i$	: $i$ . periyottaki sipariş miktarı
$I_i$	: $i$ . periyottaki stok miktarı
$LS_i$	: $i$ . periyottaki kayıp satış miktarı
$S_i$	: $i$ . periyottaki satış miktarı
$M$	: Büyük bir sayı (=1.000.000)

## GİRİŞ

Ürün yaşam döngüleri tasarım aşamasıyla başlar ve satış sonrası hizmetler ile sonlanır. (Levitt, 1965; Wagner *et al.* 2012). Bir ürünün, üretimden çıktıktan sonra uzun bir süre faaliyette tutulması gereklidir. Yedek parçalar, satış sonrası hizmetlerin ana girdilerinden biridir. Yedek parçalar; orijinal, orijinal ekipman üreticiler (OEM) ve yan sanayi ürünler olarak 3 farklı kategoride toplanmaktadır. Buna bağlı olarak yedek parça talebi, temeldeki ürünlerin değişen yaşam döngüsüne göre değişmektedir. Piyasada halihazırda kullanılan ürünlerin üretimleri durmuş olsa bile yedek parça ihtiyacı hala devam etmektedir. Ürün yaşam döngüsü devam eden bir ürünün yedek parça ihtiyacı her zaman oluşmaktadır.

Giriş ve büyüme aşamalarında, kullanılan ürün sayısı artmakta ve bu da sonrasında yedek parça talebini harekete geçirmektedir. Ürünlerin üretimi bittikten sonra sadece eski parçaların yenileri ile değiştirilmesinden dolayı yedek parçaların ilk üretime göre talebi küçülmeye başlamaktadır ve ürünlerin ömrü boyunca yedek parça ihtiyacı oluşmaktadır. Kullanımda olan ürün sayısı azaldıkça, yedek parça talebi baskılanır ve bu da kademeli bir düşüşe ve hatta yedek parça talebinin aniden ortadan kalkmasına neden olabilir. Bunun olası bir sonucu olarak, OEM'ler için işletme sermayesinin önemli bir bölümünü eski envanter oluşturur.

Günümüzün rekabetçi iş dünyasında, yedek parça yönetiminin bütün yönleri ürünlerin bakımı ve operasyonlarıyla ilgili tüm taraflar için çok önemlidir. Yedek parça üreticileri, satış sonrası pazarı sadece müşteri sadakati için değil, aynı zamanda yıllık gelirlerini artırmak için de kilit bir unsur olarak görmektedirler. Birçok üreticinin toplam gelirlerinin %30'una kadar olan kısmının hizmet faaliyetlerinden geldiği bildirilmektedir (Bundschuh & Dezvane, 2003). Bu durum da yedek parça konusunun ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Hekimoğlu (2015) yedek parça stoklarının yönetiminde tedarik riskine değinmiştir. Yedek parça tedarik zincirlerinde şirketlerin ve tedarikçilerin yanı sıra müşterilerin ihtiyaç ve beklentileri de dikkate alınmalıdır. Yedek parça tedariki dikkatlice izlenmesi gereken bir aşamadır. Çünkü talebin azalmasıyla beraber bir süre sonra düşük talep nedeniyle parça üretiminin durması tedarik sürecini olumsuz olarak etkiler. Botter & Fortuin (2000), çalışmalarında satış sonrası servisi sağlayabilmek için yedek parçaların tedarik zincirinin belirli noktalarında bulunması gerektiğinden ve bu parçaların çoğunun pahalı olması nedeniyle yüksek yatırımlar gerektirdiğinden bahsetmektedir. Yedek parça talebine daha iyi cevap verebilmek ve

yedek parça ihtiyacı olan ürünlerin kullanılabilir durumda olması için bir miktar emniyet stoku bulundurmak gerekebilir. Yedek parçalar arıza kaynaklı değişimlerin yanında ani kazalar, bakım çalışmaları vb. durumlarda da gerekli olabilmektedir.

Bir ürünün nihai halini alabilmesi için birden çok alt ürünün veya parçaların birleştirilmesi gereklidir. Nihai ürünü oluşturan diğer parçalar ne kadar çeşitli ise üretim sonrası yedek parça ihtiyacı da o kadar fazla olacaktır. Üretim tamamlandıktan sonra bakım, onarım, yenileme gibi durumlar ilgili ürünler için yedek parça ihtiyacını doğurur. Yedek parça stoku ihtiyacı karşılamazsa ürün yaşam döngüsü kısalır. Tam tersi durumda yedek parça için aşırı stok tutulursa stok maliyetleri işletmelere büyük bir yük oluşturur. Arıza, kaza vb. durumlardan dolayı yedek parça talebi bir belirsizlik ve düzensizlik içerir. Belirsizlik ve düzensizlik talebi yönetmeyi zorlaştırır. Müşteri yedek parçaya ihtiyacı olduğu anda uygun maliyetle ve yüksek kalitede ulaşmayı hedefler. Yedek parça talebindeki zor durum ve müşteri istekleri yedek parça talebine cevap vermeyi karmaşık bir problem haline getirir.

Talepler, yapılarına göre birçok farklı sınıflarda tanımlanmaktadır. Bunlardan bir tanesi de aralıklı talep konusudur ve yedek parça ile doğrudan ilişkilidir. Aralıklı talepler içerisinde düzensiz talep boyutları ve sıfır talep dönemleri barındırırlar. Talep yapısı düzgünse ve sıfır talepli dönemler içermiyorsa geleneksel tahmin yöntemleri iyi sonuçlar verir. Ancak geleneksel tahmin yaklaşımları aralıklı talebin belirsiz ve düzensiz yapısı için iyi sonuçlar üretmez (Saatçioğlu & Özçakar, 2016). İşletmeler, tahminlerinin doğruluk oranlarını yükseltmeyi amaçlamaktan ziyade, özellikle aralıklı taleplerin değişken doğasını karşılamak için uygun stok yönetim yaklaşımlarına yönelmektedirler. Buradaki problem, ürüne olan talebin ne kadar doğru tahmin edildiğini anlamak yerine, müşteri talebine zamanında cevap verebilmekle ilgilidir.

Aralıklı taleplerle çalışmanın zorluklarından biri de taleplerdeki büyük değişkenliktir. Değişken taleplere cevap verebilmek için yüksek stok bulundurmak gerekir. Yüksek stok, yüksek maliyet demektir. Bu nedenle değişkenlikten kaynaklanan stok maliyetini düşürmek gerekir. Bir diğer zorluk ise satış kaybı durumudur. Mou *et al.* (2018) tarafından hazırlanan literatür taramasında, stok yönetimi kategorisinde incelenen 154 çalışmadan 100'ünün satış kaybı durumunu dikkate aldığı görülmektedir. Bu çıkarım, stok yönetiminde satış kayıplarına verilen önemi yansıtmaktadır. Yeterli stok yoksa satış kaybı yaşanabilir. Satış kayıplarını önlemek için alt ve üst stok limiti, yeniden sipariş noktası veya emniyet stoku gibi önlemler almak gerekir. Aralıklı taleplerde sıfır talep dönemleri için stok tutmak büyük bir maliyettir. Tersine, aralıklı talepler değişken olarak çok yüksek taleplere sahip olabilir. Bu durumda, yeterli stok yoksa, satış kaybı durumu ortaya çıkar. Müşteri memnuniyeti azalır ve müşteri

başka üreticilere yönelebilir. Yuna & Erkayman (2019) envanterlerin maliyet ve parametre dengesini açıklayarak maliyet-parametre ilişkisinin önemini vurgulamışlardır.

Wagner-Whitin yöntemi taleplerin bilindiği dönemler için parti büyüklüklerini optimum olarak hesaplayan bir yöntemdir (Gass & Harris, 1997). Algoritmanın ana varsayımlarından biri taleplerin önceden biliniyor olmasıdır. Bu talepleri sipariş maliyetlerini en aza indirecek şekilde gruplandırır. Benzer bir yaklaşım da Silver-Meal algoritmasıdır. Bu yöntemde ise birim zaman periyotlarının maliyetlerini en aza indiren sipariş miktarları hesaplanır (Silver, 1973). Bu yöntemde de talepler kesin ve önceden bilinmelidir. Her iki yöntemin bir diğer önemli varsayımı kayıp satışlara izin verilmemesidir. Bu çalışmada ise önerilen yaklaşımda gelecek dönemlere ait taleplerin bilinmediği varsayımı ele alınmaktadır. Önerilen yaklaşım geçmiş dönemlere ait talepler ile çalışır ve bu taleplerin aralıklı olduğu varsayılır. Bu çalışmayı diğer yaklaşımlardan ayıran noktalar, kayıp satışlara izin vermesi ve gelecek dönemler için proaktif bir envanter yaklaşımı göstermesidir.

Bir ürüne olan talep aralıklı olduğunda, ürün envanterini takip etmek ve yönetmek zor bir iştir. Yeniden sipariş noktası, sipariş miktarı veya maksimum stok seviyesi gibi kavramlar envanter yönetimini doğrudan etkiler. Bu kavramlar aralıklı talepler için daha da önemlidir. Çünkü aralıklı talep sıfır talep içerir. Bu farklı talep durumunun ortaya çıkması rastgele zamanlarda gerçekleşir. Bu nedenle, bu belirsizlik yüksek stok maliyetlerine veya yüksek satış kayıplarına neden olabilir. Amaç, müşteri talebini mümkün olan en iyi şekilde karşılamaktır. Bunu yaparken hem stok maliyetlerini hem de kayıp satışları en aza indirmek gerekir. Bu çalışmanın odak noktası bir min-max (s, S) envanter politikasıdır (Agin, 1966). Bu politikanın bu çalışmadaki yeri, bir alt ve üst stok limiti bulmaktır. Ancak, buradaki en büyük zorluk talebin aralıklı olmasıdır. Bu durum, optimum limitleri belirlemeyi önemli ölçüde zorlaştırır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, aralıklı talebe özgü kayıp satışları hesaba katan ve aralıklı talebin maliyetler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltan yeni bir matematiksel model önerilmektedir. Çalışmanın amacı, aralıklı talebi tahmin etmeden Markov süreci ile stokastik olarak ifade ederek müşteri hizmet seviyesini artıran bir envanter modeli bulmaktır.

Willemain *et al.* (2004) tarafından olasılıksal aralıklı talebi ifade etmek için iki durumlu bir Markov zinciri kullanılmıştır. İlk durum sıfır talep ve ikinci durum sıfır olmayan taleptir. İlgili taleplerin geçiş olasılıkları tarihsel verilerden hesaplanmıştır. Çalışmanın ikinci odak noktası budur. Yani, ilk adım sıfır ve sıfır olmayan taleplerin dizisini tahmin etmektir. Bu tahmin de birinci dereceden bir Markov süreciyle gerçekleştirilir. İkinci adım, talep sıfır olmadığında boyutu tahmin etmektir. Bu çalışmada, sıfır olmayan taleplerin bir olasılık dağılımından türetildiği varsayılır. Bu nedenle, ilk adım sıfır ve sıfır olmayan talepleri

belirlemektir. İkinci adımda, sıfır olmayan talep için talep boyutları olasılık dağılımından belirlenir. Talep boyutunu belirlemede olasılık dağılımının kullanılması, gelecekteki talep değerlerinin olasılıksal olarak değişebileceği anlamına gelir. Sonuç olarak, Markov Süreci ile gerçek hayattaki belirsizlik daha fazla hesaba katılmıştır.

Yedek parça taleplerinin aralıklı talebe uygun olması ve aralıklı taleplerin de tahmin zorluğundan dolayı envanter yönetimi yaklaşımı önerilmiştir. Yönetimsel bir bakış açısından, aralıklı talep envanter yönetiminin bazı önemli etkileri vardır. Birincil etki, stok seviyelerini optimize etmektir. Doğru stok seviyeleriyle daha az stok ve daha az kayıp satış elde edilir. Bir diğer kötü izlenim ise envanter ve kayıp satış maliyetleridir. Yanlış envanter politikaları, aralıklı talebi yönetmeyi daha da zorlaştırır. Yüksek stok seviyeleri stok maliyetlerini artırırken, stok seviyelerinin düşük tutulması taleplerin karşılanamamasıyla sonuçlanır. Bir diğer önemli nokta ise operasyonel zorluklardır. Aralıklı talebin değişken yapısı üretim operasyonlarını da olumsuz etkiler. Ani yüksek talepler satış kaybına neden olurken, talebin olmadığı dönemler stok maliyetlerine neden olur. Buna bağlı olarak üretim planlaması zorlaşır. Bu etkilerin son halkası müşteri memnuniyeti ve satış sonrası hizmetlerdir. Taleplerin karşılanamaması müşteri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Tüm bu yönetimsel eylemler göz önüne alındığında karmaşık bir envanter sorunu ortaya çıkar.

Aralıklı talep nedeniyle oluşan kayıp satışları hesaba katan değişken parti büyüklüğü belirleme problemi, bu çalışmanın ana konusudur. Tarihsel verilerde görülen aralıklı talepleri aktif olarak dikkate alan ileriye dönük envanter politikaları oluşturmaya odaklanmak, bu problemi farklı kılar. Bu karmaşık durumdaki amaç, kaybedilen satış riskini en aza indirmek, olası gelecekteki talepleri karşılamak için yeterli envanteri elde tutmak ve genel karlılığı optimize etmek arasında dikkatli bir denge sağlamaktır. Envanter seviyeleri hakkında proaktif kararlar almak, etkili politikalar oluşturmak için geçmişteki aralıklı taleplerden gelen verileri kullanmayı gerektirir. Alt stok limiti ve üst stok limiti, bu politikaların temelini oluşturan iki ana karar değişkenidir.

Bu çalışmanın temel motivasyonları şunlardır:

1. Aralıklı talebin zor doğası nedeniyle, aralıklı talep envanter problemleri ele alınmıştır.
2. Maliyetleri en aza indirmek aralıklı talebin iyi modellenmesine bağlıdır.
3. Markov süreci aralıklı talep süreçlerini açıklamak için iyi bir araçtır.
4. Metasezgisel yöntemler Markov süreciyle bütünleştirilerek daha iyi çözümler aranmıştır.

5. Daha gerçekçi bir algı yaratmak için kayıp satış (yok satma) durumu dikkate alınmıştır.

Çalışmada ele alınan problem, aralıklı talep stok yönetimi için alt ve üst stok limiti belirleyen bir uygunluk fonksiyonudur. Uygunluk fonksiyonu, girdi olarak verilen limitler ve aralıklı talep ile çalışır ve çıktı olarak bir kâr hesaplar. Alt sınır aslında bir yeniden sipariş noktası ve emniyet stok seviyesi gibi çalışır. Böylece, kayıp satışları en aza indirecek bir limit aranır. Üst limit, stok miktarını sınırlayarak aşırı stok tutmayı önlemeyi amaçlar. Sonuç olarak hem kayıp satışların hem de aşırı stokun maliyetlerini dengelemek için alt ve üst stok limiti bulunur. Ancak, tüm bu süreçlerin sonunda doğru sınırları bulmak zor bir problemdir. Kârı maksimize etmek için en uygun alt ve üst limitler belirlenmelidir.

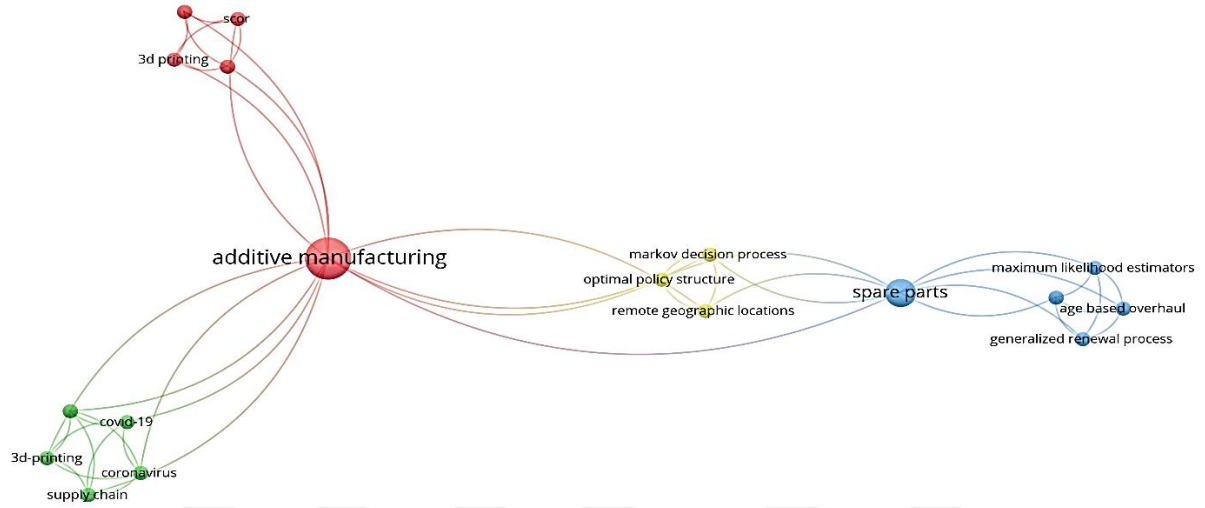
Bu araştırmanın temel katkıları ve benzersiz yönleri şunlardır:

1. Aralıklı taleplerin envanter yönetimi için bir matematiksel model ve uygunluk fonksiyonu tasarlamak,
2. Gelecek dönemlerdeki aralıklı talepler için metasezgisel yöntemlerle proaktif bir envanter modeli tasarlamak,
3. Proaktif envanter modeline Markov sürecini metasezgisel yöntemlerle entegre ederek aralıklı talep stok seviyelerini iyileştirmek,
4. Aralıklı talep envanter yönetimi için metasezgisel yöntemlerin karşılaştırmalı performans analizi.

Bu çalışma 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, yedek parçalara ait aralıklı talepleri dikkate alan ve stok seviye optimizasyonu sağlayan bir matematiksel model sunulmuştur. İlk aşamada matematiksel model uygun çözüm vermediği için bir uygunluk fonksiyonu ile metasezgisel çözümler üretilmiştir. İkinci aşamada bu metasezgisel çözümlere Markov süreci dahil edilerek proaktif çözümler iyileştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise metasezgisel yöntemlerin problem üzerindeki performansı istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

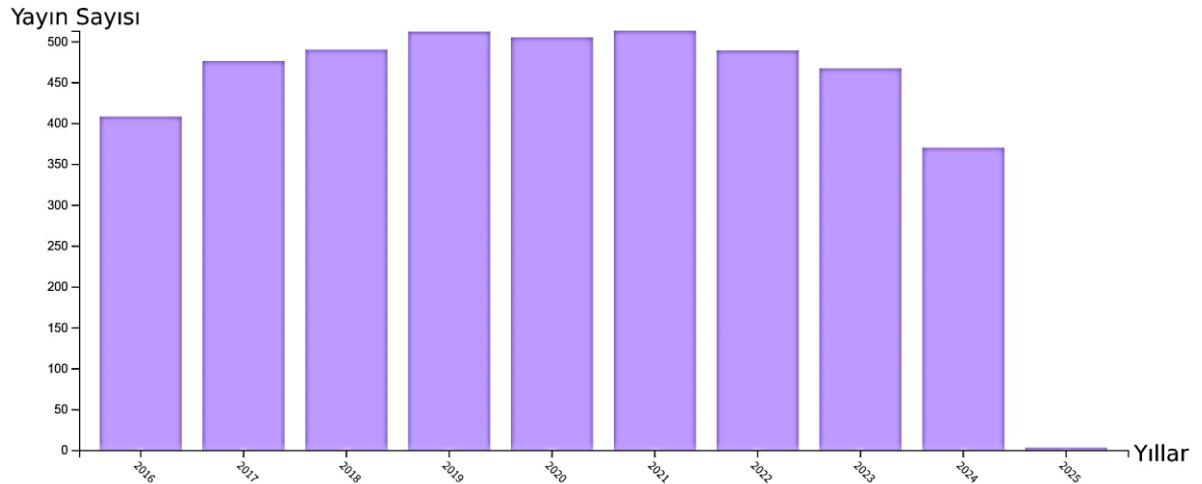
## KURAMSAL TEMELLER

VOSviewer paket programı kullanılarak “yedek parça” ve “aralıklı talep” anahtar kelimeleri için ağ analizi çalışması Web of Science veri tabanından yararlanılarak hazırlanmıştır. “Yedek parça” anahtar kelimesi ile yapılan ağ analizi aşağıda Şekil 1 üzerinde gösterilmektedir.



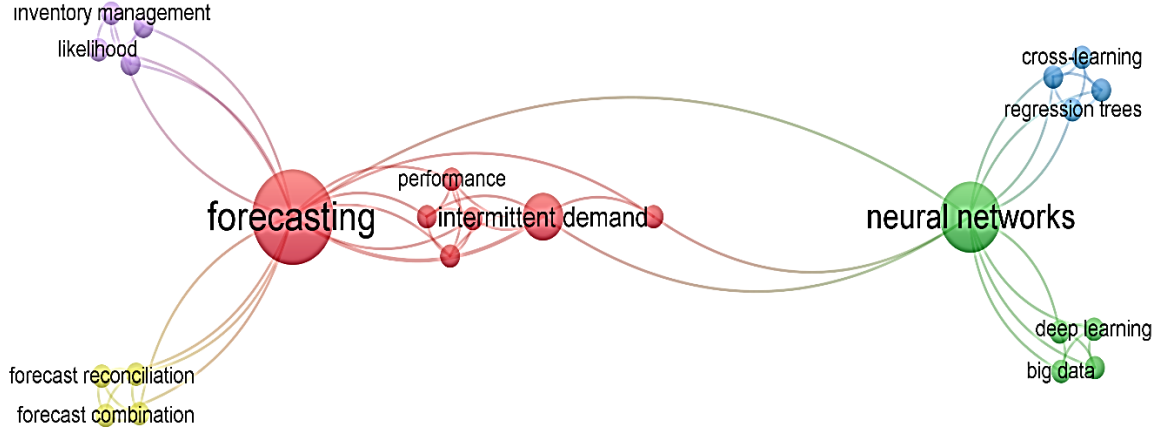
Şekil 1. Yedek parça anahtar kelimesi için ağ analizi (Yuna & Erkeyman, 2021).

Yedek parça ile ilişkili olan ve beraber çalışılan anahtar kelimeler Şekil 1 üzerinde bir ağ şeklinde gösterilmektedir. Günümüze doğru yaklaşıldığında yedek parça konusu ile yapılan çalışmaların sayısı giderek artış göstermektedir. Bu artış ise Şekil 2 üzerinde Web of Science veritabanındaki çalışmalara göre yayın sayısı ve yıl bazında görselleştirilmiştir.



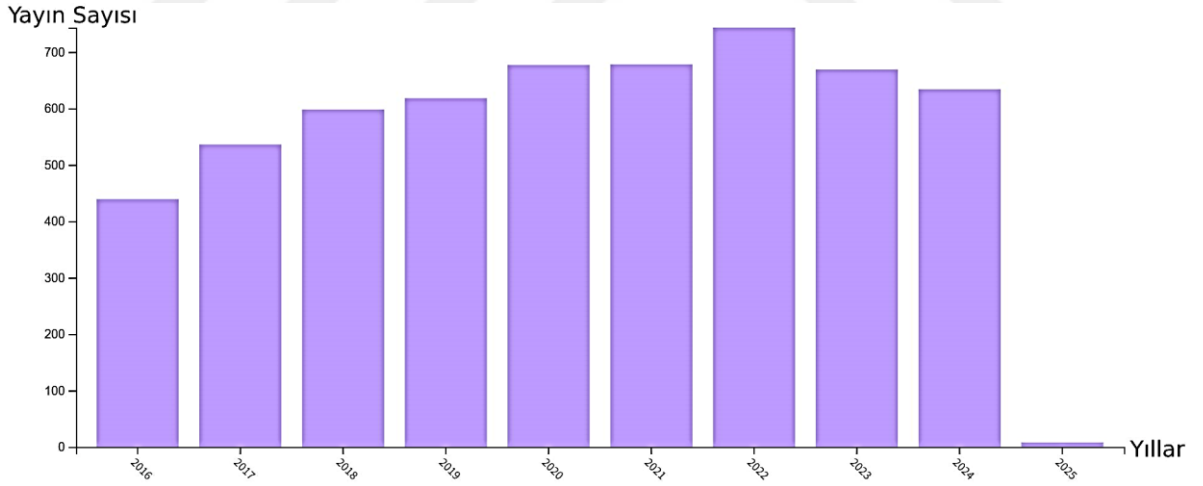
Şekil 2. Yedek parça anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı.

Yedek parça taleplerinin aralıklı olmasındaki özel durum aralıklı taleplerin ayrı olarak ele alınma ihtiyacını doğurmaktadır. Yedek parça anahtar kelimesi için yapılan ağ analizi yine Web of Science üzerinden “aralıklı talep” anahtar kelimesi için de yapılmıştır. Bu analiz Şekil 3 üzerinde gösterilmektedir.



**Şekil 3.** Aralıklı talep anahtar kelimesi için ağ analizi. (Yuna & Erkeyman, 2021)

Aralıklı talep ile ilişkili olan ve beraber çalışılan anahtar kelimeler Şekil 3 üzerinde bir ağ şeklinde gösterilmektedir. Yapılan bu çalışmaların son yıllardaki yayın sayısı dağılımı ise Şekil 4 üzerinde gösterilmektedir.



**Şekil 4.** Aralıklı talep anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı.

Şekil 3 incelediğinde aralıklı talep çalışmalarının talep tahmini üzerine yoğunlaştığı fakat envanter yönetimi alanında çok daha az çalışma olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Babai *et al.* (2020) 3000 farklı ürüne ait stok verisiyle tahmin yöntemlerini karşılaştırmıştır. Performans analizi için de 7400 seri teorik olarak oluşturulmuştur. İki Bayes yönteminin, daha yüksek bir envanter verimliliği ile diğer yöntemlerden daha iyi performans verdiğini göstermişlerdir.

Dreyfuss & Giat (2019) yedek parça tahsis problemini periyodik incelemeyle çok parçalı, çok konumlu bir envanter sisteminde çalışmışlardır. Sistem, belirli bir zaman aralığında rastgele bir müşteriye hizmet verilme olasılığı olan pencere doldurma oranını (Window Fill Rate) maksimize etmek amacıyla yedek parçaları tahsis eder. Belirli bir bütçe veya belirli bir hedef pencere doluluk oranı için en uygun yedek parça tahsisini bulmak üzere verimli bir algoritma geliştirmek için çalışmışlardır. Kabul edilebilir bekleme süresi veya küçük bütçeler için yedek parça konumlarını uygun gruplarda kümelemişlerdir.

Duran & Afonso (2020) fiziksel varlıkların yaşam döngüsünü ve özellikle onarılamaz yedek parçaların lojistik maliyetlerini dikkate alan, faaliyete dayalı bir maliyet belirleme modeli önermişlerdir. Weibull tabanlı arıza oranı ile talebin daha iyi temsil edildiği ve yedek parça-lojistik maliyet dengesinin daha iyi açıklandığı düşünülmektedir. Önerilen faaliyet tabanlı yaşam döngüsü maliyetlendirme (AB-LCC) modeli, yeni bir entegrasyon olarak hem faaliyet tabanlı maliyetlendirme (ABC) hem de yaşam döngüsü maliyetleme (LCC) yaklaşımlarının sınırlamalarını azaltır.

Pastore *et al.* (2019) farklı kategorideki ürünler için talep değişkenliğini incelemişlerdir. Bu doğrultuda yapılan kamçı etkisi analizi Avrupa otomotiv yedek parça tedarikini ele alır. Çalışmada farklı özellik ve parametreleri olan 30.000'i aşkın ürün değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ele alınan tedarik zincirinin kamçı etkisinden etkilendiğini göstermektedir.

Hasni *et al.* (2019) 7000 stok tutma biriminden oluşan büyük veri kümeleri ile çalışmışlardır. Literatürde parametrik olmayan talep tahmini için birçok önyükeme yaklaşımı önerilmiştir. Aralıklı talepler için önerilen iki yaklaşımdan ilk olarak Markov yaklaşımı kullanılır. Talep olan ve talep olmayan dönemler arasındaki geçiş bu yaklaşımla sağlanır. İkinci yaklaşım ise talep aralıklarını ve talep boyutlarını ayrı ayrı örnekleyerek çalışır. Önerilen yaklaşımın amacı, önyükeme ve parametrik yaklaşımların performans analizini genişletmektir. Sonuçlar literatürde iddia edilen aksine, yüksek aralıklı talepler ve küçük teslimat süreleri için parametrik yaklaşımın, talep aralıkları ve boyutları ayrı ayrı örnekleyen önyükeme yaklaşımından daha iyi performans verdiğini göstermektedir.

Servis bakımı için kullanılan bazı yedek parçalar kritik öneme sahiptir. Van der Auweraer & Boute (2019) bu parçaların envanter yönetimi ile ilgilenmişlerdir. Aralıklı talep sınıfına giren bu yedek parçaların çeşitliliği yüksektir. Aralıklı talep olması sebebiyle de yüksek kayıp satış maliyeti ile karşılaşılır. Servis bakım politikasına bağlı olarak bu yedek parçaların talebini tahmin etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Kritik yedek parçalara olan talebi sektördeki makine sayısı ve parçanın arıza yapma davranışı etkilemektedir. Tüm bu geri bildirimleri talep tahmininde girdi olarak kullanmışlardır.

Rahimi-Ghahroodi *et al.* (2019) bir grup sisteme hizmet vermek için gereken yedek parça ve servis mühendislerinin entegre planlamasını dikkate almışlardır. Sistemler içerisinde farklı arıza kategorileri bulunmaktadır. Her arıza kategorisinin de çözülmesi için bir servis mühendisine ihtiyaç vardır. Amaç, yavaş hareket eden yedek parçalardan dolayı bekleme süresini kısıtlayarak toplam servis maliyetlerini azaltmaktır. Bu amaca yönelik olarak da stok seviyelerini ve ne kadar mühendis görevlendiriliceğini doğru belirlemek gerekir. Ortak optimizasyon için açgözlü ve verimli bir şekilde optimuma yakın sonuçlar üreten bir sezgisel yöntem önermişlerdir.

OEM'ler yedek parça talep tahminini stoklarını güncellemek ve yenilemek için kullanırlar. Bu tahmin yapılırken girdi olarak servis malzeme listesi (BOM) kullanılır. BOM bir makine için gerekli tüm yedek parça ve bileşenleri listeler. Yanlış bir servis ürün reçetesi, yedek parça talebi için çok düşük veya çok yüksek bir tahmin yaparsa sonucunda envantere yetersiz veya fazla stok durumu olabilir. Stip & Van Houtum (2020) hatalı tahminler sonucunda uyarı verecek bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın etkinliği pilot bir çalışma ile gösterilmiştir. Bu yöntemle ilgili firma, yedek parça bulunamaması durumunu yılda yaklaşık yüzde 4-5 oranında azaltmıştır.

Hasni *et al.* (2019) iki Croston tipi yöntem ve bir parametrik (normal dağılımlı) önyükleme yöntemini dikkate almışlardır. Çalışmada her bir teslim süresinin ilk döneminde bir talep oluştuğunu dikkate alan iki önyükleme yönteminin varyasyonlarını önermişlerdir. 9000'den fazla stok tutma biriminin yedek parça talebine dayanan ampirik bir çalışma ile önerilen yöntemlerin orijinal yöntemlere kıyasla daha yüksek bir servis-maliyet verimliliği sağladığını göstermişlerdir.

Lamghari-Idrissi *et al.* (2020) sonlu Markov karar sürecini kullanarak, optimum politikanın duruma ve zamana bağlı bir baz stok politikası olduğunu kanıtlamışlardır. Sayısal bir analiz kullanarak, optimum politikayı sezgisel yöntemlerle karşılaştırmışlar. Önerdikleri Sezgisel 3 en iyi performans gösteren sezgisel yöntem olmuştur. Sezgisel 3, yedek parça stoklama kararlarında mevcut sözleşme performansı ve kalan sözleşme süresi dikkate alınarak önemli tasarruflar yapılabileceğini göstermektedir.

Boutselis & McNaught (2019) bazı lojistik destek kuruluşlarında (LSO'lar) sistem içerisindeki ekipman arızalarına karşılık gelen yedek parça talebini tahmin eden bir çalışma yapmışlardır. LSO'nun bir simülasyonu geliştirilerek, ekipman arızaları vb. ile ilgili operasyonel veriler üretilmiştir. Bir test veri seti oluşturmak için farklı LSO konfigürasyonları simüle edilmiştir ve simülasyon sonuçları çeşitli tahminlerle karşılaştırılmıştır. En iyi

performansı eğitim verilerinden öğrenen Bayes Ağları (BN), ardından makine öğrenimi ile birleştirilen karma bir BN tasarımı ve ardından bir lojistik regresyon modeli izlemiştir.

Savaş gibi olağanüstü hal durumlarında yedek parça sürecini yönetmek ve tahmin etmek zordur. Bu durum, savaş hasarlarının karmaşıklığından ve rastlantısallığından kaynaklanmaktadır. Li *et al.* (2020) bu durumdan yola çıkarak, çalışma alanı olarak birleşik bir ordu unsuru seçmişlerdir. Yedek parça talep tahmini için  $\epsilon$ -Destek Vektör Regresyonunu ( $\epsilon$ -SVR) içeren bir tahmin yöntemi sunulmuştur. Bu yaklaşımın literatürdeki diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği ve karar verme sürecinde avantaj sağladığı savaş zamanı yedek parça tedariki problemi için gösterilmiştir.

Jiang *et al.* (2020) aralıklı talebi tahmin etmek için uyarlanabilir tek değişkenli bir destek vektör makinesi (AUSVM) modeli oluşturmuşlardır. Önerilen modelin etkinliği bir sinir ağı ve halihazırda bulunan 12 model ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bu model çözüm süresi açısından büyük bir avantaja sahiptir. AUSVM'nin ağır hizmet tipi taşıt yedek parçalarının talep tahmini ve envanter kontrolü için iyi çalıştığına dair tartışmalar sunulmaktadır. AUSVM istatistiksel olarak incelendiğinde envanter yönetiminde düzgün olmayan talepler için önemli bir doğruluk artışı sağlamıştır.

Panagiotidou (2020) paralel olarak çalışan birden fazla özdeş öğeye sahip sistemler için önleyici değiştirme süresi ve yedek parça sipariş politikasının ortak optimizasyonu için entegre bir model önermiştir. Özdeş sistemlerdeki parçalar kullanım ömrüne bağlı olarak önleyici politikalarla yenilenmektedir. Aynı zamanda yedek parça stokları da sürekli takip edilmektedir. Önleyici parça değişimi maliyet avantajıyla tavsiye edilmediği sürece, önerilen modelin daha iyi bir performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

Yedek parçalar, bir şirketin çıktılarını önemli ölçüde etkileyebilecek beklenmedik ekipman duruş sürelerini en aza indirmek için kilit operasyonel varlıklardır. Yedek parça tedarik zinciri ağı, tüm yedek parça operasyon yönetimini destekler ve planlanan hedeflere ulaşmak için esastır. Tapia-Ubeda *et al.* (2020) tedarik zinciri ağı tasarımı ve kontrolünün geleneksel yedek parça yönetimi ile entegrasyonunu incelemişlerdir. Yedek parça tedarik zinciri ağıyla ilişkili toplam maliyetleri en aza indirmeyi amaçlayan, depo yerlerinin ve envanter kontrol kararlarının eşzamanlı optimizasyonu ile genel bir ağ optimizasyon modelleme yapısı önerilmiştir.

Hasni *et al.* (2019) önyükleme yaklaşımını ele alan literatürü gözden geçirerek istatistiksel özelliklerini tartışmışlar ve bu boşluğu kapatmışlardır. Yedek parçaların envanter kontrolü için doğru talep tahminleri çok önemlidir. Geçmiş çalışmalarda yedek parça talepleriyle ilgili önerilen bir çok istatistiksel tahmin yöntemi bulunmaktadır. Önyükleme

yöntemlerinin parametrik emsallerine kıyasla iyi bir deneysel performans göstermesine rağmen, mevcut çalışmaların hiçbiri ilgili bilgi durumunu bir araya getirme ve ilgili araştırma ilerlemelerini eleştirel bir şekilde gözden geçirme gerekliliğini vurgulamamaktadır. Bu çalışmada, doluluk oranı yaklaşımlarının yanında önyükleme yöntemiyle ilişkili hizmet seviyesi modelleri gözden geçirilmiştir.

Chen *et al.* (2006) çok kademeli (Multi-echelon) bir sistemde ekipman kullanıcıları, yedek parça dağıtım merkezi ve yedek parça tedarikçilerini ele almaktadırlar. Yedek parça lojistik ağında sistemin çok sayıda değişkeni ve belirsizliği barındırması nedeniyle envanter politikası optimizasyonu zor bir konudur. Bu çalışma, yedek parça lojistik ağında toplam kârı maksimize etmek için en uygun yapılandırmaları belirlemeye odaklanmaktadır. Bu amaçla, dağılım arama tabanlı simülasyon-optimizasyon yöntemi (Scatter Search Based Simulation-Optimization Method) benimsenmiştir. Ortak envanter politikalarının ve koordineli tedarik stratejilerinin yedek parça lojistik sistemi üzerindeki olumlu etkileri ortaya koyulmuştur.

Elektronik üretim yapan endüstrilerde müşteri memnuniyetinin artması ve hizmetlerin aksamaması için belirli miktarlarda yedek parça bulundurulması gereklidir. Dombi *et al.* (2018) elektronik yedek parçaların satın alma yaşam döngülerini detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Bu çalışma, yedek parça lojistik hizmetlerinde elektronik ürünlere yönelik talebi modellemek ve tahmin etmek için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Sunulan yaklaşım, satın alma yaşam döngülerindeki dalgalanmaları bir eğri ile ifade etme varsayımına dayanarak esnek bir talep fonksiyonu sunmaktadır.

Croston ve SBA (Syntetos-Boylan Approximation) yöntemleri sıfır olmayan talepleri dikkate alır. Talebe ait boyutları ve talebin aralıklarını sıfır olmayan dönemlerde günceller. Teunter-Syntetos-Babai (TSB) yöntemi ise her dönem için talep olasılığını güncelleyerek çalışır. Babai *et al.* (2019) SBA'nın bir modifikasyonu olan yeni bir tahmin yöntemi önermektedirler. Talep boyutlarını, talep aralıklarını ve tahmin ediciyi SBA'ya benzer şekilde günceller, ancak herhangi bir zaman diliminde gerçek talep aralığı en son tahmin edilen talep aralığından daha yüksek olursa, TSB'ye benzer şekilde her dönemde güncelleme olur. Yeni yöntem, askeri sektör ve otomotiv endüstrisinde deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

Aralıklı talep problemleriyle ilgilenmek endüstriler için zor bir konudur. Envanter sistemleri için iyi tahminler özellikle stokastik süreçlerde ön koşul olarak görülmektedir. Daha önce aralıklı talep tahminlerinde kullanılmayan aşırı öğrenme makinesi (Extreme Learning Machine) basit ve hızlı bir yaklaşımdır. Lolli *et al.* (2017) geri yayılma ve aşırı öğrenme makineleri tarafından eğitilen sinir ağlarını, farklı girdi modellerini ve mimarilerini birleştirerek gerçek zamanlı serilerde aralıklı talep için sinir ağları ile karşılaştırmışlardır.

Petropoulus *et al.* (2016) zamansal toplamayı kullanan standart çerçevenin aksine, talep hacimleri üzerinde toplama gerçekleştiren aralıklı talep tahmini için yeni bir toplama çerçevesi önermişlerdir. Bunun için, ters aralıklı talep serisi olan dönüştürülmüş bir zaman serisi oluşturmuşlardır. Önerilen yaklaşımın performansı, otomotiv ve savunma sektöründen alınan 8000'den fazla yedek parça verisi ile deneysel olarak gösterilmiştir.

Lolli *et al.* (2019) aralıklı taleplerde çok kriterli envanter için bir sınıflandırma çalışması yürütmüşlerdir. Balugani *et al.* (2019) hem bozulabilirlik hem de aralık kısıtlamalarını hesaba katan, sabit ömürlere sahip aralıklı talep öğeleri için bir envanter yönetim sistemi önermiştir. Syntetos & Boylan (2006) aralıklı talep tahmininde envanter kontrolünün performansını; basit hareketli ortalama yöntemi, tek üstel düzeltme yöntemi ve Croston yöntemini önerilen yeni bir yöntemle beraber değerlendirmişlerdir. Balugani *et al.* (2017) sınırlı ömrü ve son kullanma tarihi olan ürünler için aralıklı talep kısıtıyla sipariş miktarını belirlemek üzere bir sistem tasarlamışlardır. Teunter *et al.* (2010) yedek parça sipariş miktarlarını aralıklı talep ortamında belirleyen bir yaklaşım sunmuşlardır. Veriler oldukça düzensiz bir şekilde sahipse gerçek talep büyüklüğünün dağılımı standart bir teorik dağılıma uymayabilir (Babai *et al.* 2015).

Cavalieri *et al.* (2008) bir işletme içerisinde bakım yedek parçaları için parça sınıflandırması, talep tahmini ve stok yönetimi gibi karar mekanizmaları kurmuşlardır. Hua *et al.* (2007) sıfır olmayan taleplerin ve sıfır olmayan yedek parça talebinin oluşumunun tahmini arasındaki ilişkiyi entegre eden yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Kocer (2013) aralıklı talep verilerinin modellenmesi ve tahmini için değiştirilmiş bir Markov zinciri modeli (MMCM) önermiştir. Hasni *et al.* (2019) talep dönemlerini (sıfır olmayan talep) ve talep olmayan dönemleri (sıfır talep) birbirine bağlamak için bir Markov zinciri kullanmışlardır. Veri boyutu ve talep dönemleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Markov karar süreci, Lamghari-Idrissi *et al.* (2020) tarafından yedek parçaların envanter kararları için kullanılarak, duruma ve zamana bağlı bir envanter politikasının en uygun olduğu gösterilmiştir. Aralıklı talebi tahmin etmek için, ilgili ürünlerin geçmiş satışlarını ve envanter durumunu hesaba katan bir Markov birleşik yöntemi (MCM) önerilmiştir (Tian *et al.* 2021).

Tablo 1, son literatürü kullanarak aralıklı talep çalışmalarının kategorizasyonunu göstermektedir. Sınıflandırma kriterleri arasında aralıklı talep, talep simülasyonu, envanter yönetimi, Markov süreci, stok seviyesi optimizasyonu ve metasezgisel yöntemler yer almaktadır. Özellikle, mevcut araştırmaların kapsamlı bir incelemesine rağmen, aralıklı talebin envanter yönetimi için matematiksel modelleme ve Markov sürecini metasezgisel yöntemlerle bütünleştiren hiçbir stok seviyesi optimizasyon çalışması tespit edilmemiştir. Bu nedenle, bu araştırma, matematiksel model tabanlı bir Markov sürecini ve metasezgisel yöntemleri

bütünleştirerek aralıklı talep envanter yönetimine bir stok seviyesi optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır.

**Tablo 1.** Aralıklı Talep Çalışmalarının Kategorizasyonu

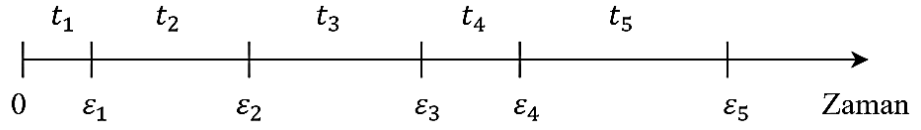
Referanslar	Metasezgisel Yöntemler	Stok Seviye Optimizasyonu	Aralıklı Talep	Talep Simülasyonu	Envanter Yönetimi	Markov Süreci
(Gass & Harris, 1997; Silver, 1973)	-	-	-	-	√	-
(Kocer, 2013; Hasni <i>et al.</i> 2019)	-	-	√	√	-	√
(Langhari-Idrissi <i>et al.</i> 2020)	-	-	√	-	√	√
(Tian <i>et al.</i> 2021)	-	-	√	√	-	√
(Babai <i>et al.</i> 2019; Babai <i>et al.</i> 2020; Pastore <i>et al.</i> 2019; Petropoulos <i>et al.</i> 2016; Dombi <i>et al.</i> 2018)	-	-	√	√	-	-
(Boutselis <i>et al.</i> 2019; Jiang <i>et al.</i> 2020; Li <i>et al.</i> 2020; Hua <i>et al.</i> 2007)	-	-	√	√	-	-
(Dreyfuss & Giat, 2019; Van der Auweraer & Boute, 2019)	-	-	√	-	√	-
(Cavaliere <i>et al.</i> 2008)	-	-	√	√	√	-
(Panagiotidou, 2020; Tapia-Ubeda <i>et al.</i> 2020)	-	-	√	-	√	-
Önerilen yaklaşım	√	√	√	√	√	√

Önerilen yaklaşım, min-max envanter politikasını (s,S) dikkate alan bir model sunmaktadır. Bu politikaya göre bir stok alt sınırı ve üst sınırı belirlenmesi gereklidir. Eğer elde bulunan stok miktarı alt stok sınırından küçük ise stok seviyelerini üst sınıra kadar yükseltecek şekilde bir sipariş açılır. Bu çalışmanın ele aldığı problem bu stok seviyelerinin optimum şekilde bulunmasıdır. Aralıklı talepler için alt sınır ani talepleri karşılamayı amaçlarken üst sınır ile de aşırı stok tutmanın önüne geçmek amaçlanmaktadır. Amaç, sipariş sıklığını ve maliyetleri azaltırken, kayıp satış maliyetlerini envanter maliyetleriyle dengelemektir. Önerilen yaklaşım geçmişte meydana gelen aralıklı talep serilerini kullanarak gelecekte meydana gelmesi öngörülen belirsiz ve düzensiz aralıklı talebi yönetmeye odaklanmaktadır.

## MATERYAL ve METOT

### Yedek Parça Taleplerinin Yapısı

Yedek parça talepleri Şekil 5'te gösterildiği gibi özel bir duruma sahiptir. Talepler çoğunlukla düzensiz zaman aralıklarında ( $t_i$ ) ve gerçekleştiği zaman ise farklı miktarlarda ( $\varepsilon_i$ ) gerçekleşmektedir. Burada  $\varepsilon_i$  yedek parça talep miktarını ve  $t_i$  ise art arda gerçekleşen iki talep arasındaki zaman aralığını ifade etmektedir.



Şekil 5. Bir yedek parça talebi örneği.

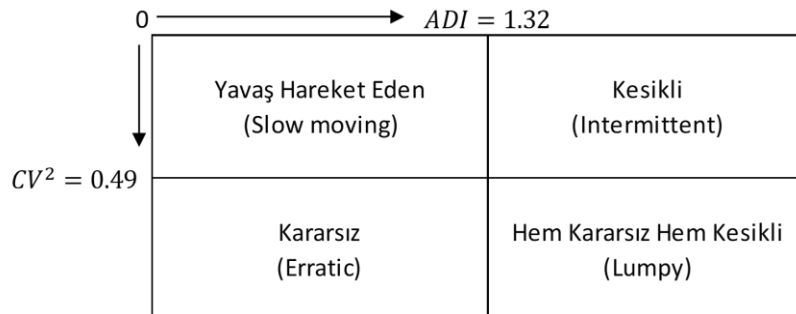
Taleplerde hem miktar hem de zaman kavramını değerlendirmek için iki parametre tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi ortalama talep aralığıdır (ADI). ADI talepler arasında geçen ortalama aralığı hesaplar. İkincisi ise varyans katsayısıdır (CV). CV ise talep miktarının standart sapmasının talebin ortalamasına göre gösterdiği değişimin ifadesidir.

$$ADI = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N} \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \varepsilon)^2}{N}}}{\varepsilon} \quad (3)$$

Eşitlik (1)'de ADI hesabı için  $N$  değeri "0" olmayan talepler için periyotların sayısını gösterir. Denklem (3)'te CV hesabı için  $N$  tüm periyotların sayısı gösterir.



Şekil 6. Yedek parça ürün talebi sınıflandırması (Ghobbar & Friend, 2002).

Yedek parça talepleri özel bir durumdur. Yedek parçaların taleplerindeki bu özel duruma iki önemli istatistik sebep olur. Birincisi taleplerin boyutundaki değişkenlik, ikincisi de talep oluşumundaki düzensiz zaman aralıklarıdır. Bu iki durumun istatistiksel olarak ölçümü için Eşitlik (1) ve (3) kullanılmaktadır. ADI talebin düzenli gerçekleşip gerçekleşmediği ile ilgilenirken, CV ise talebin değişkenliğine odaklanır. Alternatif talep modellerinin sınıflandırılması, tahmin yönteminin seçilmesini kolaylaştırır ve birçok envanter kontrol sisteminin temel bir unsurudur. Syntetos *et al.* (2005) Williams ve Eaves'in sınıflandırma yaklaşımlarını gözlemleyerek yeni bir sınıflandırma önerdiler. Şekil 6'daki yedek parça ürün talebi sınıflandırması bu çalışmada aralıklı taleplerin test verileri üretilirken kullanılmıştır. Talebin aralıklı doğası Şekil 6'da gösterildiği gibi dört temel özelliğe kadar izlenebilir (Ghobbar & Friend, 2002):

1. Yavaş hareket eden talep: Talepler arası aralıklarda ve miktarlarda büyük değişiklik olmayan talep şeklidir.
2. Kesikli/aralıklı talep: Talebin miktarında çok fazla değişkenlik olmayan fakat çoğu zaman diliminde de talep bulunmayan talep şeklidir.
3. Kararsız talep: Talepler arası aralıklardan ziyade talep miktarı açısından oldukça düzensizdir.
4. Hem kararsız hem kesikli talep: Birçok zaman diliminde sıfır talep mevcuttur, ayrıca talep değerleri büyük ölçüde değişiklik gösterir.

**Tablo 2.** Zaman Serisi Temelli Yöntemler

Kategori	Yöntem
Geleneksel Zaman Serisi Yaklaşımları	Hareketli Ortalama (Brown, 1959) Üssel Düzeltme (Brown, 2004) Üssel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (Makridakis <i>et al.</i> 2008)
Değiştirilmiş Geleneksel Zaman Serisi Yaklaşımları	Ayarlamalı Üssel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (Johnston & Boylan, 1996) Ayarlamalı Holt Metodu (Bermúdez <i>et al.</i> 2006) Holt-Winters Metodu (Altay <i>et al.</i> 2008)
Croston'un Metodu ve Değiştirilmiş Versiyonları	Croston (Croston, 1972) Syntetos & Boylan Yaklaşımı (Syntetos & Boylan, 2001) Croston'un Değiştirilmiş Yaklaşımı (Levén & Segerstedt, 2004)
Önyükleme Metodu	Değiştirilmiş Bootstrap Metodu (Snyder, 2002)
Talep Toplama / Ayrıştırma	Filtreleme / Öbekleme Metodu (Kalchschmidt <i>et al.</i> 2003)

Yedek parçalarda aralıklı talep tahmini için literatürde önerilen başlıca yöntemler şu şekildedir; Croston metodu, Syntetos ve Boylan metodu ve Bootstrap metodu. Ayrıca zaman serisi temelli yöntemlerde literatürde yerini almıştır. Tablo 2'de bu yöntemler verilmiştir (Özçift, 2018). Aralıklı talebin zor doğasını anlamak için rassal olarak üretilen bir talep verisi Tablo 3'te verilmiştir. 250 dönemden oluşan bu talep verisi ADI ve CV<sup>2</sup> istatistiklerine göre sınıflandırılmıştır. Talep tahmin yöntemlerinde tahmin amaçlı kullanılan bu parametreler (ADI

ve  $CV^2$ ) bu çalışmada rassal aralıklı talepler üretirken kullanılmıştır. Tablo 3'te görüldüğü üzere birçok dönemdeki talep değerleri 0'dır. Bu durum aralıklı taleplerle çalışmaya zorlaştıran en büyük unsurlardan biridir.

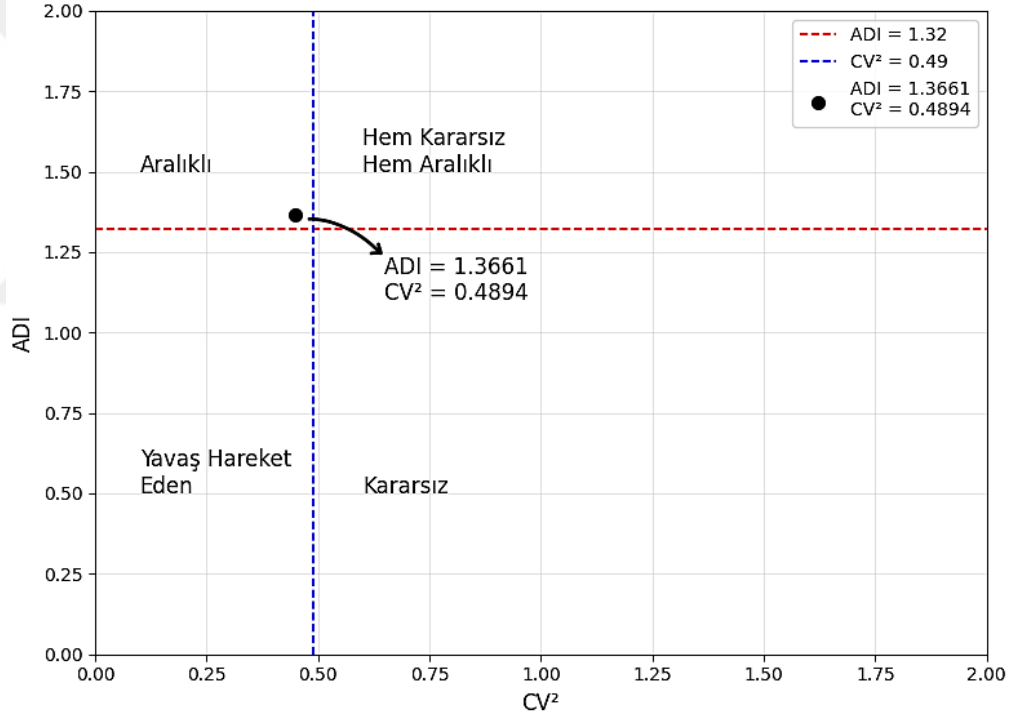
**Tablo 3.** 250 Dönem için Rassal Olarak Üretilmiş Aralıklı Talep

Dönem	Talep	Dönem	Talep	Dönem	Talep	Dönem	Talep	Dönem	Talep
1	0	51	0	101	0	151	0	201	0
2	21	52	0	102	0	152	0	202	0
3	0	53	51	103	0	153	32	203	0
4	0	54	41	104	0	154	14	204	36
5	0	55	43	105	0	155	20	205	28
6	41	56	30	106	0	156	37	206	32
7	18	57	20	107	0	157	35	207	44
8	0	58	34	108	14	158	39	208	0
9	0	59	39	109	34	159	0	209	0
10	0	60	30	110	33	160	0	210	0
11	32	61	27	111	45	161	0	211	32
12	39	62	41	112	42	162	40	212	26
13	20	63	21	113	32	163	17	213	37
14	28	64	28	114	20	164	16	214	30
15	25	65	27	115	37	165	36	215	24
16	36	66	40	116	26	166	24	216	39
17	54	67	16	117	33	167	43	217	40
18	11	68	36	118	0	168	39	218	30
19	34	69	26	119	0	169	0	219	32
20	33	70	42	120	0	170	0	220	40
21	36	71	22	121	37	171	0	221	32
22	33	72	28	122	24	172	24	222	19
23	24	73	21	123	30	173	20	223	31
24	31	74	31	124	23	174	34	224	29
25	11	75	50	125	26	175	15	225	15
26	34	76	0	126	0	176	37	226	51
27	24	77	0	127	0	177	34	227	36
28	0	78	0	128	0	178	37	228	29
29	0	79	46	129	30	179	31	229	31
30	0	80	0	130	46	180	39	230	32
31	0	81	0	131	21	181	34	231	23
32	0	82	0	132	35	182	29	232	28
33	0	83	20	133	19	183	30	233	23
34	13	84	27	134	21	184	38	234	33
35	28	85	0	135	27	185	0	235	25
36	22	86	0	136	25	186	0	236	27
37	41	87	0	137	20	187	0	237	44
38	42	88	22	138	17	188	0	238	33
39	36	89	33	139	38	189	0	239	36

**Tablo 3.** 250 Dönem için Rassal Olarak Üretilmiş Aralıklı Talep (devamı)

40	27	90	39	140	24	190	0	240	5
41	37	91	48	141	35	191	22	241	30
42	30	92	0	142	42	192	51	242	25
43	0	93	0	143	22	193	48	243	27
44	0	94	0	144	27	194	22	244	19
45	0	95	37	145	43	195	42	245	24
46	39	96	21	146	35	196	29	246	21
47	12	97	43	147	25	197	31	247	24
48	30	98	39	148	41	198	32	248	36
49	25	99	0	149	25	199	43	249	27
50	0	100	0	150	0	200	48	250	26

Tablo 3'teki talep verisi Eşitlik (1) ve Eşitlik (3)'te verilen hesaplamalara göre aralıklı talep sınıfına girmektedir. Talebin ADI değeri 1,3661 ve  $CV^2$  değeri 0,4894 olarak hesaplanmıştır. Şekil 7'de talebin sınıflandırılmasıyla ilgili grafik gösterilmektedir.

**Şekil 7.** Aralıklı talebin sınıflandırılma grafiği.

Önerilen yaklaşımda, aralıklı talepler kullanılmıştır. Yedek parça konusu içerisinde bazı belirsizlikler içermektedir. Bunlardan biri ani talepleri karşılayabilmek için ortaya çıkan aşırı arz durumudur. Bir diğeri ise yetersiz stoklardan kaynaklanan satış kayıplarını oluşturur. Bu durumların ortak sonucu olarak, üreticinin operasyonel ve stratejik planlama süreçleri de olumsuz olarak etkilenir. Tüm bu etkiler, nihayetinde üreticiler için maliyet olarak ortaya çıkar. Aralıklı talepler bazı dönemlerde sıfır talebe sahip olduğu için, talebin olmadığı dönemlerde envanter bulundurmaya ek maliyetler yaratır. Benzer şekilde, talebin olmadığı dönemlerde

envanter maliyetlerinden kaçınmak için düşük envanter tutmak, ani talepler için bir kayıp satış durumu yaratır. Böyle bir senaryoda stok seviyelerinin iki durumu da göz önüne alacak şekilde ayarlanması büyük önem arz eder. Stok maliyetleri için bir stok üst sınırı ve kayıp satış maliyetleri için bir stok alt sınır bulunmalıdır. Önerilen model, aralıklı talep için minimum ve maksimum envanter seviyelerini belirleyerek toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlar. Matematiksel model önerisi hem stok maliyetlerini hem de stoksuzluk maliyetlerini dengelemek için sunulmuştur. Aralıklı talebin zor yapısına bir envanter modeli çözüm aranmıştır. Talep büyüklüğü ve talep aralığındaki değişkenliği minimum maliyetle karşılamak için ilk aşamada bir matematiksel model önerilmektedir.

### Problemin Varsayımları

Önerilen model min-max envanter politikasıyla çalışmaktadır. Problemin kabul edilen varsayımları şunlardır (Yuna *et al.* 2023):

1. Geçmiş dönemlerdeki aralıklı talepler bilinmektedir.
2. Ürün maliyeti, sipariş maliyeti, elde tutma maliyeti, kayıp satış maliyeti ve satış fiyatı bilinmektedir.
3. Talepler FIFO kuralına göre stoklardan karşılanmakta ve güncellenmektedir.
4. Karşılanan talep miktarı satış miktarını oluşturmaktadır.
5. Kayıp satışlara izin verilmektedir.
6. Başlangıç stoku ve sipariş miktarı sıfırdır.
7. *i.* dönemde verilen siparişler bir sonraki dönemin başında stoklara eklenir.
8. İlgili işlemler talep dönemi sayısı kadar tekrarlanır.

Önerilen matematiksel model bu varsayımlara dayanarak oluşturulmuştur. Modelin ana karar değişkenleri alt ve üst stok sınırıdır.

### Matematiksel Model

Önerilen modelde kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri açıklamalarıyla birlikte Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 4.** Kümeler

Kümeler	Açıklama
$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7\}$	Aralıklı talep dönemlerinin sayısı

Tablo 4'te kümeler, problemde kullanılan aralıklı talep için periyot sayısını göstermektedir. Yedi ayrı test verisi demek yedi ayrı periyot olduğunu göstermektedir.

**Tablo 5.** Parametreler

Parametreler	Açıklama
$C_p$	Ürün maliyeti
$C_o$	Sipariş maliyeti
$C_h$	Elde bulundurma maliyeti
$C_{LS}$	Kayıp satış maliyeti
$P$	Satış fiyatı
$D_i$	$i$ . dönemdeki talep miktarı

Matematiksel modelde kullanılan parametreler ve açıklamaları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 6.** Karar Değişkenleri

Karar Değişkenleri	Açıklama
$I_{LB}$	Alt stok limiti
$I_{UB}$	Üst stok limiti
$y_i$	$i$ . periyotta sipariş açılırsa 1, aksi takdirde 0
$u_i$	$i$ . periyotta kayıp satış varsa 1, aksi takdirde 0
$k1_i, k2_i$	$i$ . periyotta açılan siparişlerle ilgili değişkenler
$k3_i, k4_i$	$i$ . periyotta gerçekleşen kayıp satışlarla ilgili değişkenler
$Q_i$	$i$ . periyottaki sipariş miktarı
$I_i$	$i$ . periyottaki stok miktarı
$LS_i$	$i$ . periyottaki kayıp satış miktarı
$S_i$	$i$ . periyottaki satış miktarı
$M$	Büyük bir sayı (=1.000.000)

Matematiksel modelde kullanılan karar değişkenleri Tablo 6'te listelenmiştir. Önerilen matematiksel modele ait amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıda verilmiştir (Yuna *et al.* 2023).

$$Maks \sum_{i=1}^T (P * S_i - C_p * Q_i - C_{LS} * LS_i - C_h * I_i - C_o * y_i) \quad (4)$$

Kısıtlar altında:

$$Q_0 = 0 \quad (5)$$

$$I_0 = 0 \quad (6)$$

$$I_i = I_{i-1} + Q_{i-1} - D_i \quad \forall i \in T \quad (7)$$

$$k1_i - k2_i = I_{LB} - I_i \quad \forall i \in T \quad (8)$$

$$k1_i \leq M * y_i \quad \forall i \in T \quad (9)$$

$$k2_i \leq M * (1 - y_i) \quad \forall i \in T \quad (10)$$

$$Q_i \geq (I_{UB} - I_i) * y_i \quad \forall i \in T \quad (11)$$

$$k3_i - k4_i = D_i - I_i \quad \forall i \in T \quad (12)$$

$$k3_i \leq M * u_i \quad \forall_i \in T \quad (13)$$

$$k4_i \leq M(1 - u_i) \quad \forall_i \in T \quad (14)$$

$$LS_i \geq (D_i - I_i) * u_i \quad \forall_i \in T \quad (15)$$

$$S_i = D_i - LS_i \quad \forall_i \in T \quad (16)$$

$$I_{LB} \leq I_{UB} \quad (17)$$

$$k1_i, k2_i, k3_i, k4_i, Q_i, I_i, LS_i, S_i \geq 0 \quad \forall_i \in T \quad (18)$$

$$I_{UB}, I_{LB} \geq 0 \quad (19)$$

$$y_i, u_i \in \{0,1\} \quad \forall_i \in T \quad (20)$$

Yukarıda önerilen matematiksel model kazancı en büyükleyen  $I_{UB}$  ve  $I_{LB}$  değerlerini bulmaya yöneliktir. Modelin amacı amaç fonksiyonunu maksimize eden alt stok sınırı ve üst stok sınırını bulmaktır. Amaç fonksiyonu (Eşitlik 4) satış fiyatı ile maliyetler arasındaki farkın en büyüklenmesini hesaplar. Kar maksimize edilmeye çalışılmaktadır.

Eşitlik (5) ve (6) model ilk çalıştığı esnada yani sıfır anında sipariş miktarı ve stok miktarını sıfıra eşitler. Eşitlik (7)  $i$  dönemindeki stok miktarının iteratif olarak güncellenmesini sağlar.  $i$  anındaki stok miktarı,  $i-1$  dönemindeki stok ve sipariş ile  $i$  dönemindeki talepler ile hesaplanır.

Eşitlik (8), (9), (10) ve (11)  $i$  dönemde sipariş açılıp açılmayacağına kontrolü ve sipariş açıldığında  $i$  dönemde kaç tane ürün sipariş edileceğiyle ilgili olan kısıtlar kümesini ifade eder. Bu kısıt kümesi min-max politikasına göre çalışır. Stok miktarı  $I_{LB}$  sınırından küçük ise model stok miktarını  $I_{UB}$  sınırına kadar tamamlayacak şekilde bir sipariş açar. Aksi takdirde  $i$  dönemde stoklarda bulunan miktar  $I_{LB}$  miktarının üstünde ise sipariş verilmemesini sağlar.

Eşitlik (12), (13), (14) ve (15)  $i$  dönemde yok satılan ürün miktarlarının kontrolü ile ilgili kısıtlardır. Eğer  $i$  dönemdeki stok miktarı  $i$  dönemin talep miktarından büyük ise yok satılan ürün olmayacaktır. Aksi durumda  $i$  dönemdeki stok miktarı  $i$  dönemdeki talep miktarından küçükse  $D_i - I_i$  farkı kadar  $i$  döneme yok satılan ürün kaydedilir.

Eşitlik (16)  $i$  dönemde satışı yapılan ürün miktarını hesaplar. Eğer  $i$  dönemde talep karşılanmış ise  $LS_i = 0$  olur.  $LS_i = 0$  ise talep miktarı kadar satış yapılmış demektir. Aksi durumda  $i$  dönemde yok satılan ürün miktarı oluşmuş ise satış miktarı  $D_i - LS_i$  farkı kadar olacaktır. İlgili kısıt her iki durumu da sağlamaktadır.

Eşitlik (17) stok limitleri arasındaki ilişkiyi ifade eder.  $I_{LB}$ , her zaman  $I_{UB}$ 'ye ya eşit ya da  $I_{UB}$ 'den küçük olmak zorundadır. Eşitlik (18) ve (19)  $k1_i, k2_i, k3_i, k4_i, Q_i, I_i, LS_i, S_i, I_{UB}$  ve  $I_{LB}$  karar değişkenleri için pozitiflik şartlarını ifade etmektedir. Eşitlik (20)  $y_i$  ve  $u_i$  karar değişkenlerinin 0 ya da 1 değerini alabileceğini ifade etmektedir.

İlgili matematiksel model 250 dönemlik aralıklı talep ile GAMS 22.5 yazılım programında MINLP (Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama) olarak BARON çözücüsünde 1 saat çalıştırılmış ve uygun çözüm bulunamamıştır. Uygun çözüm bulunamamasının ardından matematiksel modeldeki problem bir uygunluk fonksiyonu haline getirilerek metasezgisel yöntemlerle çalıştırılmış ve sonuçları kaydedilmiştir.

### Markov Süreci

Markov süreci, bir yöneylem araştırması tekniğidir. Şu anda gerçekleşen bir faaliyetin gelecekteki durumu hakkında bilgi edinmeyi mümkün kılan bir tekniktir (Resnick, 1992). İncelenen herhangi bir sistemdeki durumlar, sabit veya rastgele zamanlarda belirli bir olasılıkla değişebiliyorsa buna stokastik süreç denir. Sistemdeki durumların olasılıklarını kullanarak gelecekteki durumlarını belirlemek, Markov sürecinin temelini oluşturur. Markov analizi, sistemde bir durumdan diğerine stokastik geçişin olduğu durumlarda kullanılır. Burada ilgili geçişler, geçiş olasılıkları olarak ifade edilir (Öztürk, 2005). Rastgele bir sürecin Markov zinciri olması için aşağıdaki temel özelliklere sahip olması gerekir (Hillier & Lieberman, 1980):

$t = (0,1,2,3\dots)$  için  $P = \{ X_{t+1} = j | X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i \} = P\{ X_{t+1} = j | X_t = i \}$  ise, rassal süreç  $X_t$  Markov özelliğine sahiptir. Süreç içerisindeki durumlar her zaman kendinden bir önceki duruma bağlıdır. Bu bağımsızlık özelliğine Markov özelliği denir.

Markov süreci belirli koşullar altında zincir olarak adlandırılır:

- Markov özelliğine sahiptir.
- Olası durumlar sonlu bir kümedir.
- Başlangıç olasılıkları bilinmektedir.
- Durağan geçiş olasılıkları vardır.

Eşitlik (21)'de verilen  $P_{ij}$  matrisi,  $t$  periyotunda  $i$  durumunda olan sürecin  $t+1$  periyotunda  $j$  durumunda olma olasılığını, yani geçiş olasılığını verir.

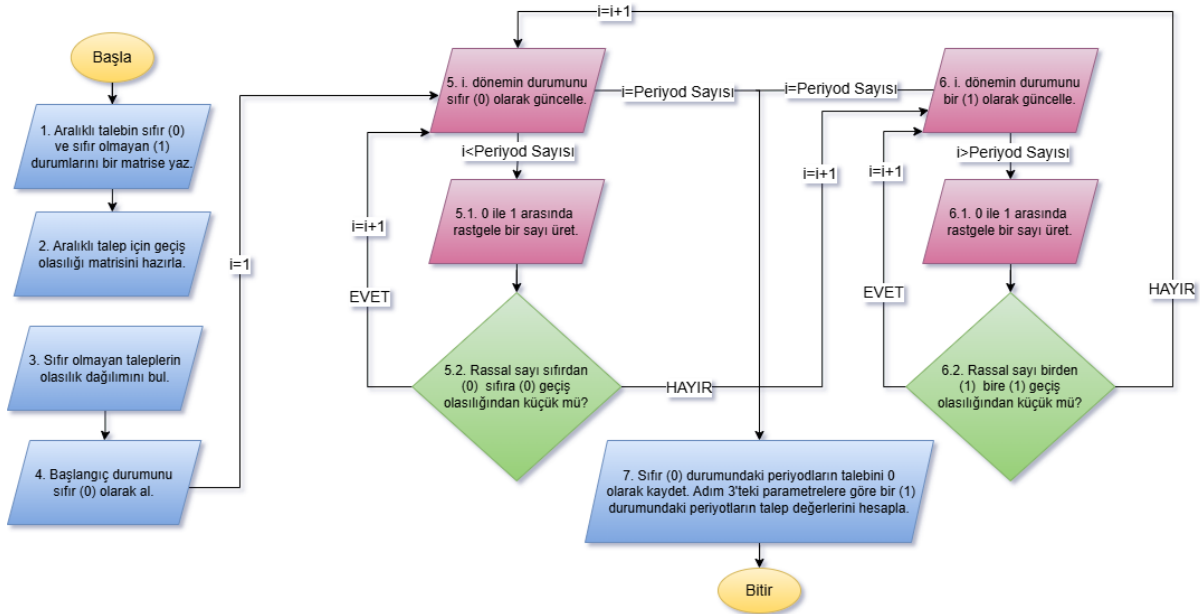
$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1S} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{S1} & P_{S2} & \cdots & P_{SS} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$P_{ij}$  geçiş olasılıklarını içerdiğinden, bu matrise stokastik matris denir. Matriste, her  $i$  değeri için  $\sum_j P_{ij}=1$  ve her  $i$  ve  $j$  için  $P_{ij} \geq 0$ 'dır. Bu koşullar sağlandığında, Markov zinciri tanımlanır (Taha, 1992).

Eğer rastgele değişken  $X(t)$ , zaman  $t$ 'nin bir fonksiyonu olarak gözlemlenebiliyorsa, o zaman  $X(t)$  sürekli zamanlı bir stokastik süreçtir. Eğer rastgele değişken  $X$ , zaman  $t$ 'de belirli zamanlarda gözlemleniyorsa, o zaman  $X(t)$  ayrık zamanlı bir stokastik süreçtir. Bu çalışmadaki problem, ayrık durum ve ayrık zamanlı stokastik süreçler sınıfına uymaktadır. Durumlar  $S= \{0,1\}$  (0: periyotta talep yok 1: periyotta talep var) olarak belirlenir. Bir periyot kadar zaman aralıklarında, sıfır talepli bir durum olup olmadığı kontrol edilir.

Bu bölümde, Markov süreci için oluşturulan 4 test verisinden 1. test verisi (250'lik talep) örnek olarak gösterilmiştir. Talebi aralıklı olarak sınıflandırmak için bazı istatistiksel bilgilere (ADI ve  $CV^2$ ) ihtiyaç vardır. Oluşturulan talebin ADI değeri 1,3661 ve  $CV^2$  değeri 0,0893'tür. Rastgele oluşturulan talep, bu değerlerle aralıklı talep sınıfına aittir.

Önerilen prosedürde, ilk adım  $i$  periyodu için bir talep olup olmadığını belirlemektir. Talep varsa, talebin olasılık dağılımına göre yeni bir talep oluşturulur. Talebin gerçekleşip gerçekleşmediği Markov zinciri tarafından belirlenir. Yukarıda belirtildiği gibi, ilgili süreç ayrık durum ve ayrık zamana sahip stokastik bir süreçtir. Durumlar  $S= \{0,1\}$  (0:  $i$  periyotunda talep yoktur 1:  $i$  periyotunda talep vardır) ile gösterilir. Stokastik aralıklı talebin nasıl oluşturulacağı Şekil 8'de adım adım açıklanmaktadır.



Şekil 8. Markov süreci ile aralıklı talep türetme yöntemi.

Şekil 8'de ilk adımda görüldüğü gibi, aralıklı talepler sıfır (0) ve sıfırdan farklı (1) durumlar olarak sınıflandırılır. Bu iki durum için aralıklı talebin geçiş olasılığı matrisi hazırlanır. Sıfırdan farklı (1) sınıfa ait aralıklı talepler için olasılık dağılımı hesaplanır. Stok seviyesi optimizasyonu için çalıştırılacak talepler türetilirken, Şekil 8'deki 4. adımda başlangıç durumu sıfır (0) olarak belirlenir. Markov Zinciri, bir sonraki periyotun durumunu belirlemek için kullanılır. 0 ile 1 arasında bir rastgele sayı üretilir. Oluşturulan rastgele sayı, mevcut durumun kendine dönme olasılığından küçükse, bir sonraki durum hala aynı olur. Ancak, rastgele sayı, mevcut durumun kendine dönme olasılığından büyükse, diğer duruma geçiş bir sonraki periyotta yapılır. Bu işlem adımları, söz konusu aralıklı talebin büyüklüğüne ulaşılan kadar devam eder. Tüm durumlar belirlendikten sonra, sıfır olmayan (1) durumlar için talep, Şekil 8'deki 3. adımda hesaplanan olasılık dağılımına göre türetilir. Hesaplanan geçiş olasılıkları Tablo 7'de gösterilmiştir. Bu tabloya göre, durum 0'dan durum 0'a geçiş olasılığı 0,2727, durum 0'dan durum 1'e geçiş olasılığı 0,7273, durum 1'den durum 0'a geçiş olasılığı 0,2678 ve durum 1'den durum 1'e geçiş olasılığı 0,7322'dir.

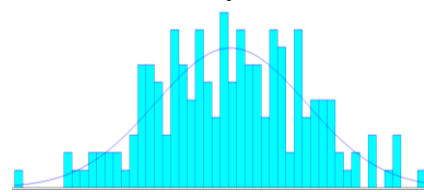
**Tablo 7.** 250 Dönemlik Talebin Geçiş Olasılık Matrisi

		<b>0</b>	<b>1</b>
$P_{ij}$	<b>0</b>	0.7164	0.2836
	<b>1</b>	0.0989	0.9011

Sıfır olmayan talepler seçilmiş ve olasılık dağılımı Arena Input Analyzer programında bulunmuştur. Sıfır olmayan taleplere ait olasılık dağılımı bilgileri ve histogram grafiği Tablo 8'de verilmiştir.

**Tablo 8.** Sıfır Olmayan Taleplere Ait İstatistiksel Bilgiler (Arena Input Analyzer Çıktıları)

<b>Girdi Analizi Sonuçları</b>	<b>Ki-Kare Testi</b>
Dağılım: Normal dağılım	Aralık sayısı = 13
Açıklama: NORM (30.8, 9.17)	Serbestlik derecesi = 10
Square Error: 0.004200	Test İstatistikleri = 5.13
	Karşılık gelen p değeri > 0.75
<b>Veri Özeti</b>	<b>Histogram Özeti</b>
Veri Noktası Sayısı = 183	Histogram Aralığı = 4,5- 54,5
Minimum Veri Değeri = 5	Aralık Sayısı = 50
Maksimum Veri Değeri = 54	
Örnek Ortalaması = 30,8	
Örnek Standart Sapması = 9.2	



Önerilen süreçte ilk olarak dönem  $i$  için sıfır veya sıfır olmayan talep durumları belirlenmiştir. Eğer sıfır olmayan talep var ise olasılık dağılımına göre talep üretilmiştir. Böylece sıfır olmayan taleplerin büyüklükleri belirlenmiştir.  $t=0$  döneminde hiç talep oluşmadığı varsayımıyla Markov süreci kullanılarak talepler Tablo 7'deki geçiş olasılıklarına ve girdi analizinde bulunan NORM(30.8, 9.17) dağılımına göre oluşturulmuştur.

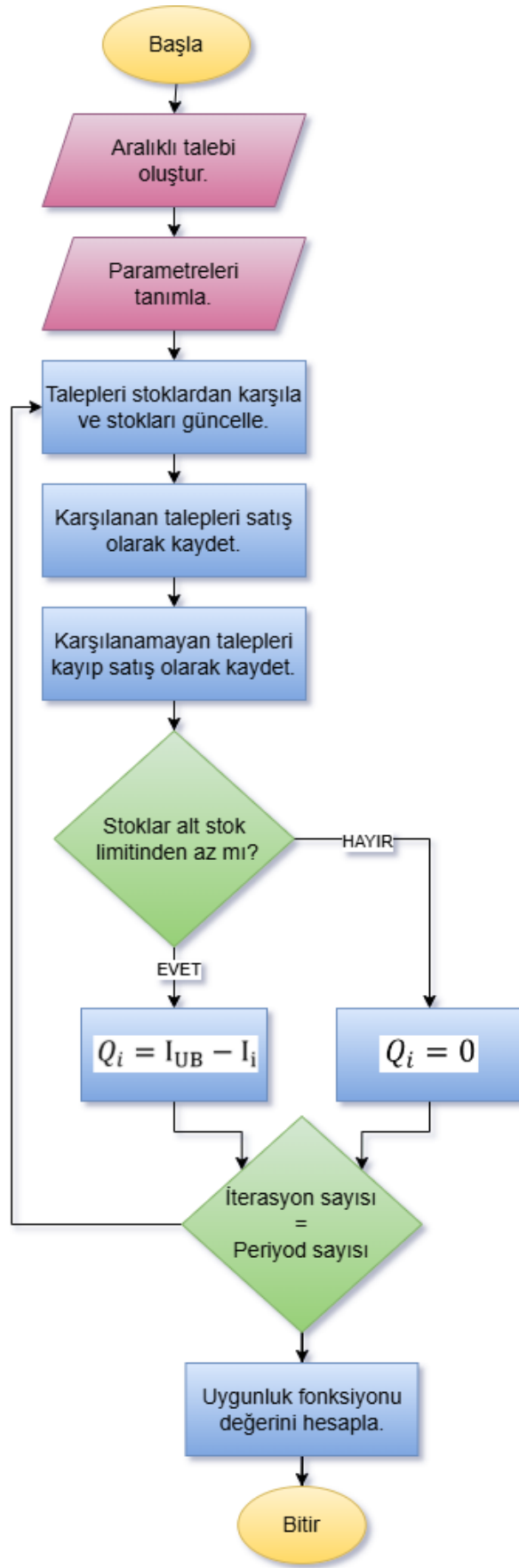
### Test Verisi ve Uygunluk Fonksiyonu

Matematiksel Model bölümünde açıklandığı gibi, önerilen matematiksel model, tolere edilebilir bir hesaplama süresinde probleme bir uygun çözüm sağlamamıştır. Bu nedenle, metasezgisel yöntemlerle problemi entegre edebilmek amacıyla bir uygunluk fonksiyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Uygunluk fonksiyonu, modelin büyük ölçekli aralıklı talep örnekleri için bir uygun çözüm sağlama amacıyla geliştirilmiştir. Metasezgisel yöntemler ile bulunan uygunluk fonksiyonunun çözümleri, matematiksel model için uygun çözümler verir. Şekil 9, metasezgisel yöntemler için ilk aşamada kullanılan önerilen uygunluk fonksiyonunu göstermektedir.

Uygunluk fonksiyonu için ilk aşamada kullanılan 7 adet test verisi Tablo 9'de verilmiştir. Aralıklı talep gereksinimlerini karşılamak için 7 farklı boyuttaki test verileri rastgele türetilmiştir. Ayrıca, test verilerinde talebin olmadığı dönemlerin dağılımı rassal olarak oluşturulmuştur. Test verilerinin talep boyutlarının farklı olması problem çözüm performansı ve süresini boyutlara göre karşılaştırabilmek amaçlıdır. İlgili test verileri Şekil 9'da önerilen uygunluk fonksiyonu ile birlikte genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılarak çalıştırılmıştır. Tablo 9'de test verilerine ait periyot sayıları ve her periyota ait sıfır talep sayıları verilmiştir.

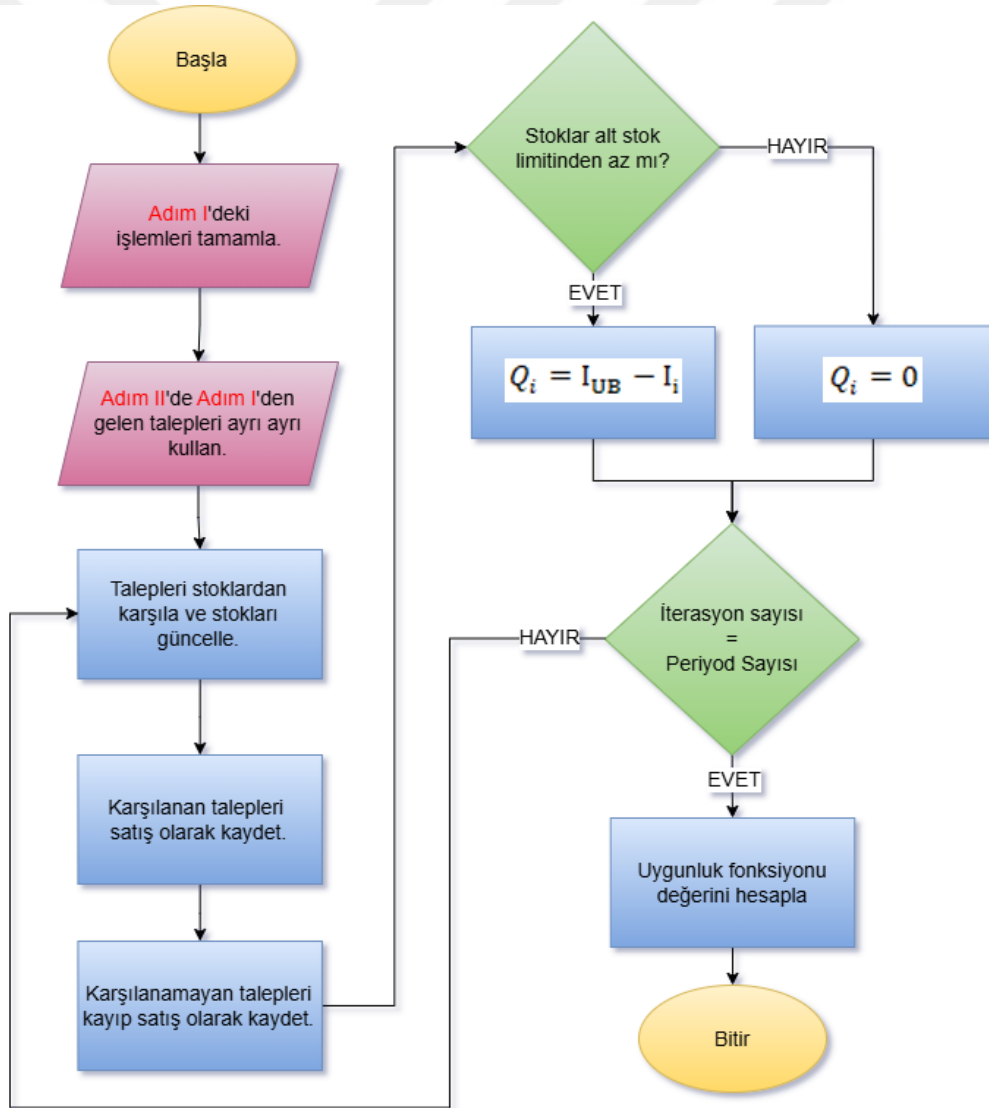
**Tablo 9.** Test Verilerine Ait ADI ve  $CV^2$  Değerleri

	Periyot Sayısı	Sıfır Talep Olan Periyot Sayısı	ADI	$CV^2$
Test1	250	67	1,3661	0,0893
Test2	1000	250	1,3333	0,3167
Test3	10000	2800	1,3889	0,3458
Test4	100000	26000	1,3514	0,4184
Test5	250000	80000	1,4706	0,4094
Test6	500000	128500	1,3459	0,1834
Test7	1000000	270000	1,3699	0,2398



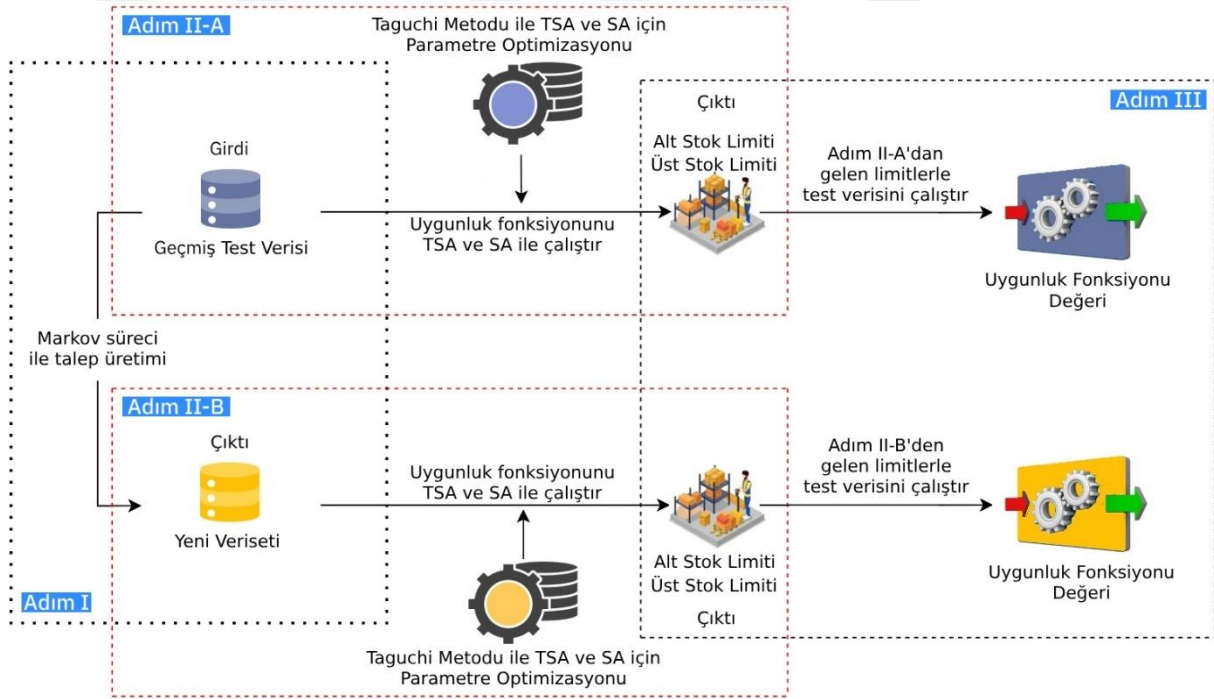
Şekil 9. Önerilen uygunluk fonksiyonu akış şeması.

Hem ilk aşama için hem de ikinci aşama (Markov süreci) için önerilen matematiksel modeli tam olarak karşılayan uygunluk fonksiyonları önerilmektedir. Uygunluk fonksiyonlarının çıktı değeri, matematiksel modelin amaç fonksiyonunun değerini ifade etmektedir. Uygunluk fonksiyonları, matematiksel modeldeki Eşitlik (4)'ü hesaplar. Bu fonksiyonlarda, matematiksel modeldeki siparişler, stoklar, kayıp satışlar ve satışlar gibi tüm süreçler aynıdır. Önerilen fonksiyonlar, girdi olarak yalnızca bir stok alt ve üst sınırına ihtiyaç duyar. Bu girdi, meta-sezgisel yöntemlerle optimize edilmiştir. İkinci aşamadaki Markov sürecinde çözüm, tabu arama algoritması (TSA) ve tavlama benzetimi (SA) kullanılarak aranmıştır. Markov süreci için oluşturulan uygunluk fonksiyonu akış şeması Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'da bahsedilen Adım I ve Adım II Şekil 11'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında sürece hem Markov yaklaşımı dahil olmuş hem de metasezgisel yöntemler için parametre optimizasyonu yapılmıştır.



Şekil 10. Markov süreci için önerilen uygunluk fonksiyonu akış şeması.

Şekil 11'de önerilen Markov tabanlı aralıklı talep envanter yönetimi yaklaşımının 3 adımı vardır. Bu yaklaşım, aralıklı talep vektörünün en iyi stok seviyelerini (stok üst sınırı ve stok alt sınırı) bulmayı amaçlar. Bu yaklaşımın en önemli katkısı, aralıklı talep envanter yönetiminde Markov süreci ve metasezgisel yöntemlerin yer almasıdır. Adım I'de, geçmiş dönemlerdeki aralıklı talep verileri bir Markov zinciri ile simüle edilir. Bu adımın amacı, uygunluk fonksiyonu değerinin gelecekteki taleplerdeki davranışını belirlemektir. Adım II-A'da, stok limitleri geçmiş dönem talepleriyle hesaplanır. Adım II-B'de, stok limitleri Markov ile simüle edilen yeni taleplerle hesaplanır. Bu hesaplamalar yapılırken, hem Adım II-A hem de Adım II-B için Taguchi yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Uygunluk fonksiyonu değeri, bir test verisinde Adım II'nin çıktıları olan stok limitleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu uygunluk fonksiyonu değerleri, Adım III'te, Markov yaklaşımından elde edilen sonuçlarla geçmiş dönemden elde edilen sonuçları karşılaştırma imkânı sağlar.



Şekil 11. Markov tabanlı aralıklı talep envanter yönetimi yaklaşımı.

Tablo 10, Markov yaklaşımında kullanılacak 4 test verisini, bu test verilerinin geçiş olasılıklarını ve sıfır olmayan talep kısımlarındaki taleplerin olasılık dağılımlarını göstermektedir. Aralıklı talep sınıfına ait olan bu veriler,  $1x$  (periyot sayısı) büyüklüğünde bir talep içermektedir. Tablo 10'da belirtildiği gibi, sıfır olmayan talepler normal dağılımlıdır. Aslında, bu çalışmanın temel varsayımlarından biri, sıfır olmayan taleplerin olasılıksal bir dağılımı ifade etmesidir. Şekil 8'de belirtildiği gibi, test verilerinin geçiş olasılıkları hesaplanmıştır. Bu olasılıklar ve normal dağılım parametreleri, test verilerinden stokastik talebi oluşturmada kullanılır.

**Tablo 10.** Markov Yaklaşımında Kullanılan Test Verilerinin Olasılık Dağılımları ve Geçiş Olasılıkları

Test Verisi	Periyot Sayısı	ADI	CV <sup>2</sup>	Olasılık Dağılımları		
1	250	1,3661	0,0893	NORM (30.8, 9.17)		
				<b>Geçiş Olasılıkları</b>		
				<b>0</b>	<b>1</b>	
				<b>0</b>	0,2727	0,7273
				<b>1</b>	0,2678	0,7322
2	10000	1,4665	0,0394	NORM (49.9, 9.91)		
				<b>Geçiş Olasılıkları</b>		
				<b>0</b>	<b>1</b>	
				<b>0</b>	0,3085	0,6915
				<b>1</b>	0,3226	0,6774
3	250000	1,5404	0,0312	NORM (48.3, 8.52)		
				<b>Geçiş Olasılıkları</b>		
				<b>0</b>	<b>1</b>	
				<b>0</b>	0,3506	0,6494
				<b>1</b>	0,3509	0,6491
4	500000	1,5645	0,0293	NORM (47.5, 8.13)		
				<b>Geçiş Olasılıkları</b>		
				<b>0</b>	<b>1</b>	
				<b>0</b>	0,3593	0,6407
				<b>1</b>	0,3617	0,6383

### Taguchi Metodu

Taguchi yöntemi, bir problemi veya süreci etkileyen faktörlerin etkilerini ölçmeye izin veren istatistiksel bir deneysel tasarım tekniğidir. Bu yöntemle, çok daha az deney yaparak tam faktöriyel deney sonuçlarına ulaşmak mümkündür. En iyi koşulları belirlemede yanıt değişkenini optimize etmek için üç S/N yaklaşımı vardır (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Bu yaklaşımlar Denklemler 22, 23 ve 24’te verilmiştir.

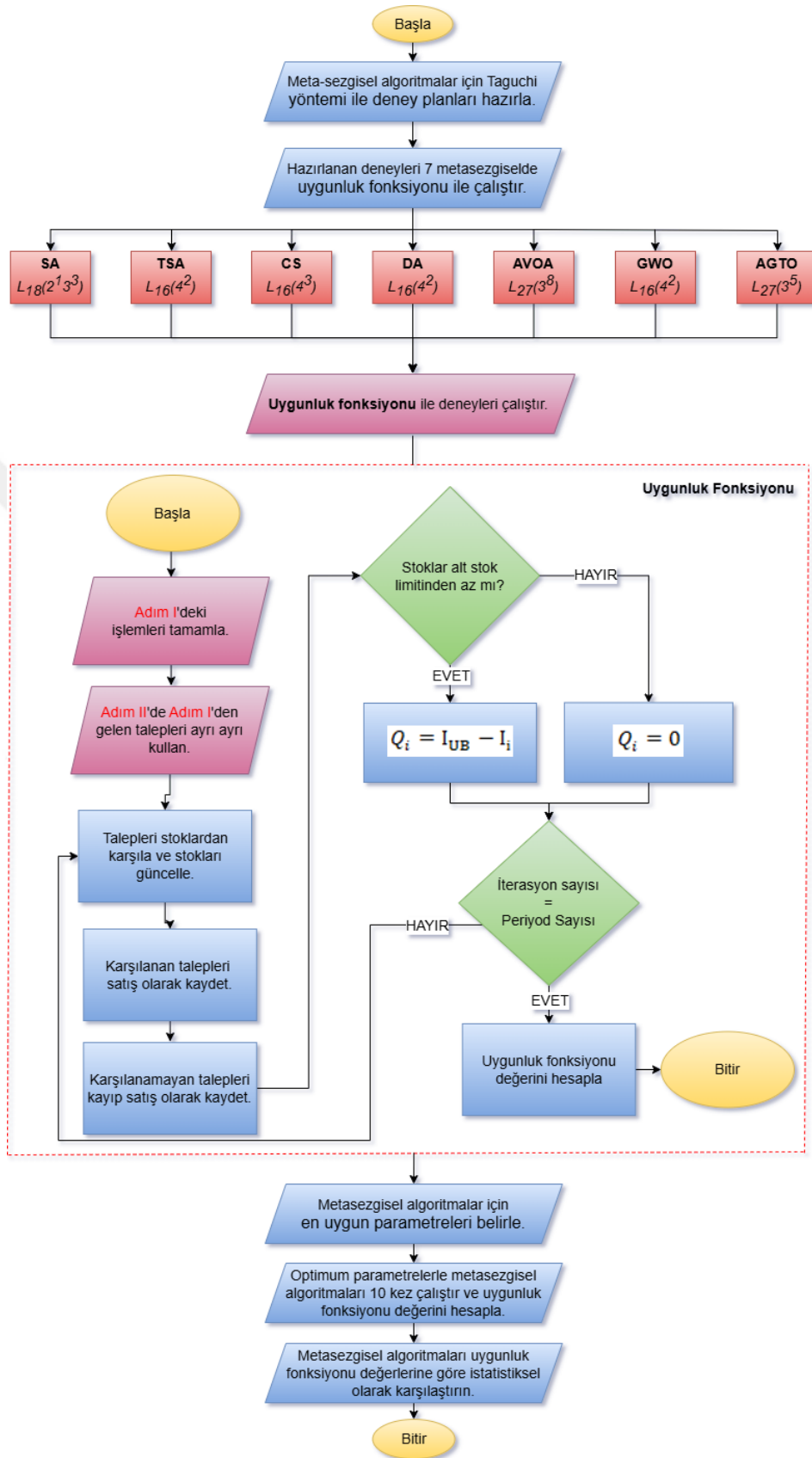
- Daha büyük-mutlak değer – daha iyi:  $S/N_T = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{S_y^2} \right)$  (22)

- Daha büyük-daha iyi:  $S/N_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$  (23)

- Daha küçük-daha iyi:  $S/N_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$  (24)

Bu çalışmada,  $\bar{y}$  uygunluk fonksiyonu değerlerinin ortalamasını,  $S_y^2$  uygunluk fonksiyonu değerlerinin varyansını, n deney sayısını ve  $y_i$  uygunluk fonksiyonu değerlerini ifade eder. Uygunluk fonksiyonunun amacı, toplam kârı maksimize eden alt ve üst stok limitini

bulmaktır. Bu nedenle, meta sezgiseller için yürütülen tüm deneylerde, "daha büyük daha iyi" yaklaşımı, yani  $S/N_L$  oranı tercih edilmiştir.



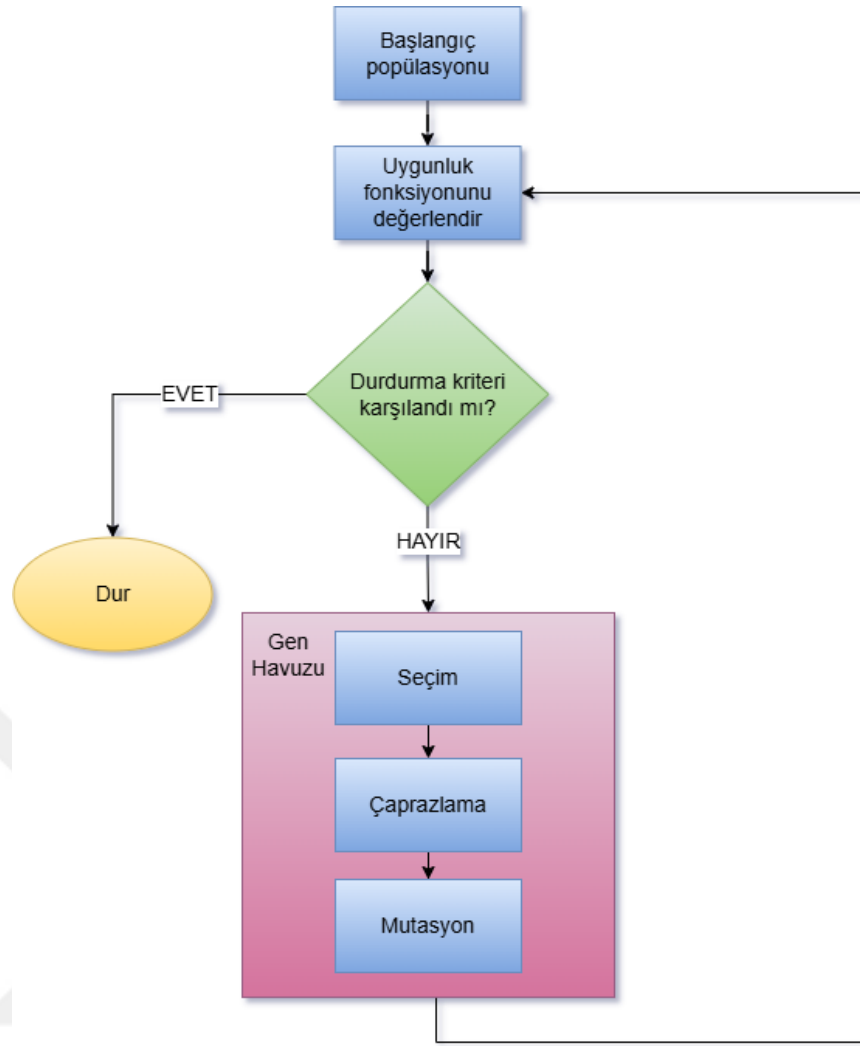
Şekil 12. Taguchi yöntemi ile metasezgisellerin parametre optimizasyonu.

Şekil 12’de çalışmanın üçüncü aşamasında metasezgisel yöntemleri istatistiksel olarak karşılaştırmak için bir yol haritası sunulmaktadır. Aralıklı taleplerin envanter kontrolü için 7 metasezgisel yöntem bu aşamada karşılaştırılmıştır. Öncelikle Taguchi yöntemi kullanılarak metasezgisel algoritmalar için deneysel planlar belirlenmiştir. Daha sonra bu deneyler uygunluk fonksiyonu ile çalıştırılmıştır. Uygunluk fonksiyonun akış şeması Şekil 12’de ‘Uygunluk Fonksiyonu’ başlığı altında verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda optimum parametreler Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. 7 metasezgisel algoritma belirlenen parametreler ile ayrı ayrı 10 kez çalıştırılmıştır. Daha sonra bu sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmadaki bütün uygunluk fonksiyonları için tek girdi alt ve üst stok limitidir. Bu fonksiyonlar bu iki limit değeri ve aralıklı talep verileri ile çalışarak bir kar hesaplar. Fakat bu fonksiyonlar kendi başına bir şey ifade etmez. Çünkü tek çıktısı kendisine verilen limitler dahilinde karı hesaplamaktır. Uygunluk fonksiyonları herhangi bir metasezgisel algoritma ile birleştirildiğinde anlam kazanır. Metasezgisel yöntemler başlangıçta amaç fonksiyonu için çeşitli alt ve üst sınırlar üretir. İteratif olarak çalışır ve her yinelemede daha iyi sınırlar bulmayı hedefler. Bu süreçlerde çözüm kalitesini etkileyen metasezgisellere ait parametreler vardır. Şekil 12’de görüldüğü gibi, uygunluk fonksiyonu değeri 7 metasezgisel yöntemle hesaplanmıştır. Ancak çözümlerde oluşacak rassallığı en aza indirmek ve her metasezgisel yöntemden maksimum verimi almak için parametre optimizasyonu Taguchi yöntemi ile yapılmıştır.

### **Genetik Algoritma**

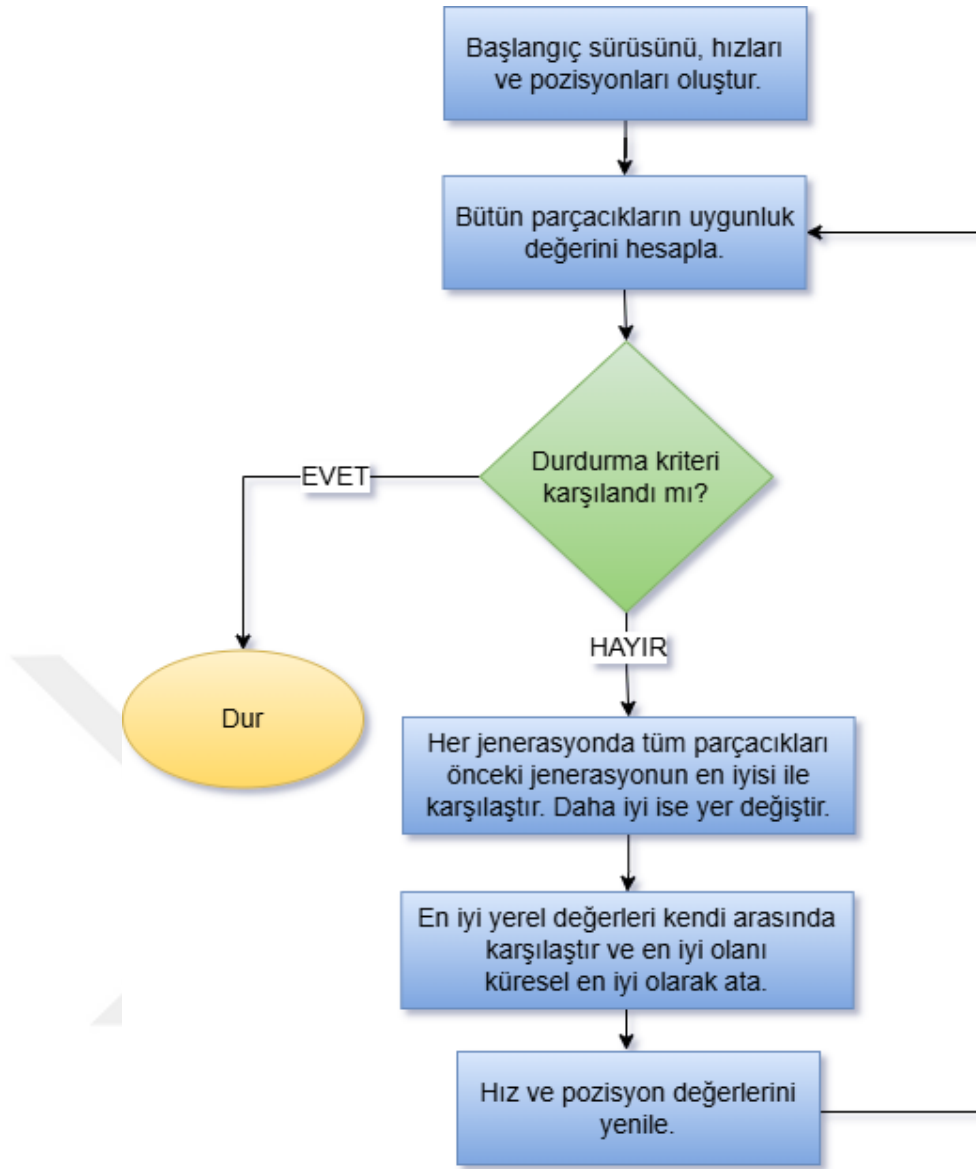
GA, popülasyon odaklı bir yaklaşımdır. Kalıtımı esas alan GA’nın amacı her jenerasyonda en iyi çözümü bulmaktır. GA optimizasyon problemleri için tasarlanmış ve ilk uygulayıcıları John Holland ve David Goldberg’tir (Goldberg, 1999). Bu yöntem, optimizasyon problemleri sınıfında yalnızca sınırlı sayıda alternatif uygulanabilir çözümün bulunduğu problemlerde sınırlı kaynaklarla hedefe ulaşmaya çalışır. GA’nın kullanıldığı problem türlerine üretim planlama ve çizelgeleme başta olmak üzere araç rotalama, gezgin satıcı, atama problemi örnek olarak verilebilir (Hoffman & Padberg, 2001). Genel olarak, arama uzayındaki popülasyondan olası çözümler olarak rassal bir çözüm seçilir. Seçilen bu çözüm başlangıç popülasyonudur. Başlangıç popülasyonu için uygunluk fonksiyonu değerleri çözümün kalitesini temsil eder. Çözümlerin kalitesini artırmak için üç temel adım izlenir (seçim, çaprazlama ve mutasyon). Bu adımlar iterasyon sayısı jenerasyon sayısına eşit olana kadar sürdürülür (Parasuraman & Elshorbagy, 2007). GA akış şeması Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. GA akış şeması (Jahandideh-Tehrani et al. 2021).

### Parçacık Sürü Optimizasyonu

PSO, sürüler halinde hareket eden canlıların incelenmesiyle geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir. Sürüler halinde hareket eden canlıların bu rastgele hareketlerinin, yiyecek arama veya tehlikeden kaçma gibi durumlarda hedeflerine ulaşmalarına katkıda bulunduğu görülmüştür. Sürekli birbirleri ile iletişim halinde olan sürüdeki bireyler parçacık adını almıştır. Parçacık adını alan bireyler konumunu her aşamada güncellerler. Konum güncelleme yaparken güncelleme yönü sürüde bulunan diğer parçacıklar arasındaki en iyi çözüme yani en iyi konuma sahip olan parçacık yönünde olmaktadır (Kennedy & Eberhart, 1995). PSO algoritmasının kullanıldığı ve iyi sonuçlar verdiği problem türlerine başta planlama problemleri olmak üzere tedarikçi seçimi, sipariş miktarı belirleme gibi optimizasyon problemleri örnek verilebilir (Wilke, 2007). PSO akış şeması Şekil 14’te verilmiştir.

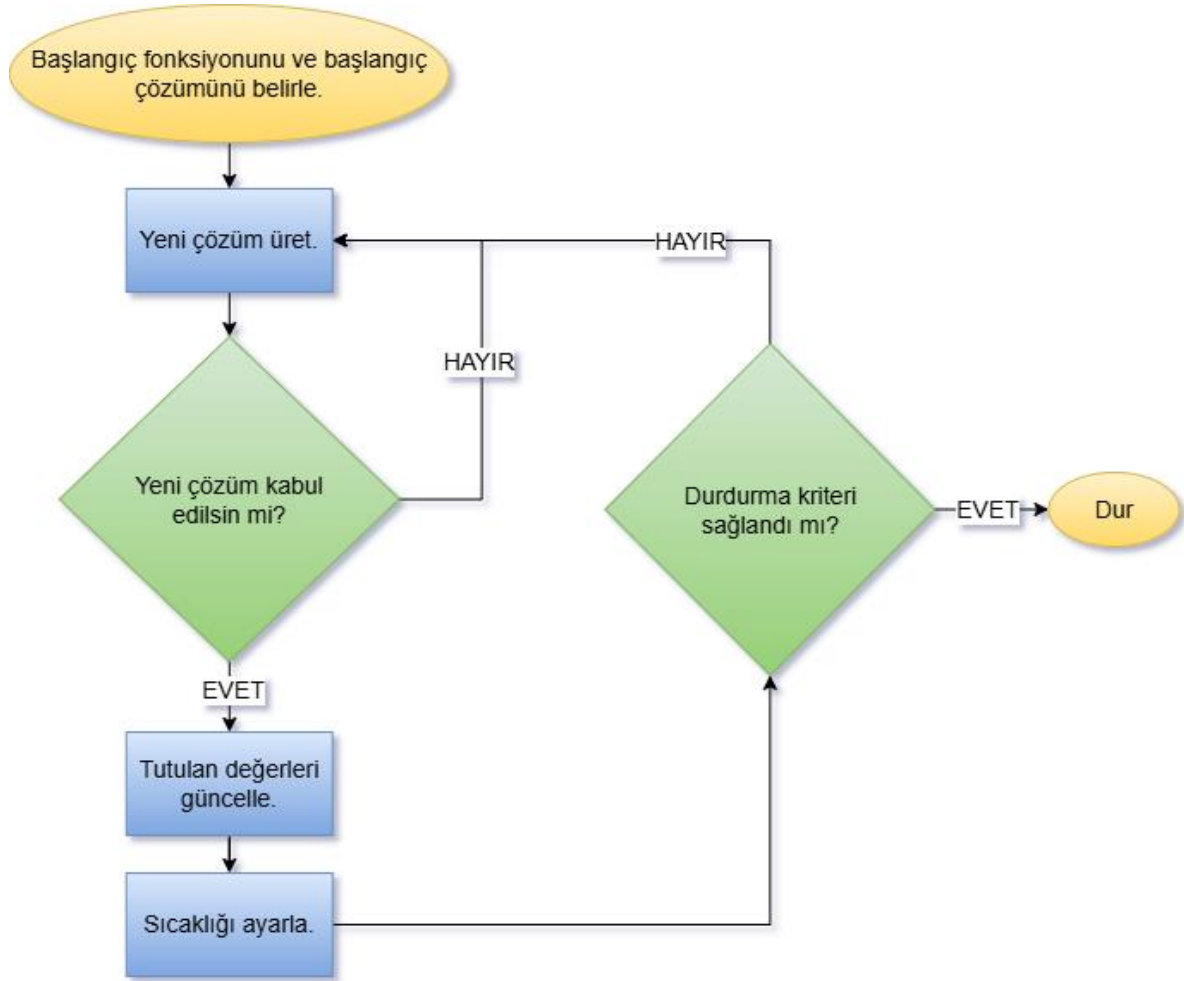


Şekil 14. PSO akış şeması (Jahandideh-Tehrani et al. 2021).

### Tavlama Benzetimi

Kirkpatrick *et al.* (1983) tarafından sunulan SA, metallerin tavllanması sırasında soğutma işlemine dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, metal işleme endüstrisinde kullanılan fiziksel bir işlem olan tavlamaya benzetilerek ortaya çıkmıştır. Yöntemin odak noktası, bir metali sıcaklığını kademeli olarak düşürerek soğutmaktır. Song *et al.* (2023) envanter maliyetlerini düşürmek ve aralıklı talep modellerinde verimliliği artırmak için bir envanter yönlendirme modeli oluşturmuştur. Bu modelde çözümlerin kabulü SA tarafından kontrol edilmiştir. Giacomelli *et al.* (2023) hem müşteri taleplerinin stokastik olduğu durumu hem de kayıp satışların olduğu bir ortamı dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur. Yeniden sipariş seviyesi ve sipariş miktarları SA ile hesaplanmıştır. Albayrak Ünal *et al.* (2023) envanter sınıflandırması alanında malzeme yönetimi uygulamalarında makine öğrenimi uygulamalarına ek olarak SA'nın da benimsendiğini belirtmiştir. Shaabani & Kamalabadi (2016) bozulabilir

ürünleri içeren bir envanter yönlendirme problemini (IRP) çözmek için matematiksel bir model sunmuşlardır. Popülasyona dayalı tavlama benzetimi (PBSA), SA ve GA yöntemleri ile kıyaslanmıştır. SA akış şeması Şekil 15’te verilmiştir.

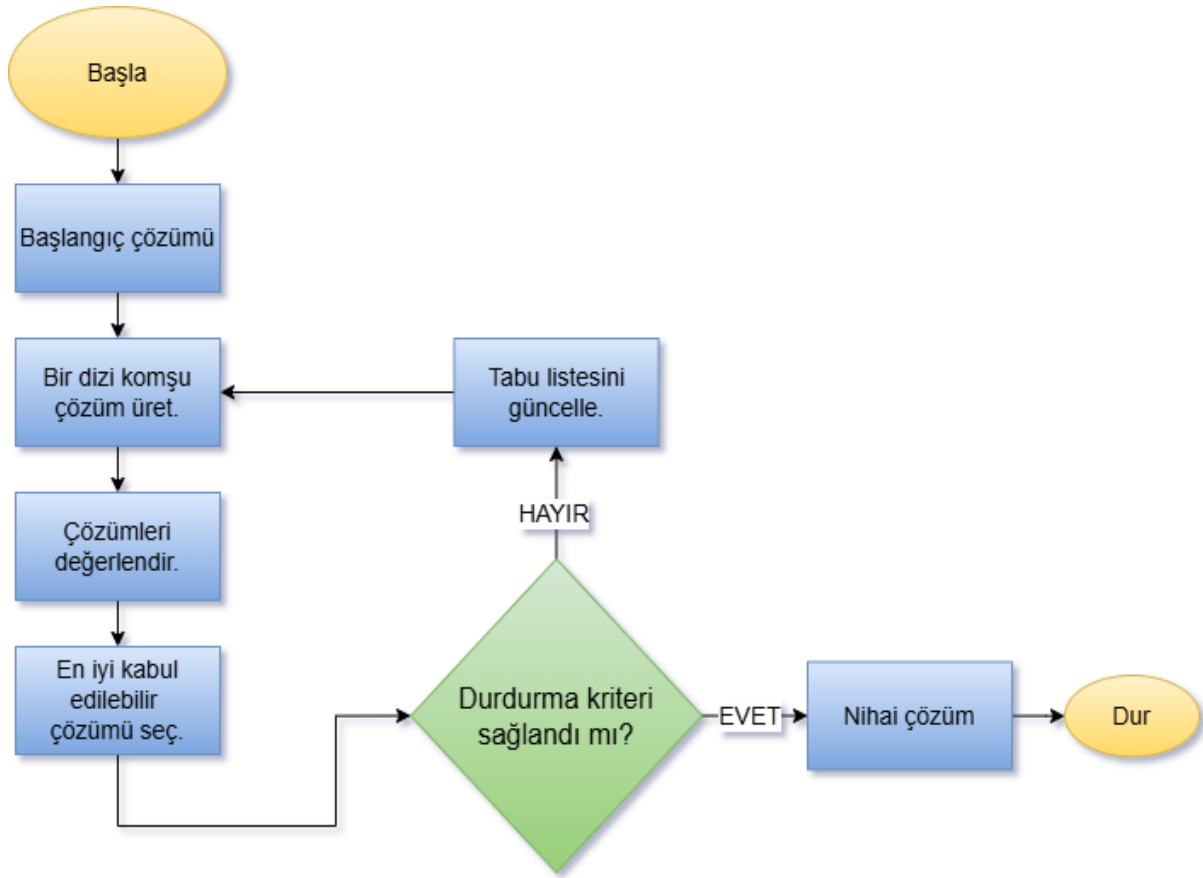


Şekil 15. SA akış şeması (Lian *et al.* 2019).

### Tabu Arama Algoritması

Glover (1989) ilk olarak TSA'yı 1986'da önerdi ve resmen 1989'da geliştirildi. TSA, Glover tarafından yerel optimum problemini aşmak için oluşturuldu. Bu algoritma, olası çözümleri tararken belirli kısıtlamalara uymak üzere tasarlanmıştır. Kombinatorial problemler için bir çözüm olarak önerilmiştir. Lee & Ozsen (2020) tarafından doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama çerçevesinde ağ tasarım modeli için TSA tabanlı bir çözüm önerisi sunulmuştur. Bu model, teslim süresi ve emniyet stoğu gibi faktörleri içerir. Archetti *et al.* (2021) TSA'dan elde edilen verileri kullanarak küçük ölçekli karma tamsayı doğrusal programlama problemlerini çözmek için metasezgisel bir yaklaşım benimsemiştir. Amaç, envanter tutma ve rota giderlerini içeren genel dağıtım maliyetini azaltmaktır. Diabat *et al.* (2016) TSA tabanlı bir yöntemle belirli bir zaman diliminde envanter ve rota kararlarını aynı

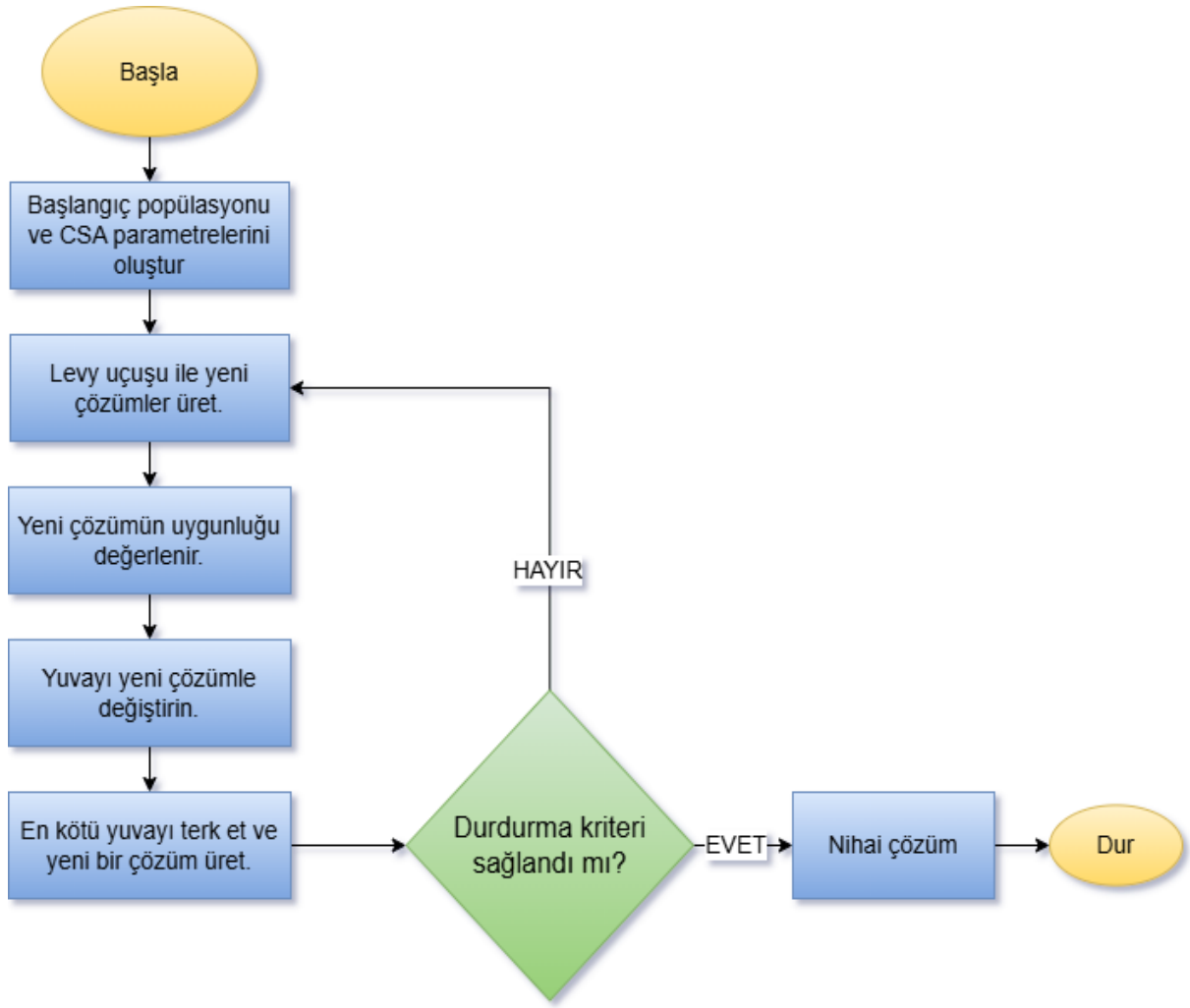
anda belirleyerek toplam taşıma maliyetini en aza indirmeyi amaçlamıştır. Envanter kontrol problemi gibi üretim ve sağlık senaryolarındaki çeşitli problemlerinde Yu *et al.* (2023) TSA'nın etkinliğini doğrulamıştır. TSA akış şeması Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. TSA akış şeması (Ali, 2016).

### Guguk Kuşu Arama Algoritması (CSA)

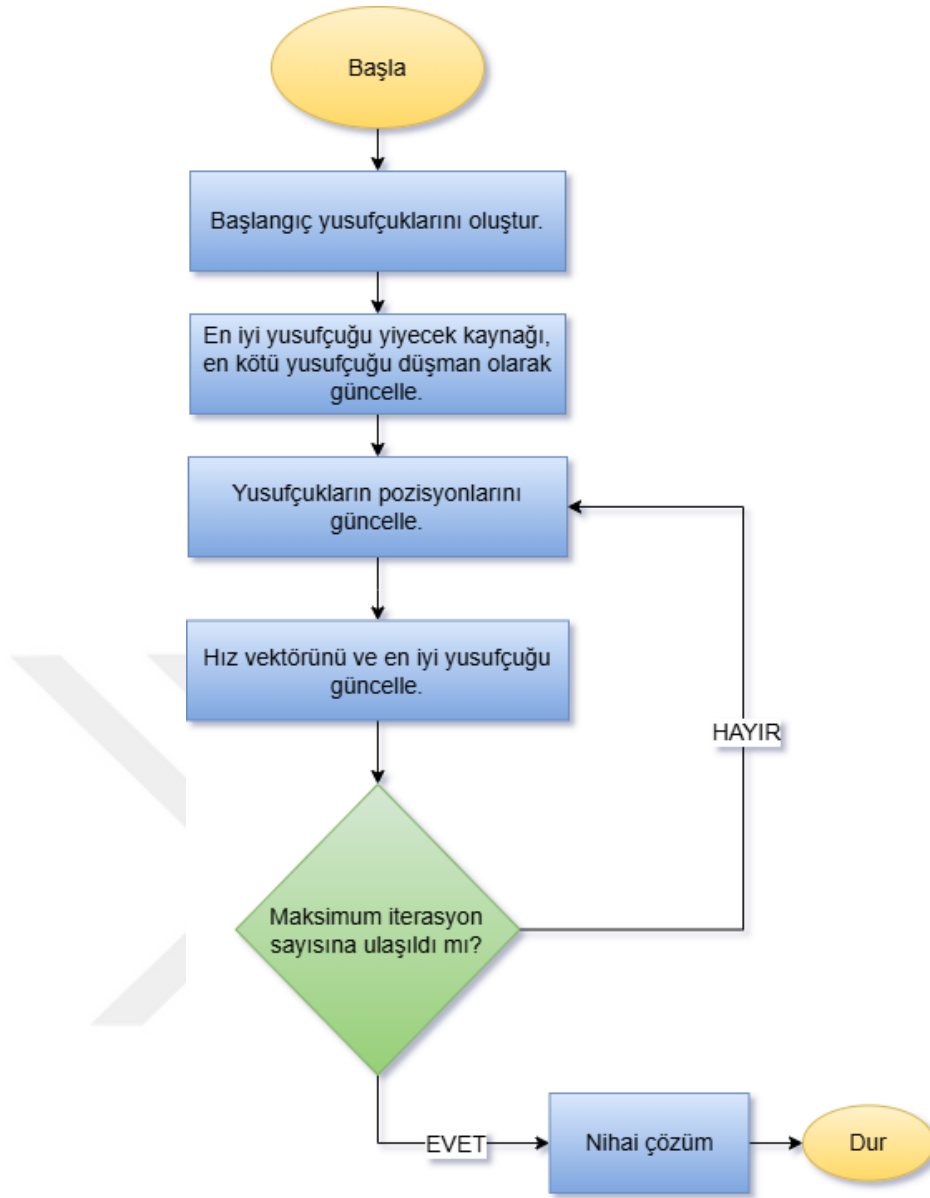
Bu yaklaşım, doğada bulunan guguk kuşlarının davranışlarından esinlenen bir optimizasyon yöntemidir. CSA, genellikle karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerini çözmek için Yang & Deb (2009) tarafından tanıtılmıştır. Algoritmanın odak noktası, guguk kuşlarının yuvalama davranışını taklit etmektir. Srivastav & Agrawal (2020) sipariş geçişli bir envanter problemini çözmek için çok amaçlı guguk kuşu arama (MOCS) algoritmasını kullandılar. Jamali *et al.* (2018) tedarik zinciri yönetimi ağ maliyetinin en aza indirilmesi için hibrit iyileştirilmiş guguk kuşu arama algoritması (ICS) ve GA kullanmıştır. Srivastav & Agrawal (2017) yavaş hareket eden bir envanter sisteminde yıllık stok tükenmeleriyle ilişkili maliyetleri en aza indirmek için MOCS algoritması önerdiler. CSA akış şeması Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. CSA akış şeması (Palanisamy & Rajaguru, 2024).

### Yusufçuk Algoritması (DA)

DA, doğadaki yusufçukların avlanma stratejilerini taklit ederek geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir. İlk olarak Mirjalili (2016) tarafından tanıtılmıştır. Bu algoritma, avlanma davranışından elde edilen özellikleri kullanarak çeşitli optimizasyon problemlerini çözmeyi amaçlamaktadır. Abedsoltan *et al.* (2023) çok seviyeli bir tedarik zincirinde araç rotalama problemini ve envanter optimizasyonunu ele alarak karma tamsayı doğrusal programlama modeli önermiştir. Bu modeli çözmek için çok amaçlı bir yusufçuk algoritması (MODA) sunulmuştur. İkili Yusufçuk Algoritması (BDA) ve GA yöntemleri, bozulabilir ürünler için stok bertarafı ve parti boyutlandırma problemini çözmek için Vahdani *et al.* (2022) tarafından önerilmiştir. DA akış şeması Şekil 18’de verilmiştir.

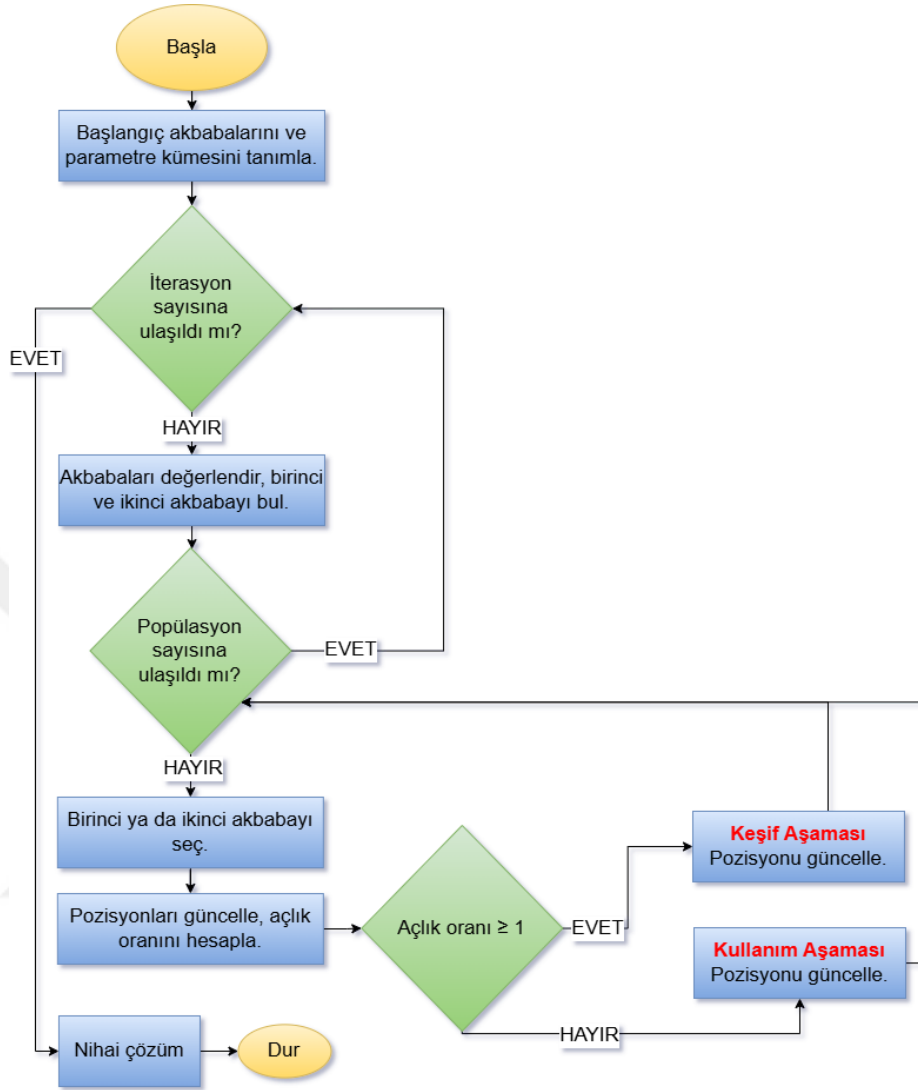


Şekil 18. DA akış şeması (Mirjalili, 2016).

### Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AVOA)

AVOA, belirli bir alanı tarayarak akbabaların doğada yiyecek arama davranışlarını taklit ederek geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir (Abdollahzadeh *et al.* 2021). Bu yöntemin odak noktası akbabaların yiyecek arama ve avlanma stratejileridir. Bu algorithmada akbabaların doğal avlanma ve iş birliği davranışları taklit edilir. Bahadoran Baghbadorani *et al.* (2022) tedarik zinciri süreçlerinde ikmal miktarını ve yeniden sipariş noktalarını optimize etmeye yardımcı olmak için çalışmalarına AVOA'yı dahil ettiler. Risma & Utama (2023) AVOA ve Karınca Aslanı Optimizasyonu'nun (ALO) sonuçlarını 3 farklı senaryoda enerji tüketimi açısından istatistiksel olarak karşılaştırdılar. Patil *et al.* (2023) depresyon durumunu sınıflandırırken Derin Maxout Ağı'nı eğitmek için Üstel Afrika Akbabası Optimizasyon Algoritması'nı

(ExpAVOA) önerdiler. ExpAVOA, Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama ve AVOA'nın bir karışımından oluşur. AVOA akış şeması Şekil 19'da verilmiştir.

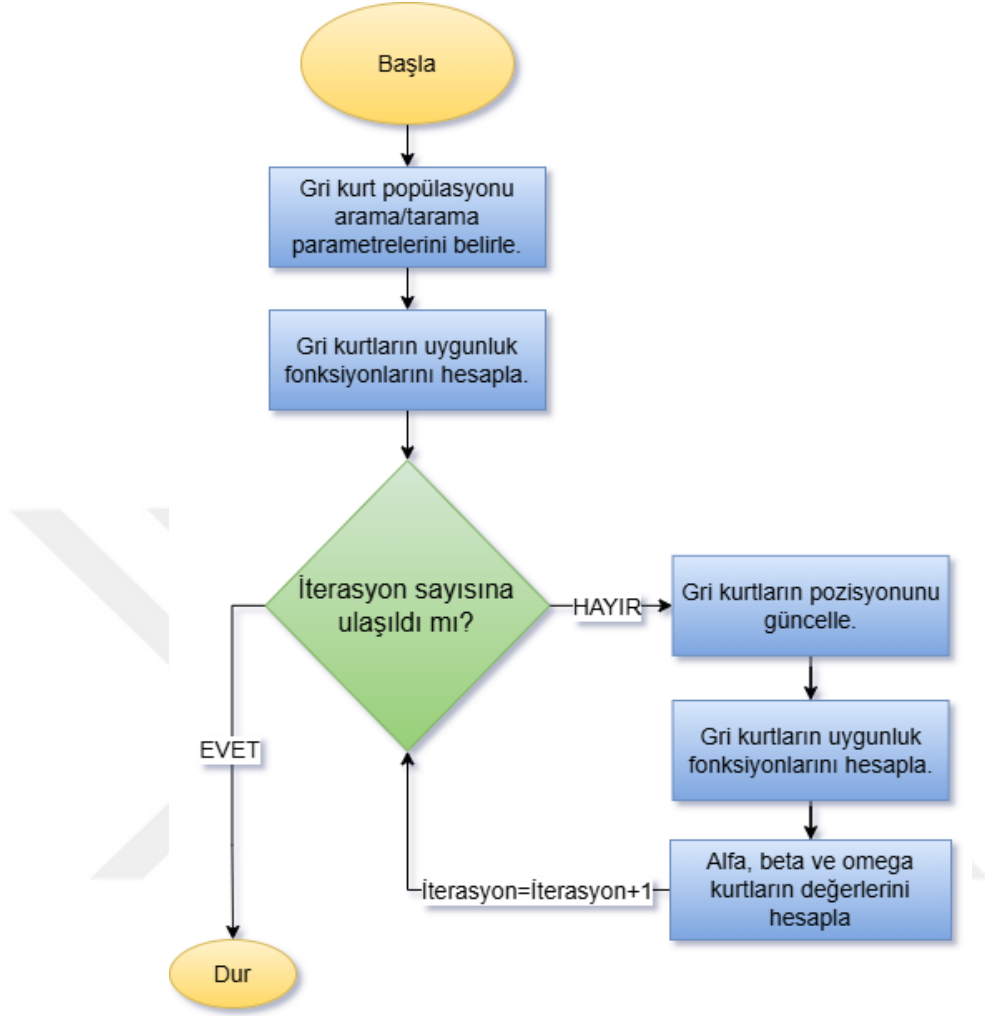


Şekil 19. AVOA akış şeması (Abdollahzadeh *et al.* (2021).

### Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)

GWO, kurt sürüsü davranışından esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma Mirjalili *et al.* (2014) tarafından önerilmiştir. Algoritmanın odak noktası, gri kurt sürülerinin hiyerarşik olarak çalışma yeteneğidir. Bu yeteneği taklit ederek optimum çözümü bulmak için çalışır. Stackelberg oyununda Ghasemi & Abolghasemian (2023) iki seviyeli bir programlama modeliyle en iyi ürün miktarını belirleyerek ulaşımı optimize etmek için GA ve GWO algoritmalarını karşılaştırmıştır. Dastani *et al.* (2022) yeşil kapalı devre tedarik zinciri için modellerinde ekonomik ve çevresel hedefleri optimize eden çok amaçlı gri kurt optimizasyonunu (MOGWO) uygulamıştır. Nozari *et al.* (2023) stokastik bir envanter yönetim modelinde depoda kargo tanımlama ve taşımayı sağlayan bir yaklaşım için GWO da dahil olmak üzere 5 metasezgisel ile ulaşım sektörü için bir çözüm aramıştır. Liu *et al.* (2021) destek

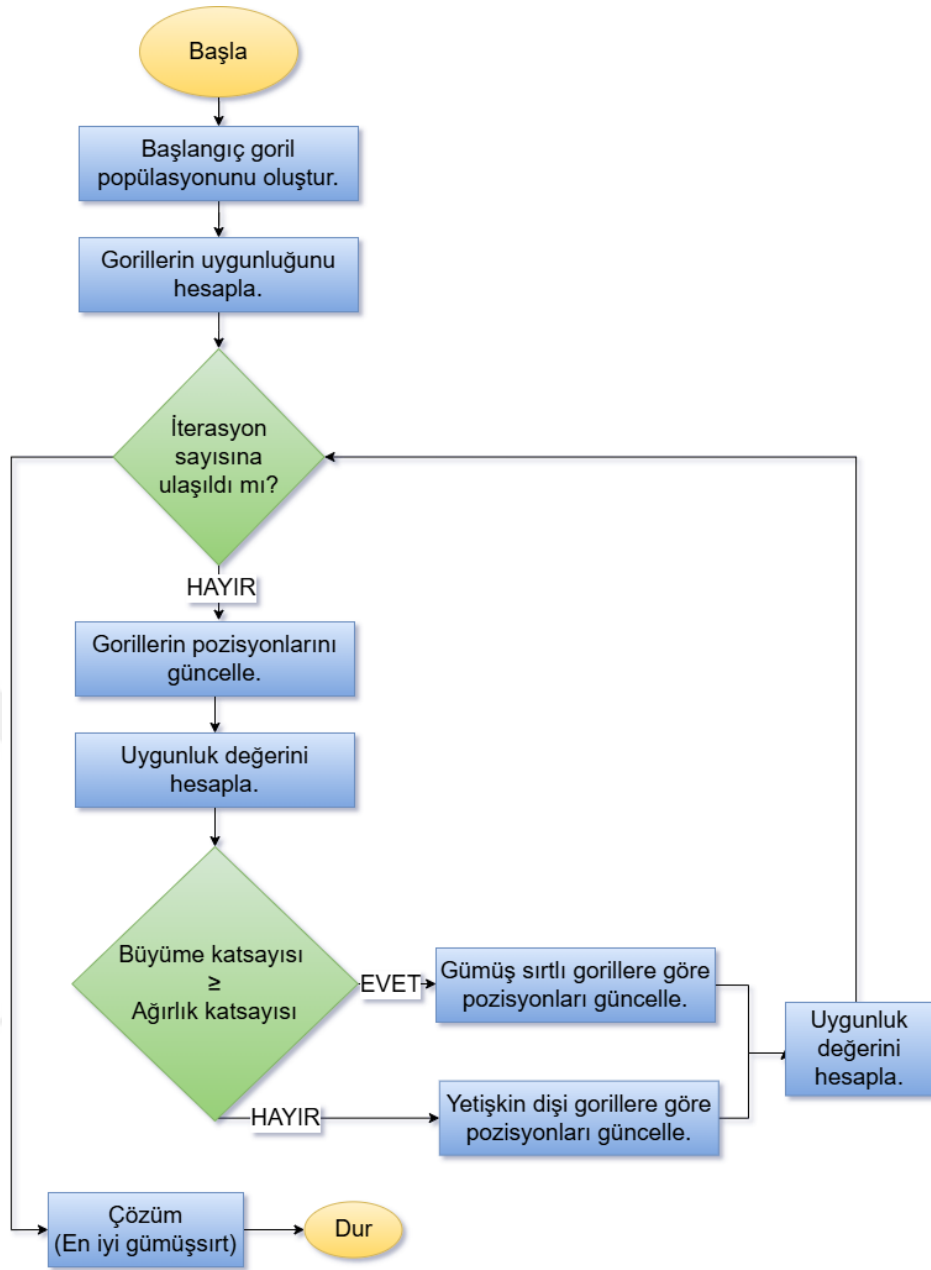
vektör makinesi ve GWO'yu hibritleştirerek bu yöntemin Amerikan ve Çin borsası verileri üzerindeki performansını test etmişlerdir. GWO akış şeması Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. GWO akış şeması (Mohammad Aghdam *et al.* 2021).

### Yapay Goril Birlikleri Optimizasyonu (AGTO)

AGTO, goril birliklerinin sosyal davranışlarından esinlenen bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. 2021 yılında Abdollahzadeh *et al.* (2021) tarafından tanıtılmıştır. Bu yöntem, popülasyona dayalı bir yaklaşım kullanarak optimizasyon sorunlarına çözümler arar. Albraikan *et al.* (2023) palmiye ağaçlarına zarar veren kırmızı palmiye böceğini tespit etmek için AGTO'yu içeren bir yöntem geliştirmiştir. Zhang *et al.* (2023) birden fazla insansız hava aracının koordineli bir şekilde birlikte çalışmalarını için uygun görevler atanmasına olanak tanıyan AGTO'nun geliştirilmiş bir versiyonunu önermiştir. Gürses *et al.* (2022) optimize edilmesi zor olan plakalı kanatlı ısı değiştiricilerinin maliyet optimizasyonu için AGTO'yu kullanmıştır. AGTO akış şeması Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 21. AGTO akış şeması (Abdollahzadeh *et al.* 2021).

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

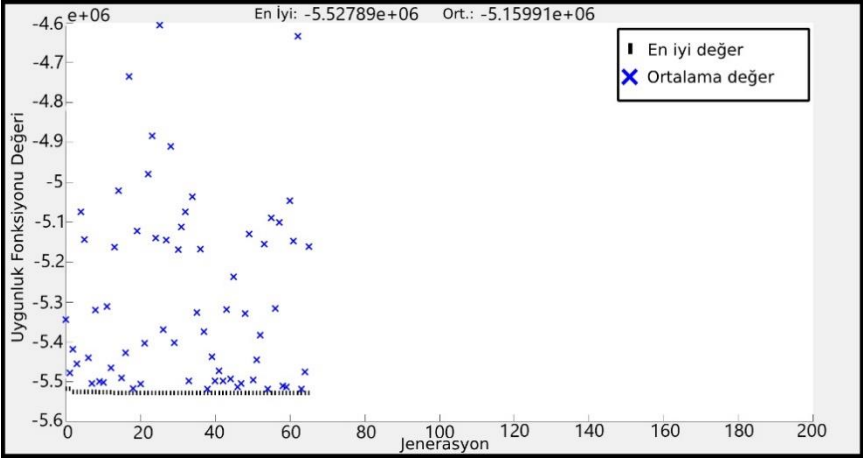
Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde önerilen yaklaşımların etkinliğini gösterebilmek amacıyla:

- Birinci aşamada, aralıklı talep stok seviye optimizasyonu matematiksel modeli için önerilen GA ve PSO yöntemleri çözüm süresi ve çözüm kalitesi açısından yedi test verisi ile karşılaştırılmıştır.
- İkinci aşamada bu çalışmaya Markov süreci dahil edilerek proaktif çözümler iyileştirilmiştir. Bu aşamada TSA ve SA yöntemlerine parametre optimizasyonu yapılarak Markov sürecinin etkinliği gösterilmiştir.
- Üçüncü aşamada ise parametre optimizasyonu yapılan yedi farklı metasezgisel yöntemin aralıklı talep stok seviye optimizasyonu üzerindeki performansı istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

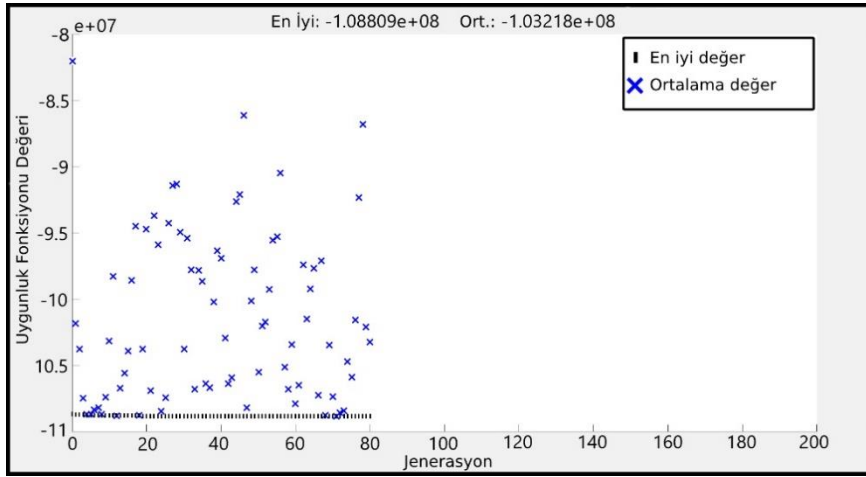
### Birinci Aşama Sonuçları

Şekil 9'da açıklanan uygunluk fonksiyonu GA ve PSO yöntemleri Tablo 9'daki yedi farklı veri kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu çalışmadaki metasezgiseller minimizasyon odaklı kullanıldığı için uygunluk fonksiyonunu minimize etmesi demek matematiksel model için amaç fonksiyonunu maksimize edecek şekilde çalışması demektir. GA ve PSO'ya ait çözümler Tablo 11 ve Tablo 12'de gösterilmiştir.

**Tablo 11.** GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (Yuna *et al.* 2023)

Çözüm Grafikleri	Sonuçlar
	<b>Talep Boyutu</b>
	250
	<b>Çözüm Süresi (sn.)</b>
	5.830240
	<b>Alt Stok Limiti</b>
	90
<b>Üst Stok Limiti</b>	
127	
<b>Uygunluk Fonksiyonu Değeri</b>	
5527890	

**Tablo 11.** GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı)



**Talep Boyutu**

1.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

6.649685

**Alt Stok Limiti**

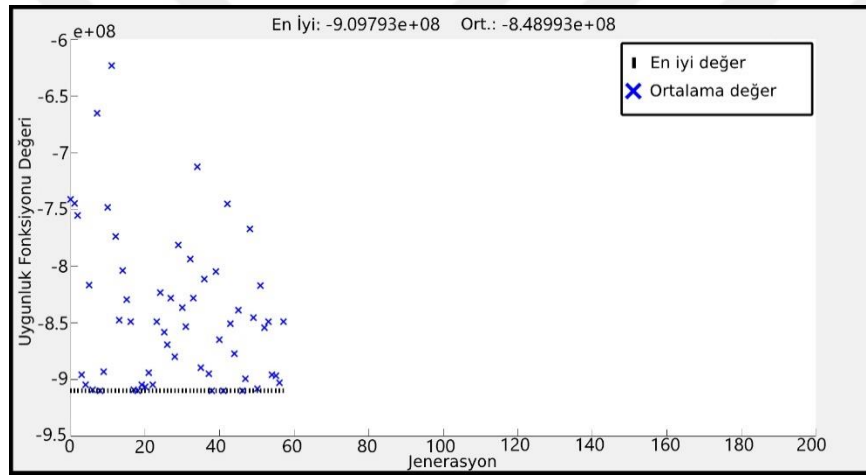
493

**Üst Stok Limiti**

506

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

1.0881e+08



**Talep Boyutu**

10.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

5.068134

**Alt Stok Limiti**

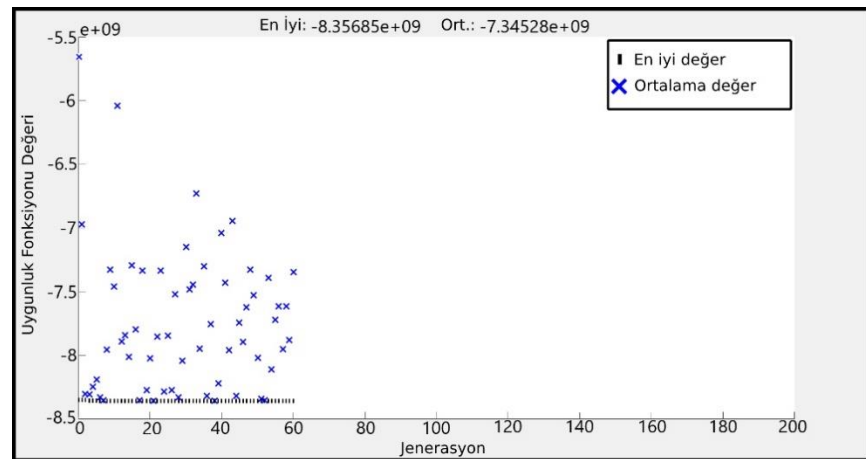
421

**Üst Stok Limiti**

497

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

9.0979e+08



**Talep Boyutu**

100.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

10.512826

**Alt Stok Limiti**

379

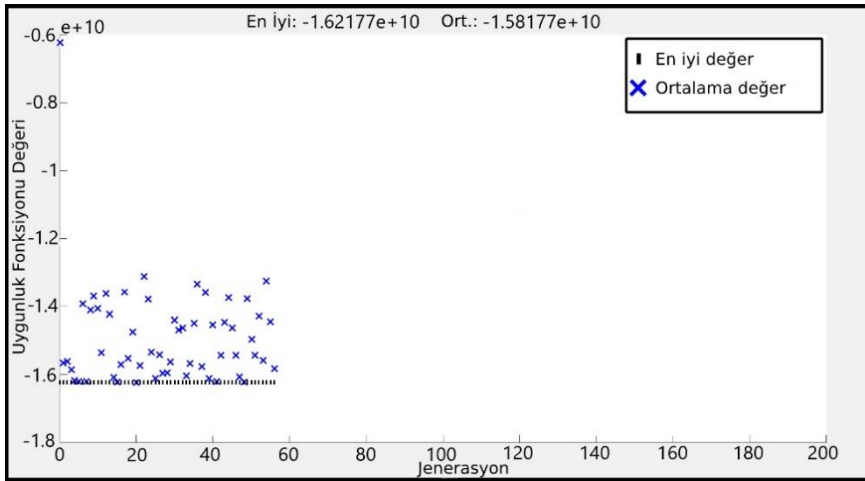
**Üst Stok Limiti**

410

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

8.3568e+09

**Tablo 11.** GA Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı)



**Talep Boyutu**

250.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

11.882883

**Alt Stok Limiti**

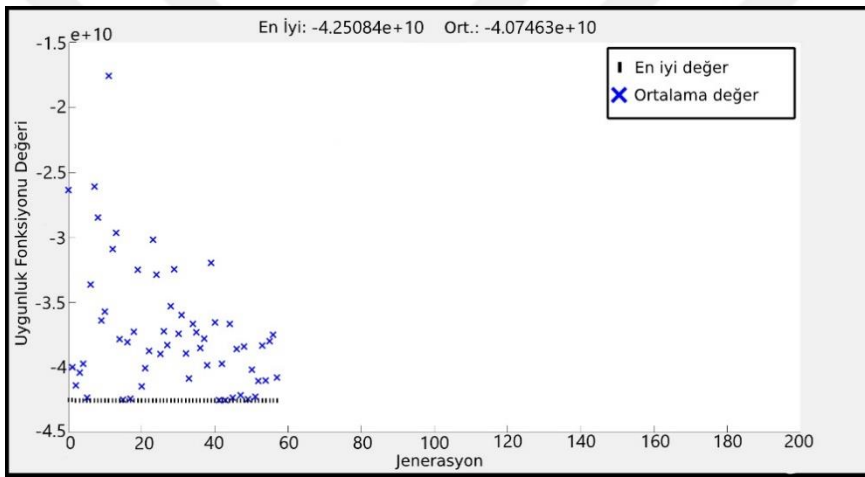
356

**Üst Stok Limiti**

384

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

1.6218e+10



**Talep Boyutu**

500.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

21.204450

**Alt Stok Limiti**

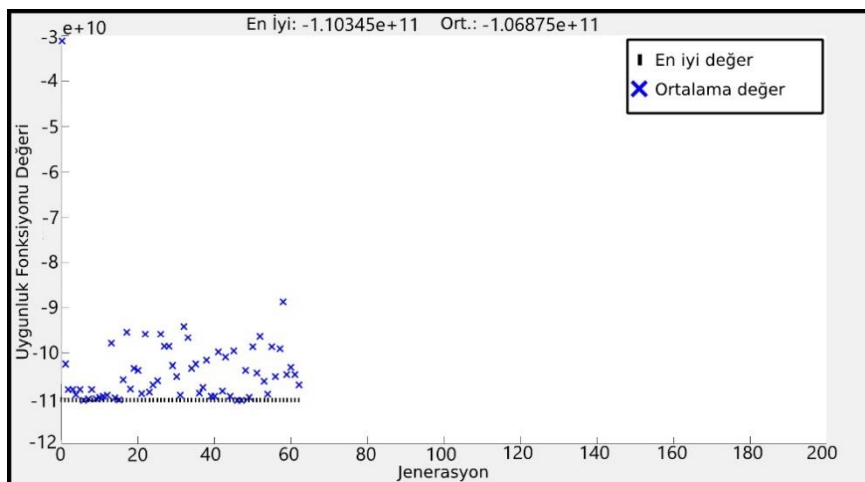
315

**Üst Stok Limiti**

340

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

4.2508e+10



**Talep Boyutu**

1.000.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

40.568979

**Alt Stok Limiti**

453

**Üst Stok Limiti**

514

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

1.1030e+11

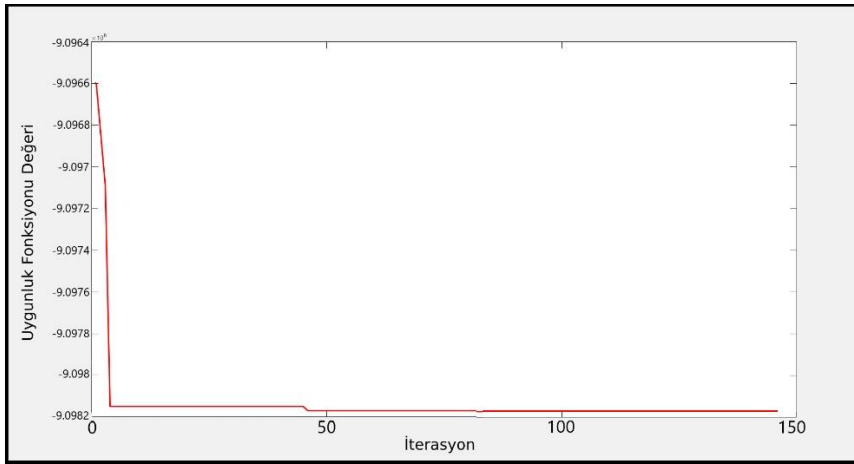
Tablo 11, GA için her test verisinin yakınsama grafiğini, alt-üst stok limitlerini, çözüm sürelerini ve uygunluk fonksiyonu değerleriyle birlikte talep boyutlarını gösterir. Tablo 11'de görülen grafiklerin sağ üst köşesinde ortalama değer ve en iyi değerlerin nasıl işaretlendiği

paylaşılmıştır. GA için jenerasyon sayısı 200 olarak seçilmiştir. Ancak, iteratif çözümler arasındaki fark çok küçük olduğu için algoritma 200 jenerasyona ulaşmadan durdurma kriteri ile sonlandırılmıştır.

**Tablo 12.** PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (Yuna *et al.* 2023)

Yakınsama Grafikleri	Sonuçlar
	<b>Talep Boyutu</b>
	250
	<b>Çözüm Süresi (sn.)</b>
	3.915150
	<b>Alt Stok Limiti</b>
	77
	<b>Üst Stok Limiti</b>
	172
	<b>Uygunluk Fonksiyonu Değeri</b>
	5634100
	<b>Talep Boyutu</b>
	1.000
	<b>Çözüm Süresi (sn.)</b>
	6.734603
	<b>Alt Stok Limiti</b>
	513
	<b>Üst Stok Limiti</b>
	516
	<b>Uygunluk Fonksiyonu Değeri</b>
	1.1017e+08

**Tablo 12. PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı)**



**Talep Boyutu**

10.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

48.149890

**Alt Stok Limiti**

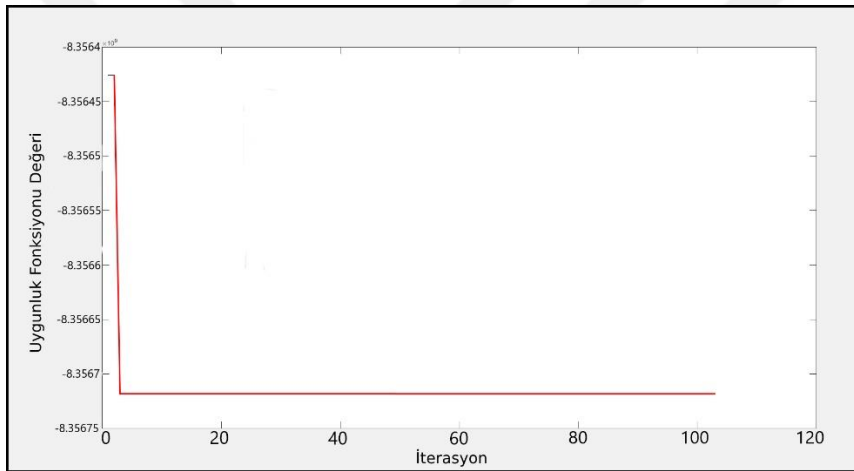
434

**Üst Stok Limiti**

454

**Uygunluk  
Fonksiyonu Değeri**

9.2011e+08



**Talep Boyutu**

100.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

393.063379

**Alt Stok Limiti**

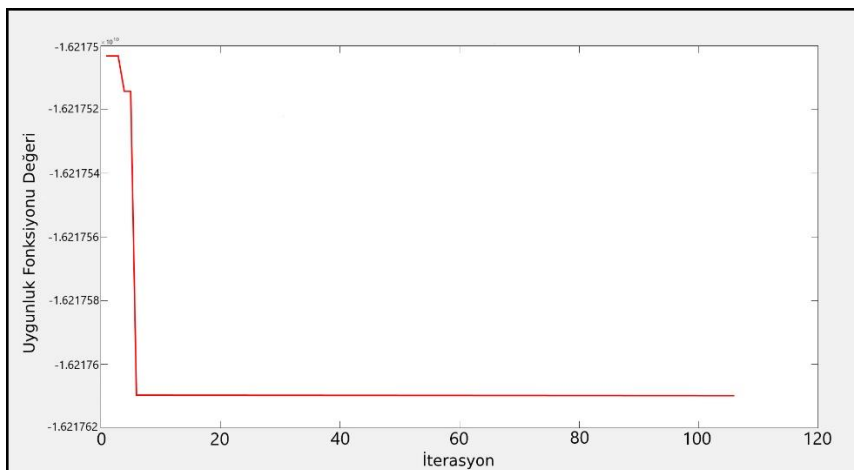
397

**Üst Stok Limiti**

400

**Uygunluk  
Fonksiyonu Değeri**

8.4499e+09



**Talep Boyutu**

250.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

1390.525174

**Alt Stok Limiti**

355

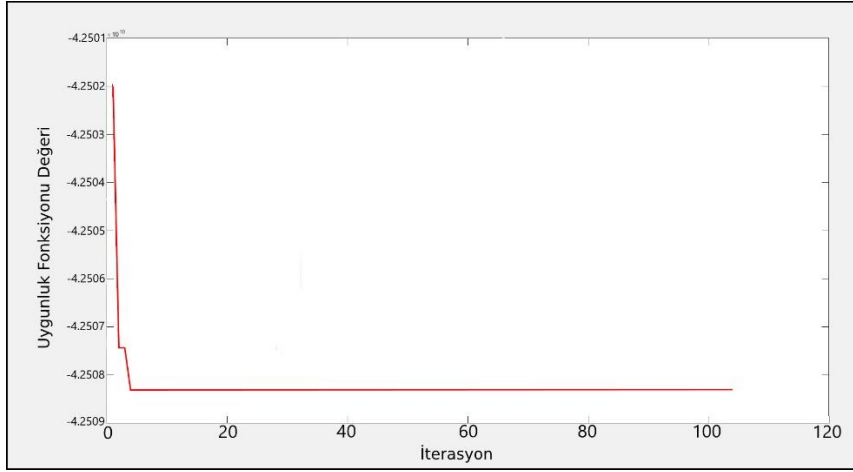
**Üst Stok Limiti**

382

**Uygunluk  
Fonksiyonu Değeri**

1.6403e+10

**Tablo 12. PSO Yakınsama Grafikleri ve Sonuçları (devamı)**



**Talep Boyutu**

500.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

2030.897363

**Alt Stok Limiti**

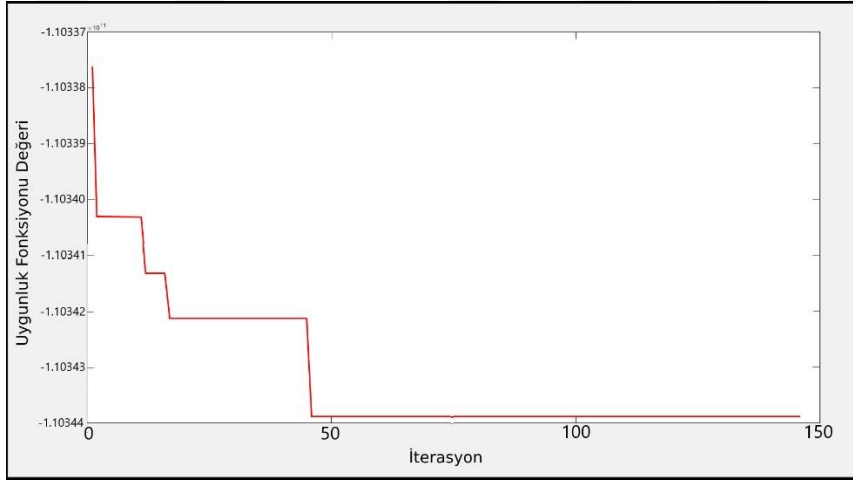
322

**Üst Stok Limiti**

341

**Fitness Function Value**

4.2976e+10



**Talep Boyutu**

1.000.000

**Çözüm Süresi (sn.)**

5259.078420

**Alt Stok Limiti**

508

**Üst Stok Limiti**

512

**Uygunluk Fonksiyonu Değeri**

1.1157e+11

Tablo 12, PSO için her test verisinin yakınsama grafiğini, alt-üst stok limitlerini, çözüm sürelerini ve uygunluk fonksiyonu değerleriyle birlikte talep boyutlarını gösterir. Tablo 12'deki grafikler PSO algoritmasının iteratif olarak uygunluk fonksiyonu değerine nasıl yakınsadığını göstermektedir. PSO algoritması için iterasyon sayısı 200 olarak seçilmiştir. Ancak, iteratif çözümler arasındaki fark çok küçük olduğu için algoritma 200 iterasyona ulaşmadan durdurma kriteri ile sonlandırılmıştır.

İşletmeler envanterlerini doğru yönetemediği zaman birtakım problemler yaşayabilirler. Bu problemlerden en önemlisi kıtlık maliyetleridir. Bu maliyetlerin gerçek hayatta belirlenmesi zor olduğu için hizmet seviyesi ölçümlerine ihtiyaç duyulur. Çalışmanın birinci bölümünde bu ölçüm yöntemlerinden pratikte en sık kullanılan doluluk oranı yaklaşımı kullanılmıştır. Doluluk oranı, gerçekleşen talebin ne kadarlık bölümünün karşılandığı ile ilgilidir (Axsäter, 2015).

Çalışmanın birinci aşamasında da doluluk oranları PSO ve GA çözümleri için ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 13'te gösterilmiştir.

**Tablo 13.** Aralıklı Talep Boyutlarına Göre Doluluk Oranları (Yuna *et al.* 2023)

Talep Boyutu	Doluluk Oranı	
	PSO	GA
250	0.9960	0.9960
1000	1	0.9990
10000	0.9999	0.9999
100000	1	1
250000	1	1
500000	1	1
1000000	1	1

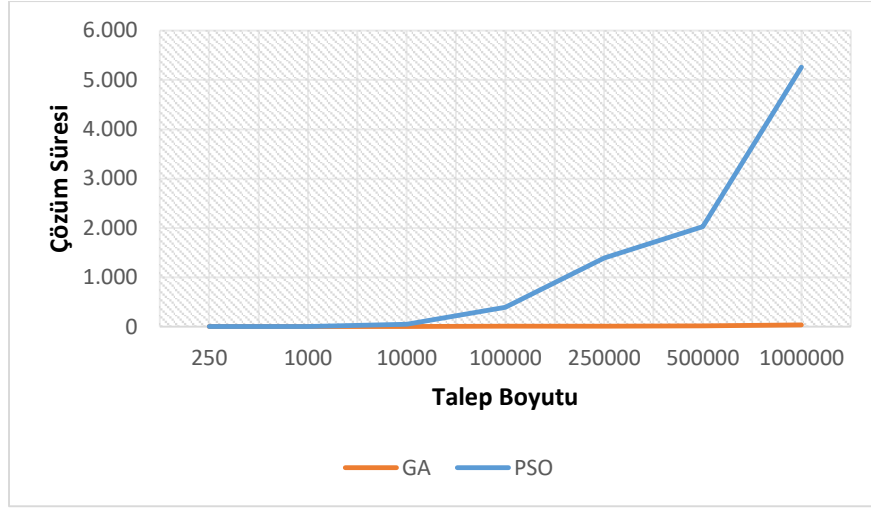
Doluluk oranı, envanter sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Doluluk oranı 1'e ne kadar yakınsa müşteri talepleri o oranda karşılanmış demektir. Bu oran 1'e ne kadar yakınsa ürüne ulaşmak o kadar kolaydır.

Sonuçları daha iyi yorumlamak ve anlamak için, GA ve PSO'ya ait karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 14'te sunulmuştur. GA ve PSO arasındaki en iyi değerler kalın olarak belirtilmiştir.

**Tablo 14.** GA ve PSO Karşılaştırmalı Sonuçları (Yuna *et al.* 2023)

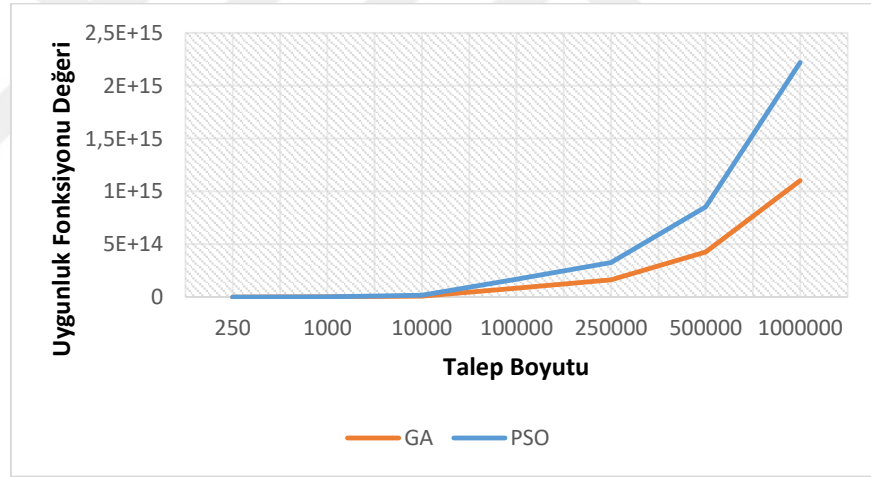
Talep Boyutu	Çözüm Süresi		Uygunluk Fonksiyonu Değeri		Alt Stok Limiti		Üst Stok Limiti	
	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO
250	5.83	<b>3.92</b>	5527890	<b>5634100</b>	90	77	127	172
1000	<b>6.65</b>	6.73	1.0881e+08	<b>1.1017e+08</b>	493	513	506	513
10000	<b>5.07</b>	48.15	9.0979e+08	<b>9.2011e+08</b>	421	434	497	454
100000	<b>10.51</b>	393.06	8.3568e+09	<b>8.4499e+09</b>	379	397	410	400
250000	<b>11.88</b>	1390.53	1.6218e+10	<b>1.6403e+10</b>	356	355	384	382
500000	<b>21.20</b>	2030.90	4.2508e+10	<b>4.2976e+10</b>	315	322	340	341
1000000	<b>40.57</b>	5259.08	1.1030e+11	<b>1.1157e+11</b>	453	508	514	512

Tablo 14'te görüldüğü gibi, GA'nın çözüm süreleri PSO'nun çözüm sürelerinden daha düşüktür. Fakat PSO'nun çözümleri GA'dan daha iyidir.



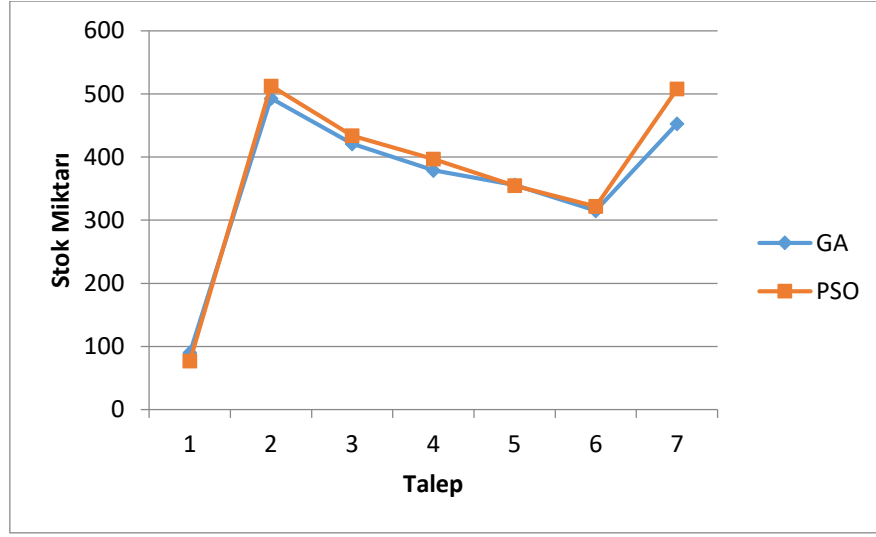
**Şekil 22.** GA ve PSO'nun çözüm süreleri arasındaki farklar (Yuna *et al.* 2023).

Şekil 22, çözüm süresi açısından GA'nın PSO'ya göre üstünlüğünü açıkça göstermektedir. PSO algoritmasına ait çözümlerde talep boyutu ile çözüm süresi arasında bir doğru orantı vardır. Boyut artışı çözüm süresini de artırır. Ancak bu durum, GA için geçerli değildir.



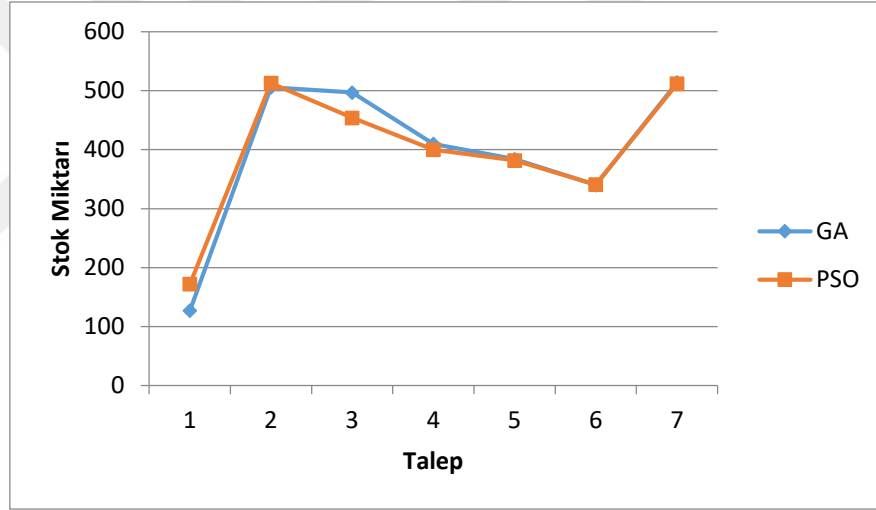
**Şekil 23.** GA ve PSO'nun uygunluk fonksiyonu değerleri arasındaki farklar (Yuna *et al.* 2023).

Şekil 23, GA ve PSO'nun uygunluk fonksiyonlarının değerleri arasındaki farkı göstermektedir. Hem GA hem de PSO algoritmasının uygunluk fonksiyonu değerleri talep boyutuyla doğru orantılı şekilde artmıştır. Fakat PSO algoritmasına ait uygunluk fonksiyonu değerleri GA'nın bulduğu değerler daha iyidir.



**Şekil 24.** GA ve PSO'nun alt stok limitleri (Yuna *et al.* 2023).

Şekil 24, GA ve PSO çözümlerindeki alt stok sınırlarını göstermektedir. Şekil 24 incelendiğinde GA'nın daha düşük alt sınırlar ürettiği görülmektedir.



**Şekil 25.** GA ve PSO'nun üst stok limitleri (Yuna *et al.* 2023).

Şekil 25, GA ve PSO çözümlerindeki üst stok sınırlarını göstermektedir. Şekil 25 incelendiğinde, büyük talep boyutlarında her iki algoritmanın da birbirine yakın üst sınırları olduğu görülmektedir.

## İkinci Aşama Sonuçları

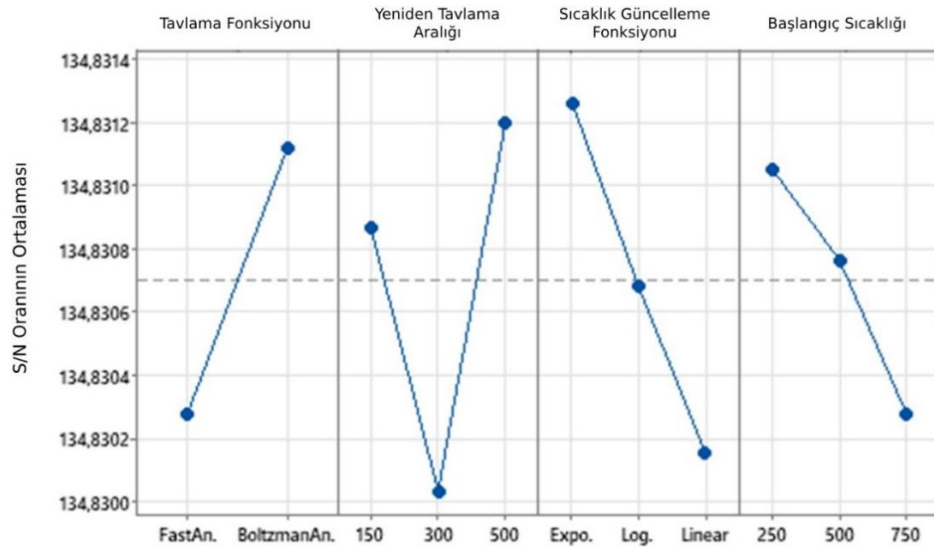
TSA ve SA ile Şekil 10'da önerilen uygunluk fonksiyonunun değerini en iyi şekilde hesaplamak amacıyla Taguchi yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu aşamada sürece Markov yaklaşımı dahil edilmiştir. Bu aşamada kullanılan veriler Tablo 10'da verilmiştir. SA için hazırlanan deneysel tasarım Tablo 15'te, TSA için hazırlanan deneysel tasarım ise Tablo 16'da gösterilmiştir. Deneysel tasarımların sonuçlarına göre en uygun

parametreler belirlenirken en büyük-en iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Çünkü çalışmanın odak noktası kar maksimizasyonudur. Bu çalışmanın amacına bağlı olarak sinyal-gürültü oranları arasında en büyük-en iyi yaklaşımı benimsenmiştir.

Tablo 15'te görüldüğü gibi SA'nın en uygun parametrelerini belirlemek için  $L_{18}(2^13^3)$  ortogonal deney tasarım planı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan  $L_{18}(2^13^3)$  ortogonal deney tasarım planı ve aynı koşullar altında çalıştırılan üç farklı tekrar sonucunda elde edilen uygunluk fonksiyonunun Taguchi deney sonuçları Tablo 15'te verilmiştir.

**Tablo 15.** SA için Taguchi Deney Tasarımı ve Deneysel Veriler

Deneysel	Tavlama Fonksiyonu	Parametreler		Uygunluk Fonksiyonu Değeri			
		Yeniden Tavlama Aralığı	Sıcaklık Güncelleme Fonksiyonu	Başlangıç Sıcaklığı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	Hızlı Tavlama	150	Üstel	250	5515226,8	5515084,8	5515377,9
2		150	Logaritmik	500	5514622,8	5513662,6	5515062,4
3		150	Lineer	750	5515212,4	5515225,9	5513250,4
4		300	Üstel	250	5514865,8	5515100,2	5515302,8
5		300	Logaritmik	500	5513766,5	5514432,3	5514653,8
6		300	Lineer	750	5515251,3	5506226,0	5515254,7
7		500	Üstel	500	5515213,6	5515278,8	5515390,6
8		500	Logaritmik	750	5515124,4	5514972,2	5515270,2
9		500	Lineer	250	5515275,1	5515218,3	5514865,1
10	Boltzman Tavlama	150	Üstel	750	5515390,6	5515278,8	5515302,7
11		150	Logaritmik	250	5515179,6	5515215,7	5514770,6
12		150	Lineer	500	5515094,2	5515301,5	5515215,6
13		300	Üstel	500	5515226,8	5515226,8	5514865,7
14		300	Logaritmik	750	5515092,9	5515209,2	5514849,5
15		300	Lineer	250	5515291,3	5514175,7	5515204,3
16		500	Üstel	750	5515390,5	5515213,6	5515277,0
17		500	Logaritmik	250	5515075,0	5515146,9	5515250,3
18		500	Lineer	500	5515212,2	5515286,5	5514821,1

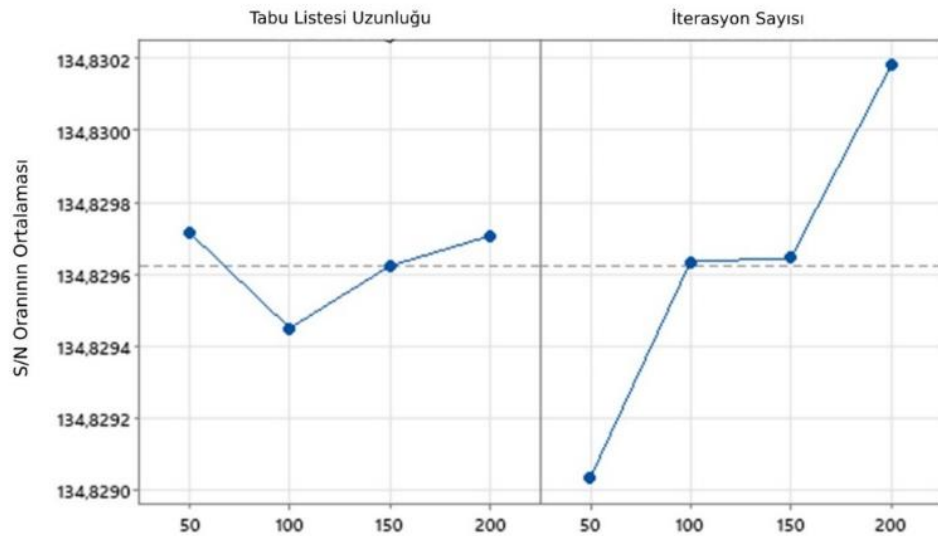


**Şekil 26.** SA için faktörlerin etkileri.

Hesaplanan uygunluk fonksiyonu değerleri için performans kriterleri y ekseninde, parametre seviyeleri ise x ekseninde gösterilmiştir. Faktörlerin etkileri SA için Şekil 26'da ve TSA için Şekil 27'de verilmiştir. Performans kriterlerinin en yüksek değere sahip olduğu nokta, ilgili parametrenin en iyi olduğu seviyeyi gösterir. Şekil 26'da görüldüğü gibi, tavlama fonksiyonu için en iyi seviye Boltzman tavlama, yeniden tavlama aralığı için en iyi seviye 500, sıcaklık güncelleme fonksiyonu için en iyi seviye üstel fonksiyon ve başlangıç sıcaklığı için en iyi seviye 250 derecedir.

**Tablo 16.** TSA için Taguchi Deney Tasarımı ve Deneysel Veriler

Deneyler	Parametreler		Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Tabu Listesi Uzunluğu	İterasyon Sayısı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	50	50	5513125,7	5514549,6	5514251,2
2	50	100	5514504,4	5513072,1	5513611,6
3	50	150	5514853,4	5514045,1	5515099,3
4	50	200	5514771,2	5514614,4	5514402,1
5	100	50	5514435,5	5513568,4	5514267,0
6	100	100	5514709,9	5513472,5	5514928,3
7	100	150	5514138,4	5512722,1	5513847,9
8	100	200	5514917,3	5514328,2	5513544,5
9	150	50	5513147,4	5512209,6	5513976,1
10	150	100	5514847,3	5513965,1	5514588,4
11	150	150	5513568,9	5514634,4	5514710,3
12	150	200	5514871,8	5514795,7	5514882,9
13	200	50	5514182,2	5514159,9	5513827,7
14	200	100	5514574,0	5514062,4	5513949,4
15	200	150	5514872,4	5514373,6	5513503,3
16	200	200	5514199,6	5514668,1	5514461,1



**Şekil 27.** TSA için faktörlerin etkileri.

Tablo 16’da görüldüğü gibi TSA'nın en uygun parametrelerini belirlemek için  $L_{16}(4^2)$  ortogonal deney tasarım planı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan  $L_{16}(4^2)$  ortogonal deney tasarım planı ve aynı koşullar altında çalıştırılan üç farklı tekrar sonucunda elde edilen uygunluk fonksiyonunun Taguchi deney sonuçları Tablo 16’da verilmiştir.

TSA için deneysel tasarımda, performans kriterlerinin en yüksek değere sahip olduğu nokta, ilgili parametrenin en iyi olduğu seviyeyi gösterir. Şekil 27’de görüldüğü gibi, tabu listesi uzunluğu için en iyi seviye 200 ve İterasyon sayısı için en iyi seviye 200 olarak bulunmuştur.

**Tablo 17.** Deney Tasarımları Sonucunda Belirlenen Parametreler

Tavlama Fonksiyonu	SA’ya Ait Parametreler			TSA’ya Ait Parametreler	
	Yeniden Tavlama Aralığı	Sıcaklık Güncelleme Fonksiyonu	Başlangıç Sıcaklığı	Tabu Listesi Uzunluğu	İterasyon Sayısı
Boltzman Tavlaması	500	Üstel	250	200	200

SA ve TSA için çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan parametre düzeyleri Tablo 17’de verilmiştir. Bu parametreler önce geçmiş verilerle, sonra da Markov Zinciri tarafından üretilen verilerle çalıştırılmıştır. Her iki veriden alınan üst ve alt stok limitleri, test verilerinin uygunluk fonksiyonu hesaplamasında kullanılmıştır. Önerilen uygunluk fonksiyonuyla birlikte, TSA ve SA önce geçmiş test verileri üzerinde çalıştırılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Daha sonra, aynı boyutlarda stokastik veriler, Markov zinciri kullanılarak test verilerinden üretilmiştir. TSA ve SA stokastik veriler üzerinde de çalıştırılarak sonuçları kaydedilmiştir. Tablo 18 ve 19’da hem TSA hem de SA için stok limitleri ve sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar hem geçmiş veriler hem de Markov süreci için ayrı ayrı gösterilmiştir.

**Tablo 18.** TSA’ya Ait Çözümler

Veri No	Talep Boyutu	Geçmiş Veriler			Markov Süreci Verileri		
		ASL	ÜSL	UFD	ASL	ÜSL	UFD
1	250	87	108	<b>5.4730e+06</b>	103	167	<b>5.4731e+06</b>
2	10000	149	178	3.3443e+08	147	175	3.3445e+08
3	250000	126	163	<b>7.7503e+09</b>	153	165	7.7527e+09
4	500000	157	160	<b>1.4995e+10</b>	143	392	1.4995e+10

*ASL: Alt Stok Limit, ÜSL: Üst Stok Limiti, UFD: Uygunluk Fonksiyonu Değeri*

Tablo 18’e göre TSA yardımıyla hesaplanan stok limitleri ve bu limitlere ait uygunluk fonksiyon değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 19.** SA'ya Ait Çözümler

Veri No	Talep Boyutu	Geçmiş Veriler			Markov Süreci Verileri		
		ASL	ÜSL	UFD	ASL	ÜSL	UFD
1	250	89	180	5.4727e+06	97	136	5.4727e+06
2	10000	143	217	<b>3.3444e+08</b>	143	168	<b>3.3446e+08</b>
3	250000	127	128	7.7201e+09	151	156	<b>7.7529e+09</b>
4	500000	134	191	1.4994e+10	143	152	<b>1.4995e+10</b>

*ASL: Alt Stok Limit, ÜSL: Üst Stok Limiti, UFD: Uygunluk Fonksiyonu Değeri*

Tablo 19'a göre, SA yardımıyla hesaplanan stok limitleri ve bu limitlerin uygunluk fonksiyonu değerleri gösterilmektedir. Kalın yazılan sonuçlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir: Örneğin, birinci test verisi için, Markov ile hesaplanan uygunluk fonksiyonu değeri TSA için 5.4731e+06 ve SA için 5.4727e+06'dır. Bu değerlerden daha büyüğü TSA için 5.4731e+06 olarak seçilmiş ve Tablo 18'de kalın yazılmıştır.

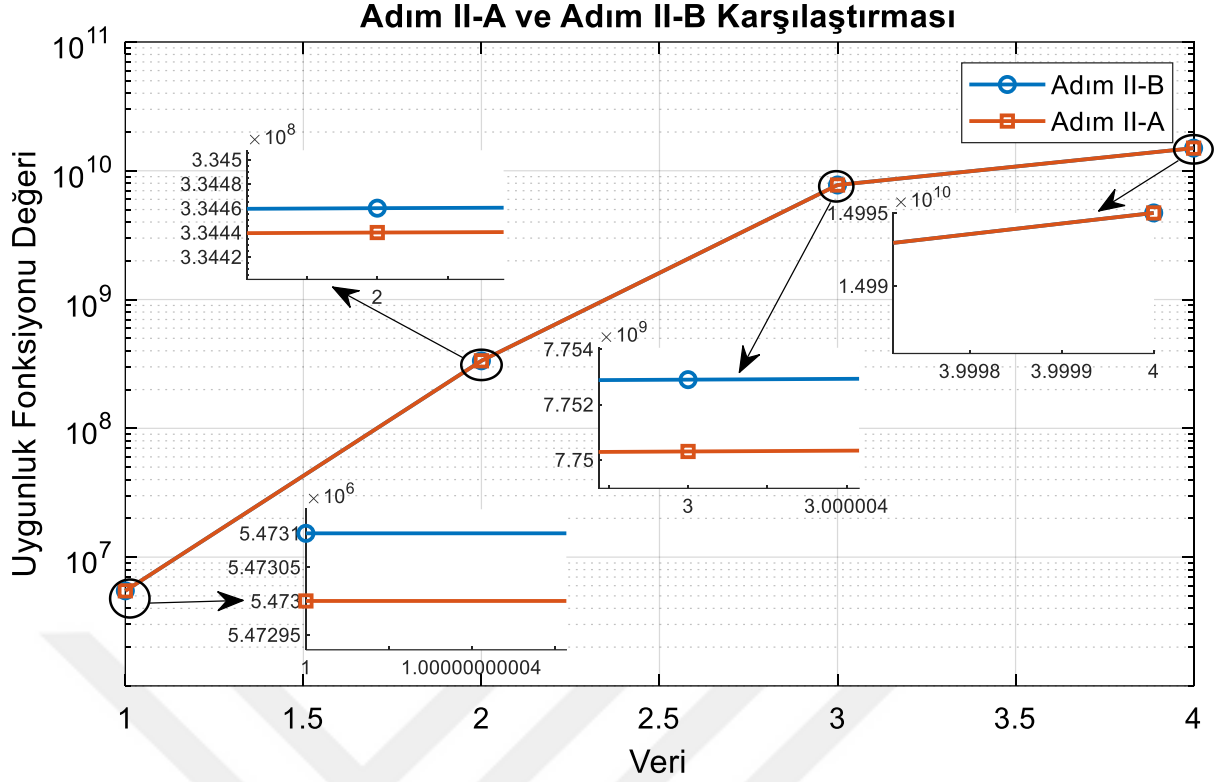
Adım II-A, Markov sürecinin dahil edilmediği, ancak çözümün metasezgisel yöntemler ve geçmiş verilerle arandığı aşamadır. Adım II-B, bu aşamanın ayırt edici özelliği olan Markov sürecinin dahil edildiği aşamadır. Tablo 20, bu aşamaların karşılaştırma tablosudur. Tablonun son sütununda, Markov süreci dahil edildiğinde FFVTD'nin ne kadar arttığı açıkça görülmektedir.

**Tablo 20.** Adım II-A ve Adım II-B'nin Sayısal Olarak Karşılaştırması

Veri No	Talep Boyutu	Adım II-B	Adım II-A	UFD'ler Arasındaki Fark
1	250	5,4731E+06	5,4730E+06	1,0000E+02
2	10000	3,3446E+08	3,3444E+08	2,0000E+04
3	250000	7,7529E+09	7,7503E+09	2,6000E+06
4	500000	1,4995E+10	1,4995E+10	0,0000E+00

*UFD: Uygunluk Fonksiyonu Değeri*

Tablo 20, Markov sürecinin dahil edilmesinden sonra uygunluk fonksiyonu değerleri arasındaki farkı, yani iyileştirme miktarını göstermektedir. Tablo 20 şu şekilde oluşturulmuştur: Örneğin, bir numaralı veri grubunda geçmiş veriler için seçilen en iyi uygunluk fonksiyonu değeri 5.4730e+06'dır. Markov süreciyle seçilen en iyi uygunluk fonksiyonu değeri ise 5.4731e+06'dır. Burada, Markov sürecinin dahil edilmesiyle uygunluk fonksiyonu değerine getirilen iyileştirme miktarı 1.0000E+02'dir. Bu işlem bütün veriler için tekrarlanarak sonuçları Tablo 20'de verilmiştir. Tablo 20'de görüldüğü gibi, Adım II-B'de hesaplanan limitler Adım II-A'da hesaplanan limitlerden daha iyi sonuçlar vermiştir.



**Şekil 28.** Adım II-A ve Adım II-B'nin karşılaştırması.

Şekil 28, Tablo 20'de verilen sonuçların grafiğini göstermektedir. Adım II-A ve Adım II-B'ye ait 4 farklı talep türünün uygunluk fonksiyonu değerleri arasındaki farklar grafiklerde ek detay olarak gösterilmiştir. Kırmızı çizgiler Adım II-A'yı, mavi çizgiler ise Adım II-B'yi temsil etmektedir. Grafikteki detaylarda görülebileceği gibi mavi çizgiler kırmızı çizgilerin üzerindedir. Bu, Adım II-B'ye ait sonuçların Adım II-A'dan daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle, Markov sürecini içeren yaklaşım daha iyi sonuçlar göstermiştir. Bu katkı, envanter maliyeti ve kayıp satış maliyeti ile başlayıp müşteri memnuniyetine kadar devam eden sürecin tüm aşamalarını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilecek düzeydedir. Bu karşılaştırma, Markov sürecinin aralıklı talep stok seviyesi optimizasyonuna katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

Tüm bu olumlu sonuçlara rağmen önerilen yaklaşımın bazı sınırlamaları vardır. Çalışmanın en büyük sınırlaması aralıklı taleptir. Aralıklı talep belirli istatistiklere sahip olduğundan ( $ADI > 1.32$  ve  $CV^2 < 0.49$ ) bu durum çalışmayı aralıklı talep açısından sınırlasa da önerilen yaklaşım tüm talep yapıları için çalışabilecek esnekliğe sahiptir. Bir diğer sınırlama ise geçmiş dönem taleplerine bağlı olmasıdır. Wagner-Whitin ve Silver Meal yöntemleri gibi yaklaşımlar gelecekteki taleplerle çalışırken (gerçekleşecek talepler önceden biliniyorken), bu çalışmada önerilen yaklaşım geçmiş dönem taleplerine dayanarak gelecek hakkında çıkarımlarda bulunmaktadır. Bu nedenle bu yaklaşımla kullanılan verilerin eksiksiz, doğru ve

tutarlı olduğundan emin olmak gerekmektedir. Çünkü aralıklı talep belirli bir zaman diliminde oluşan bir taleptir. Ele alınan zaman dilimi aralıklı talebin durumunu etkiler.

### Üçüncü Aşama Sonuçları

Bu aşamada yapılan parametre optimizasyonu işlemlerinde ikinci aşamada açıklanan Taguchi yöntemi yaklaşımı aynı şekilde uygulanmıştır. SA, TSA, CSA, DA, AVOA, GWO, ve AGTO için deney tasarımlarında dikkate alınan parametreler ve her bir parametrenin seviyeleri Tablo 21’de açıklanmıştır. Her deney, ortalama ve varyans değerlerini elde etmek için üç kez çalıştırılmıştır.

**Tablo 21.** Parametreler ve Faktör Seviyeleri

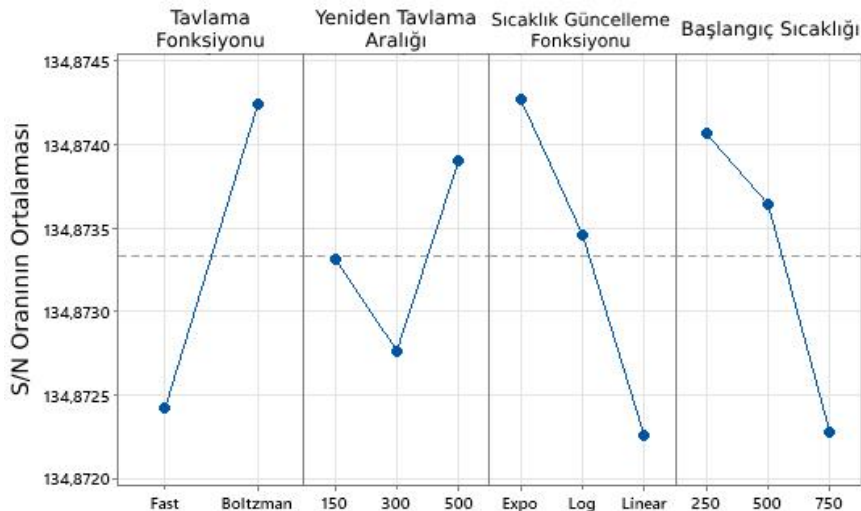
Yöntem	Parametreler	Faktör Seviyeleri
<b>SA</b> $L_{18}(2^1 3^3)$	Başlangıç Sıcaklığı	250 – 500 – 750
	Tavlama Fonksiyonu	Boltzman Tavlama – Hızlı Tavlama
	Yeniden Tavlama Aralığı	150 – 300 – 500
	Sıcaklık Güncelleme Fonksiyonu	Üstel – Logaritmik – Lineer
<b>TSA</b> $L_{16}(4^2)$	Tabu Listesi Uzunluğu	50 – 100 – 150 – 200
	İterasyon Sayısı	50 – 100 – 150 – 200
<b>CSA</b> $L_{16}(4^3)$	Popülasyon Büyüklüğü	150 – 200 – 250 – 300
	Keşif Olasılığı	0.05 – 0.10 – 0.15 – 0.20
	İterasyon Sayısı	150 – 200 – 250 – 300
<b>DA</b> $L_{16}(4^2)$	Arama Ajanı Sayısı	25 – 50 – 75 – 100
	İterasyon Sayısı	50 – 100 – 150 – 200
<b>AVOA</b> $L_{27}(3^8)$	Popülasyon Büyüklüğü	40 – 80 – 120
	İterasyon Sayısı	50 – 100 – 150
	p1	0.3 – 0.6 – 0.9
	p2	0.3 – 0.6 – 0.9
	p3	0.3 – 0.6 – 0.9
	$\alpha$	0.3 – 0.6 – 0.9
	$\beta$	0.3 – 0.6 – 0.9
$\gamma$	0.3 – 0.6 – 0.9	
<b>GWO</b> $L_{16}(4^2)$	Arama Ajanı Sayısı	50 – 100 – 150 – 200
	İterasyon Sayısı	50 – 100 – 150 – 200
<b>AGTO</b> $L_{27}(3^8)$	Popülasyon Büyüklüğü	40 – 80 – 120
	İterasyon Sayısı	50 – 100 – 150
	p	0.3 – 0.6 – 0.9
	$\beta$	0.3 – 0.6 – 0.9
	w	0.3 – 0.6 – 0.9

SA parametreleri için 18 deney yürütülmüştür.  $L_{18}(2^13^3)$  deney planı Tablo 22'de verilmiştir.

**Tablo 22.** SA için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{18}(2^13^3)$

Deneyle	Parametreler			Uygunluk Fonksiyonu Değeri			
	Tavlama Fonksiyonu	Yeniden Tavlama Aralığı	Sıcaklık Güncelleme Fonksiyonu	Başlangıç Sıcaklığı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	Hızlı Tavlama	150	Üstel	250	5542707	5542718	5542759
2		150	Logaritmik	500	5541945	5540563	5541133
3		150	Lineer	750	5542705	5542724	5534590
4		300	Üstel	250	5542036	5542707	5542803
5		300	Logaritmik	500	5541680	5541486	5541058
6		300	Lineer	750	5542017	5542014	5531416
7		500	Üstel	500	5542803	5542759	5542803
8		500	Logaritmik	750	5539759	5542733	5542692
9		500	Lineer	250	5542029	5540937	5542717
10	Boltzman Tavlama	150	Üstel	750	5542803	5542718	5542718
11		150	Logaritmik	250	5542765	5542778	5542711
12		150	Lineer	500	5541950	5542765	5542776
13		300	Üstel	500	5542803	5542029	5542707
14		300	Logaritmik	750	5542584	5542747	5542738
15		300	Lineer	250	5541940	5542785	5541956
16		500	Üstel	750	5541454	5542763	5542718
17		500	Logaritmik	250	5542700	5542740	5542671
18		500	Lineer	500	5542767	5542797	5542757

Şekil 29'da S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini göstermektedir. Şekil 29'a göre tavlama fonksiyonu için Boltzman tavlama, yeniden tavlama aralığı için 500, sıcaklık güncelleme fonksiyonu için üstel fonksiyon ve başlangıç sıcaklığı için 250 derece parametrelerin en iyi seviyeleri olarak belirlenmiştir.



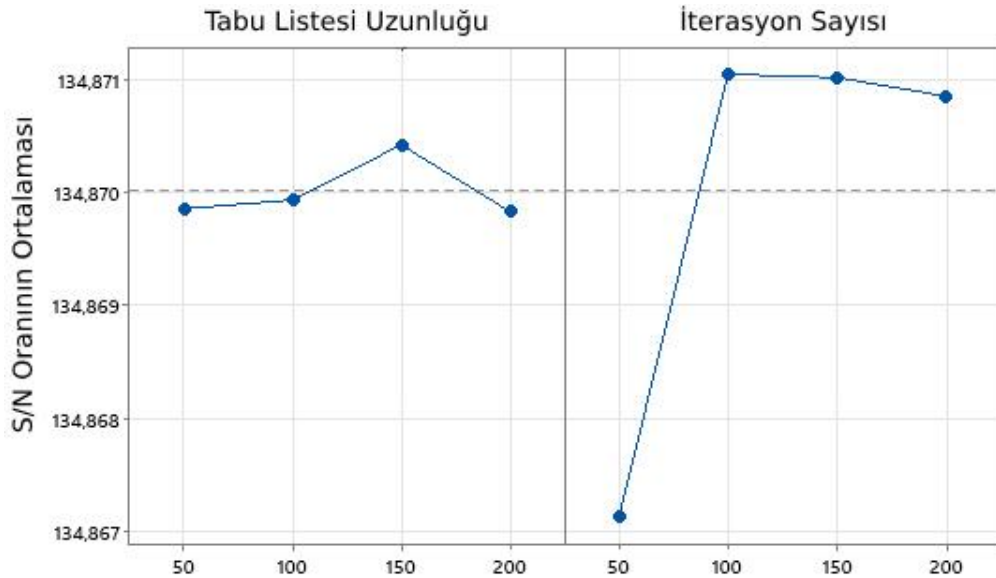
**Şekil 29.** SA için faktörlerin etkileri.

TSA parametreleri için 16 deney yürütülmüştür.  $L_{16}(4^2)$  deney planı Tablo 23'te verilmiştir.

**Tablo 23.** TSA için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{16}(4^2)$

Deneyler	Parametreler		Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Tabu Listesi Uzunluğu	İterasyon Sayısı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	50	50	5538016	5536042	5537970
2	50	100	5540512	5542050	5539765
3	50	150	5538247	5542216	5541486
4	50	200	5541148	5540908	5539062
5	100	50	5540271	5536755	5538041
6	100	100	5541620	5538082	5541058
7	100	150	5540264	5541844	5539930
8	100	200	5542443	5537885	5539834
9	150	50	5539745	5541015	5537820
10	150	100	5542347	5542175	5539546
11	150	150	5541417	5541111	5537309
12	150	200	5538335	5539443	5541503
13	200	50	5539332	5533655	5537841
14	200	100	5540157	5540494	5538749
15	200	150	5541730	5541080	5539697
16	200	200	5542688	5541324	5540486

Şekil 30'da S/N oranı dikkate alınmıştır. Şekil 30'a göre tabu listesi uzunluğu için 150, iterasyon sayısı için 100 parametrelerin en iyi seviyeleri olarak belirlenmiştir.



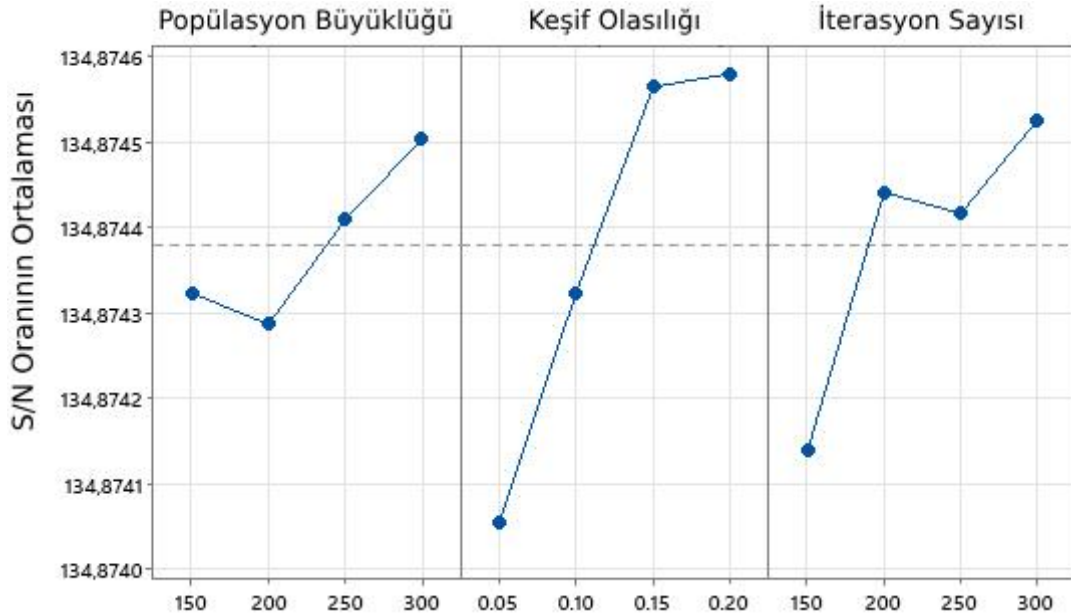
**Şekil 30.** TSA için faktörlerin etkileri.

CSA parametreleri için 16 deney yürütülmüştür.  $L_{16}(4^3)$  deney planı Tablo 24'te verilmiştir.

**Tablo 24.** CSA için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{16}(4^3)$ 

Deney	Parametreler			Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Popülasyon Büyüklüğü	Keşif Olasılığı	İterasyon Sayısı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	150	0.05	150	5541902	5542611	5542182
2	150	0.1	200	5542774	5542574	5542759
3	150	0.15	250	5542804	5542774	5542804
4	150	0.20	300	5542804	5542804	5542804
5	200	0.05	200	5542640	5542640	5542316
6	200	0.1	150	5541914	5542491	5542491
7	200	0.15	300	5542804	5542804	5542804
8	200	0.20	250	5542804	5542804	5542804
9	250	0.05	250	5542574	5541929	5542745
10	250	0.1	300	5542804	5542804	5542718
11	250	0.15	150	5542774	5542718	5542774
12	250	0.20	200	5542804	5542804	5542804
13	300	0.05	300	5542718	5542774	5542506
14	300	0.1	250	5542745	5542804	5542718
15	300	0.15	200	5542804	5542804	5542774
16	300	0.20	150	5542804	5542718	5542804

Şekil 31’de S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini göstermektedir. Şekil 31’e göre popülasyon büyüklüğü için 300, keşif olasılığı için 0,20 ve iterasyon sayısı için 300 parametrelerin en iyi seviyeleri olarak belirlenmiştir.

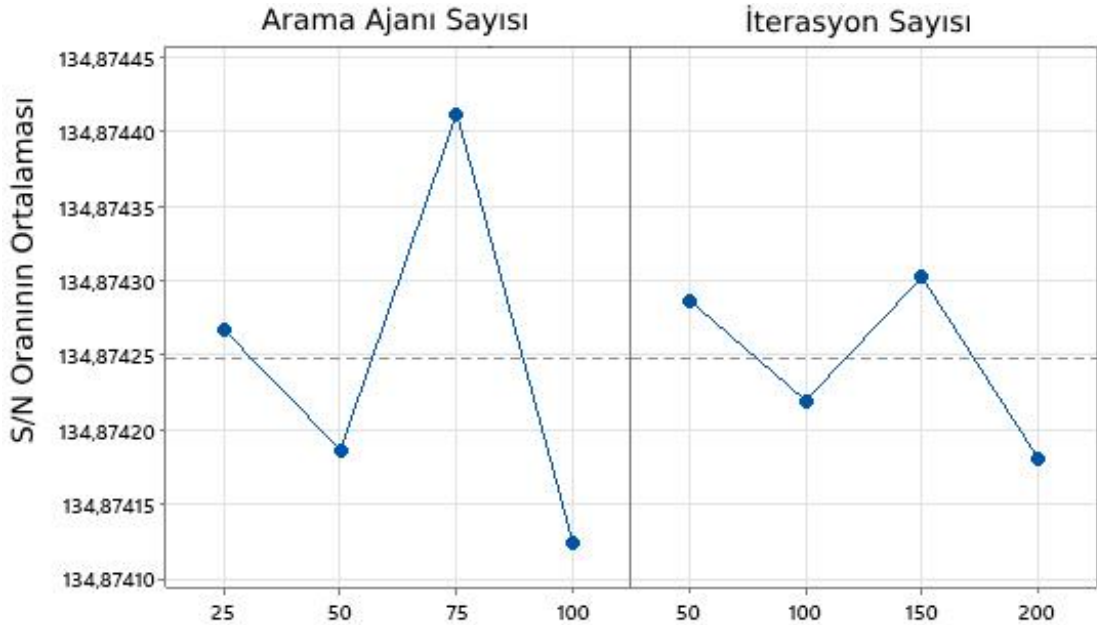
**Şekil 31.** CSA için faktörlerin etkileri.

DA parametreleri için 16 deney yürütülmüştür.  $L_{16}(4^2)$  deney planı Tablo 25'te verilmiştir.

**Tablo 25.** DA için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{16}(4^2)$ 

Deney	Parametreler		Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Arama Ajanı Sayısı	İterasyon Sayısı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	25	50	5540920	5542772	5542802
2	25	100	5542745	5542803	5542718
3	25	150	5542718	5542708	5542718
4	25	200	5542745	5542804	5542718
5	50	50	5542742	5542799	5542785
6	50	100	5542707	5540661	5542803
7	50	150	5542804	5542037	5542804
8	50	200	5542804	5542804	5542804
9	75	50	5542791	5542734	5542686
10	75	100	5542803	5542707	5542718
11	75	150	5542037	5542774	5542718
12	75	200	5542707	5542804	5542804
13	100	50	5542707	5542795	5542791
14	100	100	5542718	5542708	5542717
15	100	150	5542708	5542708	5542707
16	100	200	5541373	5542708	5541434

Şekil 32’de S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini göstermektedir. Şekil 32’ye göre arama ajanı sayısı için 75, iterasyon sayısı için 150 parametrelerin en iyi seviyeleri olarak belirlenmiştir.

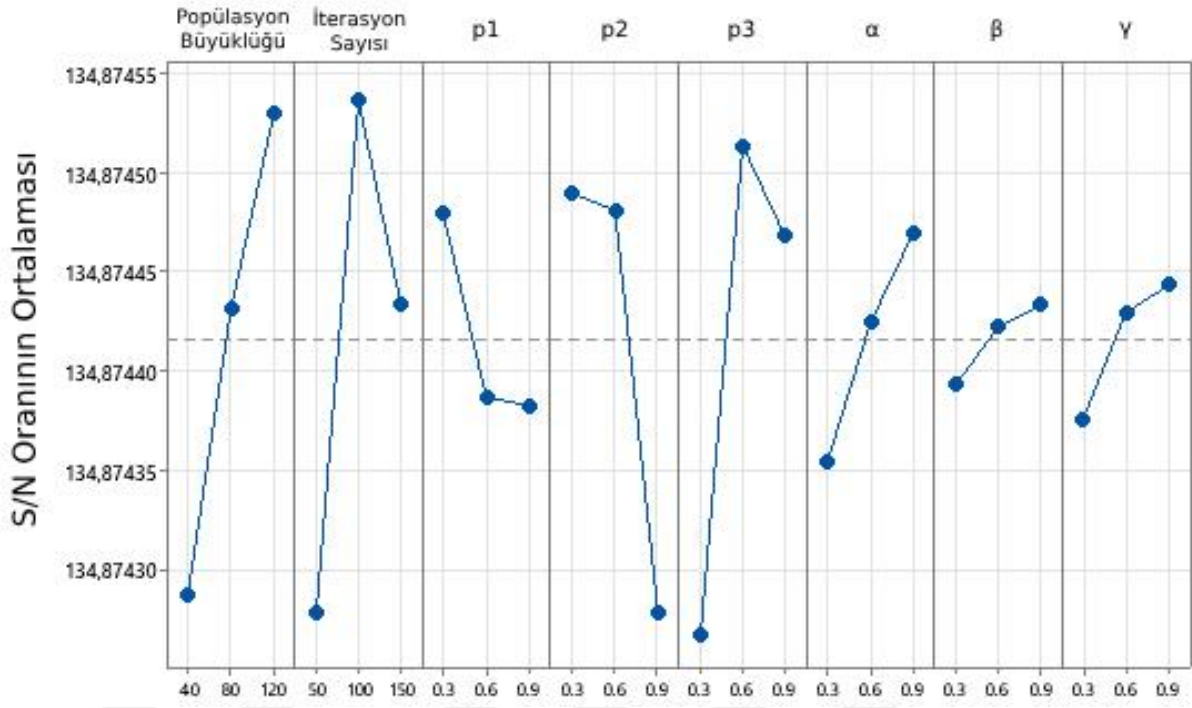
**Şekil 32.** DA için faktörlerin etkileri.

AVOA parametreleri için 27 deney yürütülmüştür.  $L_{27}(3^8)$  deney planı Tablo 26’da verilmiştir.

**Tablo 26.** AVOA için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{27}(3^8)$ 

Deney	Popülasyon Büyüklüğü	İterasyon Sayısı	Parametreler						Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
			p1	p2	p3	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	40	50	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	5542804	5542718	5542029
2	40	50	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	5542718	5542804	5542037
3	40	50	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	5542804	5542773	5542804
4	40	100	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.6	5542029	5542804	5542804
5	40	100	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	5542774	5542804	5542804
6	40	100	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.3	5542759	5542804	5542804
7	40	150	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.9	5542773	5542759	5541437
8	40	150	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6	0.3	5542718	5542759	5542718
9	40	150	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	5542803	5542745	5541901
10	80	50	0.6	0.9	0.3	0.6	0.9	0.3	5542029	5542718	5542036
11	80	50	0.6	0.9	0.6	0.9	0.3	0.6	5542804	5542707	5542803
12	80	50	0.6	0.9	0.9	0.3	0.6	0.9	5542718	5542718	5542036
13	80	100	0.9	0.3	0.3	0.6	0.9	0.6	5542804	5542804	5542804
14	80	100	0.9	0.3	0.6	0.9	0.3	0.9	5542804	5542804	5542804
15	80	100	0.9	0.3	0.9	0.3	0.6	0.3	5542804	5542804	5542804
16	80	150	0.3	0.6	0.3	0.6	0.9	0.9	5542804	5542804	5542804
17	80	150	0.3	0.6	0.6	0.9	0.3	0.3	5542804	5542804	5542718
18	80	150	0.3	0.6	0.9	0.3	0.6	0.6	5542804	5542804	5542804
19	120	50	0.9	0.6	0.3	0.9	0.6	0.3	5542029	5542804	5542759
20	120	50	0.9	0.6	0.6	0.3	0.9	0.6	5542759	5542804	5542803
21	120	50	0.9	0.6	0.9	0.6	0.3	0.9	5542804	5542804	5542708
22	120	100	0.3	0.9	0.3	0.9	0.6	0.6	5542803	5542759	5542804
23	120	100	0.3	0.9	0.6	0.3	0.9	0.9	5542803	5542803	5542803
24	120	100	0.3	0.9	0.9	0.6	0.3	0.3	5542803	5542759	5542804
25	120	150	0.6	0.3	0.3	0.9	0.6	0.9	5542804	5542804	5542804
26	120	150	0.6	0.3	0.6	0.3	0.9	0.3	5542804	5542804	5542804
27	120	150	0.6	0.3	0.9	0.6	0.3	0.6	5542804	5542804	5542804

Şekil 33'te S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini göstermektedir. Şekil 33'e göre parametrelerin en iyi seviyeleri popülasyon büyüklüğü için 120, iterasyon sayısı için 100, p1 için 0,3, p2 için 0,3, p3 için 0,6,  $\alpha$  için 0,9,  $\beta$  için 0,9 ve  $\gamma$  için 0,9 olarak belirlenmiştir.



Şekil 33. AVOA için faktörlerin etkileri.

GWO parametreleri için 16 deney yürütülmüştür.  $L_{16}(4^2)$  deney planı Tablo 27'de verilmiştir.

Tablo 27. GWO için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{16}(4^2)$

Deney	Parametreler		Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Arama Ajanı Sayısı	İterasyon Sayısı	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	50	50	5542801	5542773	5542802
2	50	100	5542802	5542803	5542802
3	50	150	5542803	5542803	5542803
4	50	200	5542803	5542802	5542803
5	100	50	5542800	5542802	5542787
6	100	100	5542803	5542803	5542799
7	100	150	5542803	5542801	5542803
8	100	200	5542802	5542803	5542803
9	150	50	5542800	5542802	5542802
10	150	100	5542803	5542802	5542801
11	150	150	5542802	5542803	5542803
12	150	200	5542803	5542803	5542803
13	200	50	5542799	5542801	5542801
14	200	100	5542803	5542803	5542803
15	200	150	5542802	5542803	5542803
16	200	200	5542803	5542803	5542803

GWO faktörlerinin etkileri için Şekil 34'te S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini

göstermektedir. Şekil 34'e göre arama ajanı sayısı için 200 ve iterasyon sayısı için 200 parametrelerin en iyi seviyeleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 34. GWO için faktörlerin etkileri.

AGTO parametreleri için 27 deney yürütülmüştür.  $L_{27}(3^5)$  deney planı Tablo 28'de verilmiştir.

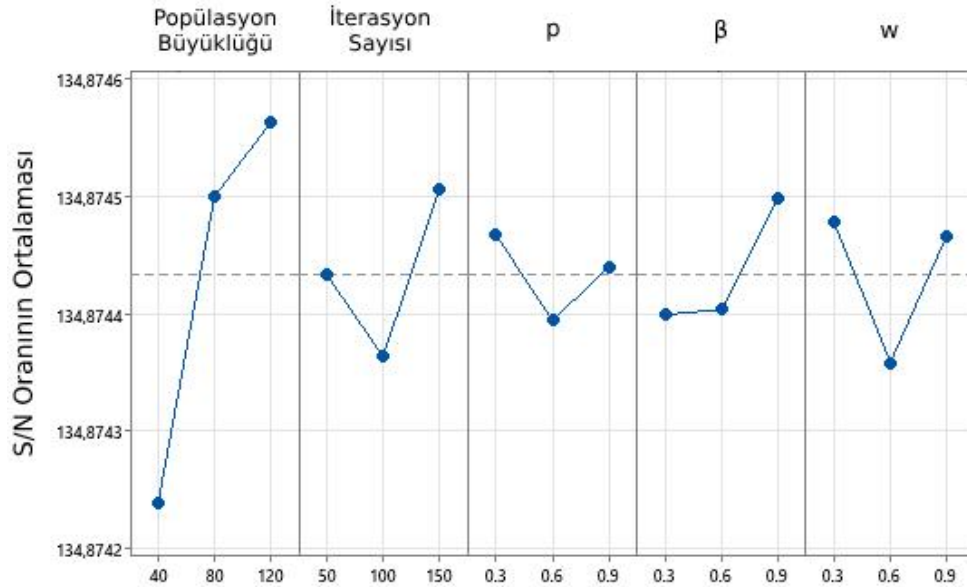
Tablo 28. AGTO için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{27}(3^5)$

Deney	Parametreler					Uygunluk Fonksiyonu Değeri		
	Popülasyon Büyüklüğü	İterasyon Sayısı	p	$\beta$	w	Birinci Çalıştırma	İkinci Çalıştırma	Üçüncü Çalıştırma
1	40	50	0.3	0.3	0.3	5542718	5542804	5542708
2	40	50	0.3	0.3	0.6	5542745	5542036	5542718
3	40	50	0.3	0.3	0.9	5542708	5542745	5542029
4	40	100	0.6	0.6	0.3	5542708	5542804	5542718
5	40	100	0.6	0.6	0.6	5542804	5542029	5540944
6	40	100	0.6	0.6	0.9	5542804	5542801	5542804
7	40	150	0.9	0.9	0.3	5542745	5542718	5542718
8	40	150	0.9	0.9	0.6	5542804	5542804	5542708
9	40	150	0.9	0.9	0.9	5542708	5542804	5542029
10	80	50	0.6	0.9	0.3	5542718	5542708	5542803
11	80	50	0.6	0.9	0.6	5542804	5542804	5542718
12	80	50	0.6	0.9	0.9	5542804	5542774	5542718
13	80	100	0.9	0.3	0.3	5542718	5542029	5542759
14	80	100	0.9	0.3	0.6	5542708	5542804	5542718
15	80	100	0.9	0.3	0.9	5542804	5542802	5542804
16	80	150	0.3	0.6	0.3	5542804	5542804	5542804
17	80	150	0.3	0.6	0.6	5542804	5542804	5542804

**Tablo 28.** AGTO için Taguchi Deney Tasarımı-  $L_{27}(3^5)$  (devamı)

18	80	150	0.3	0.6	0.9	5542804	5542804	5542708
19	120	50	0.9	0.6	0.3	5542803	5542718	5542718
20	120	50	0.9	0.6	0.6	5542804	5542804	5542804
21	120	50	0.9	0.6	0.9	5542804	5542759	5542718
22	120	100	0.3	0.9	0.3	5542804	5542804	5542804
23	120	100	0.3	0.9	0.6	5542804	5542804	5542804
24	120	100	0.3	0.9	0.9	5542804	5542804	5542804
25	120	150	0.6	0.3	0.3	5542804	5542708	5542804
26	120	150	0.6	0.3	0.6	5542804	5542804	5542718
27	120	150	0.6	0.3	0.9	5542804	5542804	5542804

Şekil 35’te S/N oranı dikkate alınmıştır. Bu orana göre performans ölçütünün en yüksek değere ulaştığı nokta ilgili parametrenin en iyi seviyesini göstermektedir. Şekil 35’e göre parametrelerin en iyi seviyeleri popülasyon büyüklüğü için 120, iterasyon sayısı için 150, p için 0,3,  $\beta$  için 0,9 ve w için 0,3 olarak belirlenmiştir.

**Şekil 35.** AGTO için faktörlerin etkileri.**Tablo 29.** Optimum Parametrelerle Hesaplanan Uygunluk Fonksiyon Değerleri

Çalıştırma	SA	TSA	CSA	DA	AVOA	GWO	AGTO
1	5542708	5541432	5542804	5539633	5542804	5542803	5542804
2	5541958	5538682	5542804	5542708	5542804	5542803	5542804
3	5542803	5542244	5542804	5542759	5542804	5542804	5542804
4	5542803	5540524	5542804	5542708	5542804	5542803	5542804
5	5542803	5534480	5542804	5542718	5542804	5542803	5542804
6	5542718	5541832	5542804	5542708	5542804	5542803	5542804
7	5542718	5540380	5542804	5542037	5542804	5542804	5542804
8	5542803	5542286	5542804	5542718	5542804	5542803	5542804
9	5542036	5542085	5542804	5542804	5542804	5542803	5542804
10	5542803	5541348	5542804	5542718	5542804	5542803	5542804

Tablo 29'da Taguchi yöntemi ile belirlenen parametrelerle çalıştırılan metasezgisellerin on adet amaç fonksiyonu değeri bulunmaktadır. Amaç fonksiyonunu on kez hesaplamının amacı, metasezgisel yöntemlerde bulunan rastgelelikten kaçınmaktır.

**Tablo 30.** Varyans Analizi (ANOVA) için Hipotezler

<b>Sıfır hipotezi</b>	Tüm ortalamalar eşittir
<b>Alternatif hipotez</b>	Tüm ortalamalar eşit değildir
<b>Önem düzeyi</b>	$\alpha = 0,05$

ANOVA için varyanslar eşit varsayılmıştır. ANOVA ile test edilen hipotezler Tablo 30'da verilmiştir. İstatistiksel analizler Minitab istatistik yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 31.** Faktör Bilgileri

<b>Faktör</b>	<b>Seviyeler</b>	<b>Değerler</b>
Metasezgiseller	7	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7

ANOVA testinde, 7 metasezgisel algoritmanın ortalama uygunluk fonksiyon değerleri karşılaştırılmıştır. ANOVA testi için 7 metasezgisel yöntemin numaralandırılması şu şekildedir: SA (1), TSA (2), CSA (3), DA (4), AVOA (5), GWO (6) ve AGTO (7). Faktör bilgisi Tablo 31'de verilmiştir.

**Tablo 32.** Tanımlayıcı İstatistikler

<b>Metasezgiseller</b>	<b>Gözlem Sayısı</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Standart Sapma</b>	<b>%95 Güven Aralığı</b>
SA	10	5542615	329	(5541992; 5543239)
TSA	10	5540529	2396	(5539906; 5541153)
CSA	10	5542804	0	(5542181; 5543427)
DA	10	5542351	980	(5541728; 5542974)
AVOA	10	5542804	0	(5542181; 5543427)
GWO	10	5542803	0	(5542180; 5543426)
AGTO	10	5542804	0	(5542181; 5543427)

Tanımlayıcı istatistikler Tablo 32'de verilmiştir. Gözlem sayısı, her metasezgisel için kaç tane uygunluk fonksiyonu değerinin hesaplandığını göstermektedir.

**Tablo 33.** ANOVA

<b>Değişkenlik Kaynağı</b>	<b>Serbestlik Derecesi</b>	<b>Düzeltilmiş Kareler Toplamı</b>	<b>Düzeltilmiş Ortalama Kareler</b>	<b>F-Değeri</b>	<b>P-Değeri</b>
Metasezgiseller	6	41993479	6998913	7,20	0,000
Hata	63	61275109	972621		
Toplam	69	103268588			

Tablo 33 varyans analiz tablosudur. p-değeri <0.05 olduğundan, sıfır hipotezi reddedilir. Ancak, ANOVA testinde 7 faktör olduğundan, hangi faktörlerin farklı ortalamalara sahip olduğunu da test etmek gereklidir. Bu test Tukey yöntemi ile yapılmıştır.

**Tablo 34.** Tukey Yöntemi ile Gruplama

<b>Metasezgiseller</b>	<b>Gözlem Sayısı</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Gruplar</b>
AGTO	10	5542804	A
AVOA	10	5542804	A
CSA	10	5542804	A
GWO	10	5542803	A
SA	10	5542615	A
DA	10	5542351	A
TSA	10	5540529	B

Tablo 34'te metasezgisel yöntemler Tukey yönteminin %95 güven aralığında ortalamalarına göre gruplandırılmıştır. AGTO, AVOA, CSA, GWO, SA ve DA A grubunda, TSA ise B grubunda yer almıştır. Tablo 33'te metasezgisel yöntemler en yüksek ortalama uygunluk fonksiyonu değerinden en düşüğe doğru sıralanmıştır. Bu nedenle B grubunda yer alan ve en düşük ortalama amaç fonksiyonu değerine sahip olan TSA'nın diğer 6 yöntemden daha kötü çözümler ürettiği söylenebilir.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aralıklı talepler yoğun olarak yedek parça sektöründe daha fazla ön plandadır. Aralıklı talebe sahip ürünler için envanter modelleri geliştirmek de talep yapısı nedeniyle zordur. Uygun bir envanter politikası belirlenemezse yüksek stok maliyetleri veya kayıp satışlar meydana gelebilir. Bu sorunu çözmek için, önerilen matematiksel model hem stok maliyetini azaltmak hem de kayıp satışları önlemek için iyi bir yaklaşımdır. Ancak, matematiksel modelle uygun bir çözüm bulunamamıştır. Matematiksel modelin amaç fonksiyonunu hesaplayarak metasezgisel yöntemlerle çalışabilecek bir uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır. Önerilen uygunluk fonksiyonu birinci aşamada, GA ve PSO için yedi test verisi ile ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Bu yedi test verisi, artan talep boyutuyla performans kriterleri hakkında yorum yapma olanağı sağlamıştır. Önerilen yöntemlerin en önemli karşılaştırma kriterlerinden biri çözüm süresidir. GA çözüm süresi açısından avantaj sağlasa da PSO, GA'ya göre daha iyi çözümler sunmaktadır. Ancak ticari amaçlarla kurulan bir şirket için zaman kısıtlamaları çok önemlidir. Anlık değişikliklere cevap verebilmek, stok seviyelerini hızlı bir şekilde güncelleyebilmek, sipariş kararlarını daha hızlı alabilmek vb. durumlarda hızlı çözümler elde etmek işletmelere avantaj sağlar. Bu nedenle, birinci aşamada çözüm süresi açısından daha iyi sonuçlar veren GA bir adım önde görünmektedir.

İkinci aşamada, aralıklı taleplerin stok seviyesi optimizasyonunu daha da iyileştirmek için Markov süreci ve metasezgisel yöntemler entegre edilmiştir. Markov süreci geleneksel olarak aralıklı talep çalışmalarında talep tahminine odaklanır. Bu çalışmada, Markov süreci proaktif bir stok seviyesi optimizasyonunun odak noktasındadır. Markov süreci ve metasezgisel yöntemler, talebi tahmin etmeden talebi karşılamak için stok limitlerini bulur. Çalışmanın ikinci aşaması, aralıklı talep stok yönetiminde Markov sürecinin etkilerini metasezgisel yöntemlerle analiz etmektedir. Bu aşamada önerilen uygunluk fonksiyonuna TSA ve SA ile bir çözüm aranmıştır. Ancak, stok limitlerini yalnızca geçmiş taleplere göre hesaplamak, talebin belirsizliğini tam olarak hesaba katmaz. Markov sürecinin amacı, önerilen modelin geçmiş dönem talebini kullandığında ilgili süreci ezberlemesini önlemektir. Süreci bir Markov zinciri ile ele almak, yeni talepler gerçekleştiğinde daha iyi sonuçlar üretmektedir. Markov yaklaşımı ile aralıklı talep stok seviye optimizasyonuna proaktif bir bakış açısı kazandırılmıştır.

Aralıklı talep konusunun yanında bir diğer zorluk ise metasezgisel yöntemler için parametre seçimidir. Metasezgisel yöntemler belirli parametrelerle çalışırlar. Çalışmanın

üçüncü aşamasında parametre seçimi Taguchi yöntemi ile yapılmıştır. Bu aşamada yedi adet metasezgisel yöntem ve bu yöntemlerin hepsinde birden fazla optimizasyon parametresi bulunmaktadır. Uygun parametreleri bulmak çok zaman alacağından, bu optimizasyon parametreleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Böylece, parametre optimizasyonu aralıklı talep envanter yönetimi problemi için daha uygun parametrelerin seçilmesine olanak sağlamıştır. Bu şekilde, optimizasyon parametrelerinin yöntemler arasındaki performans farklılıklarına olan etkisi en aza indirilmiştir. Sonuçlar, endüstriyel karar vericiler için bazı önemli çıkarımlara sahiptir. Doğru stok seviyeleriyle, kaybedilen satış miktarı sifıra yakınsamış ve stok maliyetleri dengelenmiştir. Kayıp satış olmaması, müşteri memnuniyetinin yüksek seviyede tutulmasına yardımcı olur. Aralıklı taleplerin karmaşık envanter yönetimine hızlı çözümleri metasezgisel yaklaşımlarla sunulmaktadır. Bu şekilde, karar vericilere stok yönetimi stratejileri için yeterli zaman sağlanmıştır. Esnek bir çözüm aracı geliştirilmiştir. Önerilen uygunluk fonksiyonu sayesinde, farklı talep tiplerini farklı metasezgisel yöntemlerle çalıştırmak mümkündür. Üçüncü aşamada, aralıklı talebin envanter yönetimi için metasezgisel algoritmaların istatistiksel bir karşılaştırması sunulmuştur. Optimum parametrelere sahip metasezgisel yöntemler için on adet uygunluk fonksiyonu değeri hesaplanmıştır. İlgili sonuçlar istatistiksel olarak analiz edildiğinde, AGTO, AVOA, CSA, GWO, SA ve DA yöntemlerinin ortalama olarak aynı sonucu verdiği ve TSA'dan daha iyi uygunluk fonksiyonu değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Bu yöntemler arasındaki karşılaştırma, aralıklı talep envanter kontrol problemi için yapılmıştır. Metasezgisel yöntemler, farklı problemlerde farklı sonuçlar ve performanslar gösterebilir. Bir yöntem her zaman diğer yöntemlerden üstün olmayabilir. Bu sonuçları yalnızca bu çalışmadaki problem çerçevesinde değerlendirmek gerekir.

Bu çalışma ile aralıklı taleplerin envanter yönetiminde stok için bir üst sınır bulunmuştur. Ancak pratikte sadece üst sınırı belirlemek yetersiz kalabilir. Çünkü sipariş vermek veya üretim yapmak için bir yeniden sipariş/üretim noktası belirlemek gerekir. Bu aynı zamanda bir alt sınır da yaratır. Bu iki sınırın entegre bir şekilde hesaplanması gerekir. Bu çalışma ile hem yeniden sipariş/üretim noktası belirlenmiş hem de sipariş/üretim miktarı üst sınıra kadar planlanmıştır. Bu iki limitin dengeli bir şekilde optimize edilmesi, yönetsel açıdan şu önemli katkıları sağlamıştır:

1. Kayıp satışları ortadan kaldırarak müşteri memnuniyetinin artırılması,
2. Optimize edilmiş stok limitlerine göre üretim planlarının güncellenmesi,
3. Üst stok limiti ile stok miktarlarının azaltılması,
4. Aralıklı talebin değişken yapısına göre sipariş miktarlarının ayarlanması

Bu yaklaşım, tedarik zincirine yaptığı katkılarla, sadece kısa vadede değil, uzun vadede de şirketleri rekabet avantajı açısından güçlendirmektedir. Önerilen modelin, büyük veya küçük her şirket tarafından kullanılabilir olacak esnek bir yapıya sahip olması da işletmeler için büyük bir avantajdır.

Modelin uygulanabilirliği aralıklı talepleri temel almasına rağmen, her türlü talep ile çalışma esnekliğine sahiptir. Önerilen model gerçek hayat problemlerine tamamen uygulanabilir. Ancak, bu çalışmada model, talebin aralıklı olduğu varsayımına odaklanmaktadır. Bu durumda, modelin bazı sınırlamaları ortaya çıkmaktadır:

1. Veriler aralıklı talebin istatistiklerini (ADI ve CV) sağlamalıdır.
2. Geçmiş dönem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır.
3. Aralıklı talep belirli bir zaman diliminde meydana geldiğinden geçmiş veriler eksiksiz, doğru ve tutarlı olmalıdır.
4. Matematiksel bir model tarafından uygun bir çözüm sağlanamadığı için metasezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.

Bu çalışmanın en önemli pratik çıkarımı, stok seviyesi optimizasyonu ile pratikte müşteri memnuniyetini sağlamaktır. Uygun stok seviyeleri, kayıp satışları önler ve maliyetlerini azaltır. Önerilen yaklaşım, pratikte aralıklı taleplerle çalışan işletmelerin stok yönetimine büyük katkılar sağlar. Stok maliyetleri ile kayıp satış maliyetleri arasında bir denge kurarak işletmeler üretim planlarını güncelleyebilir. Çalışmanın pratik çıkarımları şu şekilde sıralanabilir:

1. Metasezgisel yöntemler yardımıyla stok limitleri için uygun çözümler daha hızlı sağlanmış ve Markov sürecine entegre bir yapı tasarlanarak aralıklı talepler için stok seviyesi optimizasyonu yapılmıştır.

2. Bu çalışmaya göre, aralıklı talepler için geçmiş verilerle belirlenen stok limitleri geçmiş veriler için iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, bu limitler gelecekteki belirsizliğin olumsuz etkilerini karşılamaya çalışırken iyi sonuçlar vermemiştir.

3. Gelecekteki aralıklı talep hakkındaki belirsizlik, hesaplanan stok limitlerinin güvenilirliğini değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu ihtiyaç, Markov zinciri ile entegre edilmiş metasezgisel yöntemlerle karşılanmıştır. Bu yaklaşımla oluşturulan aralıklı talebin stok limitleri, geçmiş veriler kullanılarak hesaplanan stok limitlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir.

4. Envanter yönetiminde aralıklı talepten kaynaklanan yüksek maliyetler (stok maliyeti, kayıp satış maliyeti, sipariş maliyeti vb.) önerilen Markov yaklaşımıyla azalmıştır.

5. Üçüncü aşamada yapılan istatistiksel karşılaştırma sonucunda metasezgisel yöntemlerin aralıklı talep stok yönetiminde yaklaşık olarak benzer sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Gelecekteki çalışmalarda, önerilen yaklaşım hibrit metasezgiseller veya hiper sezgisellerle karşılaştırmalı analizler yapılarak genişletilebilir. Önerilen model bozulabilir aralıklı talep ürünleri için geliştirilerek fazla stokların yeniden kullanımı veya kayıp satışın dışında bozulabilir ürünlerin geri kazanımı gibi yaklaşımlar eklenebilir.



## KAYNAKLAR

- Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., & Mirjalili, S. (2021). African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107408.
- Abdollahzadeh, B., Soleimanian Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Artificial gorilla troops optimizer: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(10), 5887-5958.
- Abedsoltan, H., Golmohammadi, A. M., Goli, A., & Ali, I. (2023). Multi-objective dragonfly algorithm for optimizing a sustainable supply chain under resource sharing conditions. *Computers & Industrial Engineering*, 109837.
- Agin, N. (1966). A min-max inventory model. *Management Science*, 12(7), 517-529.
- Albayrak Ünal, Ö., Erkeyman, B., & Usanmaz, B. (2023). Applications of artificial intelligence in inventory management: A systematic review of the literature. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(4), 2605-2625.
- Albraikan, A. A., Khalid, M., Alruwais, N., Hasanin, T., Dutta, A. K., Mohsen, H., ... & Ibrahim, S. S. (2023). Automated Red Palm Weevil Detection using Gorilla Troops Optimizer with Deep Learning Model. *IEEE Access*.
- Ali, Z. A. (2016). Concentric tabu search algorithm for solving traveling salesman problem (Master's thesis, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)).
- Altay, N., Rudisill, F., & Litteral, L. A. (2008). Adapting Wright's modification of Holt's method to forecasting intermittent demand. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 389-408.
- Archetti, C., Guastaroba, G., Huerta-Muñoz, D. L., & Speranza, M. G. (2021). A kernel search heuristic for the multivehicle inventory routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 28(6), 2984-3013.
- Axsäter, S. (2015). *Inventory control* (Vol. 225). Springer.
- Babai, M. Z., Dallery, Y., Boubaker, S., & Kalai, R. (2019). A new method to forecast intermittent demand in the presence of inventory obsolescence. *International Journal of Production Economics*, 209, 30-41.
- Babai, M. Z., Ladhari, T., & Lajili, I. (2015). On the inventory performance of multi-criteria classification methods: empirical investigation. *International Journal of Production Research*, 53(1), 279-290.
- Babai, M., Chen, H., Syntetos, A., & Lengu, D. (2020). A compound-Poisson Bayesian approach for spare parts inventory forecasting. *International Journal of Production Economics*, 107954.
- Bahadoran Baghbadorani, S., Johari, S. A., Fakhri, Z., Khaksar Shahmirzadi, E., Navruzbeq Shavkatovich, S., & Lee, S. (2022). A New Version of African Vulture Optimizer for Apparel Supply Chain Management Based on Reorder Decision-Making. *Sustainability*, 15(1), 400.

- Balugani, E., Lolli, F., Gamberini, R., & Rimini, B. (2017). Inventory control system for intermittent items with perishability. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research(icpr)*.
- Balugani, E., Lolli, F., Gamberini, R., Rimini, B., & Babai, M. Z. (2019). A periodic inventory system of intermittent demand items with fixed lifetimes. *International Journal of Production Research*, 57(22), 6993-7005.
- Bermúdez, J. D., Segura, J. V., & Vercher, E. (2006). Improving demand forecasting accuracy using nonlinear programming software. *Journal of the operational research society*, 57(1), 94-100.
- Botter, R., & Fortuin, L. (2000). Stocking strategy for service parts—a case study. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Boutselis, P., & McNaught, K. (2019). Using Bayesian Networks to forecast spares demand from equipment failures in a changing service logistics context. *International Journal of Production Economics*, 209, 325-333.
- Brown, R. G. (1959). *Statistical forecasting for inventory control*. McGraw/Hill.
- Brown, R. G. (2004). *Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series*. Courier Corporation.
- Bundschuh, R. G., & Dezvane, T. M. (2003). How to make after-sales services pay off. *McKinsey Quarterly*(4), 116-127.
- Cavaliere, S., Garetti, M., Macchi, M., & Pinto, R. (2008). A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production planning & control*, 19(4), 379-396.
- Chen, M.-C., Hsu, C.-M., & Chen, S.-W. (2006). Optimizing joint maintenance and stock provisioning policy for a multi-echelon spare part logistics network. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 23(4), 289-302.
- Croston, J. D. (1972). Forecasting and stock control for intermittent demands. *Journal of the operational research society*, 23(3), 289-303.
- Dastani, M., Davoodi, S. M. R., Karbassian, M., & Moeini, S. (2022). Developing a mathematical model for a green closed-loop supply chain with a multi-objective gray wolf optimization algorithm. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 47(2), 127-150.
- Diabat, A., Abdallah, T., & Le, T. (2016). A hybrid tabu search based heuristic for the periodic distribution inventory problem with perishable goods. *Annals of Operations Research*, 242, 373-398.
- Dombi, J., Jónás, T., & Tóth, Z. E. (2018). Modeling and long-term forecasting demand in spare parts logistics businesses. *International Journal of Production Economics*, 201, 1-17.
- Dreyfuss, M., & Giat, Y. (2019). Allocating spares to maximize the window fill rate in a periodic review inventory system. *International Journal of Production Economics*, 214, 151-162.
- Duran, O., & Afonso, P. S. L. P. (2020). An activity based costing decision model for life cycle economic assessment in spare parts logistic management. *International Journal of Production Economics*, 222, 107499.
- Gass, S. I., & Harris, C. M. (1997). *Encyclopedia of operations research and management science*. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7), 759-760.

- Ghasemi, P., & Abolghasemian, M. (2023). A Stackelberg game for closed-loop supply chains under uncertainty with genetic algorithm and gray wolf optimization. *Supply Chain Analytics*, 4, 100040.
- Ghobbar, A. A., & Friend, C. H. (2002). Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations. *Journal of Air Transport Management*, 8(4), 221-231.
- Giacomelli, M., Pilati, F., & Brunelli, M. (2023, July). Integrated Approach of Lost-Sales Costing and Service Level Constraint for Continuous-Review Inventory Control. In *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 427-432). IEEE.
- Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*, 1(3), 190-206.
- Goldberg, D. (1999). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. 570 pp. Addison-Wesley Longman Publishing Company.
- Gürses, D., Mehta, P., Patel, V., Sait, S. M., & Yildiz, A. R. (2022). Artificial gorilla troops algorithm for the optimization of a fine plate heat exchanger. *Materials Testing*, 64(9), 1325-1331.
- Hasni, M., Aguir, M., Babai, M., & Jemai, Z. (2019). On the performance of adjusted bootstrapping methods for intermittent demand forecasting. *International Journal of Production Economics*, 216, 145-153.
- Hasni, M., Aguir, M., Babai, M., & Jemai, Z. (2019). Spare parts demand forecasting: a review on bootstrapping methods. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4791-4804.
- Hasni, M., Babai, M., Aguir, M., & Jemai, Z. (2019). An investigation on bootstrapping forecasting methods for intermittent demands. *International Journal of Production Economics*, 209, 20-29.
- Hekimoğlu, M. (2015). Spare parts management of aging capital products.
- Hillier, L., & Lieberman, G. J. (1980). *Introduction to Operations Research*. (1990). Ch. 4&5.
- Hoffman, K., & Padberg, M. (2001). Combinatorial and integer optimization. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 94-102.
- Hua, Z. S., Zhang, B., Yang, J., & Tan, D. S. (2007). A new approach of forecasting intermittent demand for spare parts inventories in the process industries. *Journal of the Operational Research Society*, 58(1), 52-61.
- Jahandideh-Tehrani, M., Jenkins, G., & Helfer, F. (2021). A comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for daily rainfall-runoff modelling: a case study for Southeast Queensland, Australia. *Optimization and Engineering*, 22(1), 29-50.
- Jamali, G., Sana, S. S., & Moghdani, R. (2018). Hybrid improved cuckoo search algorithm and genetic algorithm for solving Markov-modulated demand. *RAIRO-Operations Research*, 52(2), 473-497.
- Jiang, P., Huang, Y., & Liu, X. (2020). Intermittent demand forecasting for spare parts in the heavy-duty vehicle industry: a support vector machine model. *International Journal of Production Research*, 1-18.
- Johnston, F., & Boylan, J. E. (1996). Forecasting for items with intermittent demand. *Journal of the operational research society*, 47(1), 113-121.
- Kalchschmidt, M., Zotteri, G., & Verganti, R. (2003). Inventory management in a multi-echelon spare parts supply chain. *International Journal of Production Economics*, 81, 397-413.

- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks,
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kocer, U. U. (2013). Forecasting intermittent demand by Markov chain model. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 9(8), 3307-3318.
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). Applied design of experiments and Taguchi methods. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Lamghari-Idrissi, D., Basten, R., & van Houtum, G.-J. (2020). Spare parts inventory control under a fixed-term contract with a long-down constraint. *International Journal of Production Economics*, 219, 123-137.
- Lee, K., & Ozsen, L. (2020). Tabu search heuristic for the network design model with lead time and safety stock considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106717.
- Levén, E., & Segerstedt, A. (2004). Inventory control with a modified Croston procedure and Erlang distribution. *International Journal of Production Economics*, 90(3), 361-367.
- Levitt, T. (1965). Exploit the product life cycle (Vol. 43). Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Li, X., Zhao, X., & Pu, W. (2020). Battle damage-oriented spare parts forecasting method based on wartime influencing factors analysis and  $\epsilon$ -support vector regression. *International Journal of Production Research*, 58(4), 1178-1198.
- Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 199, 112027.
- Liu, M., Luo, K., Zhang, J., & Chen, S. (2021). A stock selection algorithm hybridizing grey wolf optimizer and support vector regression. *Expert Systems with Applications*, 179, 115078.
- Lolli, F., Balugani, E., Ishizaka, A., Gamberini, R., Rimini, B., & Regattieri, A. (2019). Machine learning for multi-criteria inventory classification applied to intermittent demand. *Production Planning & Control*, 30(1), 76-89.
- Lolli, F., Gamberini, R., Regattieri, A., Balugani, E., Gatos, T., & Gucci, S. (2017). Single-hidden layer neural networks for forecasting intermittent demand. *International Journal of Production Economics*, 183, 116-128.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (2008). Forecasting methods and applications. John Wiley & sons.
- Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27, 1053-1073.
- Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27, 1053-1073.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Mohammad Aghdam, S., Soleimani Gharehchopogh, F., & Masdari, M. (2021). Opinion Leader's Selection with Grey Wolf Optimizer Algorithm on Social Networks. *International Journal of Industrial Mathematics*, 13(2), 163-174.

- Mou, S., Robb, D. J., & DeHoratius, N. (2018). Retail store operations: Literature review and research directions. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 399-422.
- Nozari, H., Ghahremani-Nahr, J., & Szmelter-Jarosz, A. (2023). A multi-stage stochastic inventory management model for transport companies including several different transport modes. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 18(2), 134-144.
- Öztürk, A. (2005). *Yöneylem Araştırması, Ekin Kitabevi. Onuncu Baskı, Bursa.*
- Palanisamy, S., & Rajaguru, H. (2024). Leveraging Classifier Performance Using Heuristic Optimization for Detecting Cardiovascular Disease from PPG Signals. *Diagnostics*, 14(20), 2287.
- Panagiotidou, S. (2020). Joint optimization of spare parts ordering and age-based preventive replacement. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6283-6299.
- Parasuraman, K., & Elshorbagy, A. (2007). Cluster-based hydrologic prediction using genetic algorithm-trained neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 52-62.
- Pastore, E., Alfieri, A., & Zotteri, G. (2019). An empirical investigation on the antecedents of the bullwhip effect: Evidence from the spare parts industry. *International Journal of Production Economics*, 209, 121-133.
- Patil, M., Mukherji, P., & Wadhai, V. (2023). A novel hybrid optimization algorithm for depression detection using MRI and speech signal. *Biomedical Signal Processing and Control*, 86, 105046.
- Petropoulos, F., Kourentzes, N., & Nikolopoulos, K. (2016). Another look at estimators for intermittent demand. *International Journal of Production Economics*, 181, 154-161.
- Rahimi-Ghahroodi, S., Al Hanbali, A., Vliegen, I., & Cohen, M. A. (2019). Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging. *International Journal of Production Economics*, 212, 39-50.
- Resnick, S. I. (1992). *Adventures in stochastic processes. Springer Science & Business Media.*
- Risma, Y. M., & Utama, D. M. (2023). AVOA and ALO Algorithm for Energy-Efficient No-Idle Permutation Flow Shop Scheduling Problem: A Comparison Study. *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, 22(2), 126-141.
- Saatçioğlu, D., & Özçakar, N. (2016). Yapay sinir ağları yöntemi ile aralıklı talep tahmini. *Beykoz Akademi Dergisi*, 4(1), 1-32.
- Shaabani, H., & Kamalabadi, I. N. (2016). An efficient population-based simulated annealing algorithm for the multi-product multi-retailer perishable inventory routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 189-201.
- Silver, E. A. (1973). A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. *Prod. Inventory Manage.*, 2, 64-74.
- Snyder, R. (2002). Forecasting sales of slow and fast moving inventories. *European Journal of Operational Research*, 140(3), 684-699.
- Song, X., Chang, D., & Luo, T. (2023). A Single-Product Multi-Period Inventory Routing Problem under Intermittent Demand. *Information*, 14(6), 331.
- Srivastav, A., & Agrawal, S. (2017). Multi-objective optimization of slow moving inventory system using cuckoo search. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 1-7.

- Srivastav, A., & Agrawal, S. (2020). Multi-objective optimization of mixture inventory system experiencing order crossover. *Annals of Operations Research*, 290(1-2), 943-960.
- Stip, J., & Van Houtum, G.-J. (2020). On a method to improve your service BOMs within spare parts management. *International Journal of Production Economics*, 221, 107466.
- Syntetos, A. A., & Boylan, J. E. (2001). On the bias of intermittent demand estimates. *International Journal of Production Economics*, 71(1-3), 457-466.
- Syntetos, A. A., & Boylan, J. E. (2006). On the stock control performance of intermittent demand estimators. *International Journal of Production Economics*, 103(1), 36-47.
- Syntetos, A. A., Boylan, J. E., & Croston, J. D. (2005). On the categorization of demand patterns. *Journal of the operational research society*, 56(5), 495-503
- Taha, H. A. (1992). Markovian Decision Process. *Operations Research: An Introduction*, 5, 682-712.
- Tapia-Ubeda, F. J., Miranda, P. A., Roda, I., Macchi, M., & Durán, O. (2020). Modelling and solving spare parts supply chain network design problems. *International Journal of Production Research*, 1-21.
- Teunter, R. H., Syntetos, A. A., & Babai, M. Z. (2010). Determining order-up-to levels under periodic review for compound binomial (intermittent) demand. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 619-624.
- Tian, X., Wang, H., & Erjiang, E. (2021). Forecasting intermittent demand for inventory management by retailers: A new approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 62, 102662.
- Vahdani, M., Sazvar, Z., & Govindan, K. (2022). An integrated economic disposal and lot-sizing problem for perishable inventories with batch production and corrupt stock-dependent holding cost. *Annals of Operations Research*, 315(2), 2135-2167.
- Van der Auweraer, S., & Boute, R. (2019). Forecasting spare part demand using service maintenance information. *International Journal of Production Economics*, 213, 138-149.
- Wagner, S. M., Jönke, R., & Eisingerich, A. B. (2012). A strategic framework for spare parts logistics. *California management review*, 54(4), 69-92.
- Wilke, D. N. (2007). Analysis of the particle swarm optimization algorithm (Doctoral dissertation, University of Pretoria).
- Willemain, T. R., Smart, C. N., & Schwarz, H. F. (2004). A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of forecasting*, 20(3), 375-387.
- Yang, X. S., & Deb, S. (2009, December). Cuckoo search via Lévy flights. In 2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC) (pp. 210-214). Ieee.
- Yu, C., Lahrichi, N., & Matta, A. (2023). Optimal budget allocation policy for tabu search in stochastic simulation optimization. *Computers & Operations Research*, 150, 106046.
- Yuna, F., & Erkeyman, B. (2019). A metaheuristic approach for an inventory model with random demands. In *The 49th international conference on computers industrial engineering (CIE49)*.
- Yuna, F., & Erkeyman, B. (2021). A Genetic Algorithm-Based Model for Inventory Control in Intermittent Demands. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(32), 696-701.
- Yuna, F., Erkeyman, B., & Yılmaz, M. (2023). Inventory control model for intermittent demand: a comparison of metaheuristics. *Soft Computing*, 27(10), 6487-6505.

Zhang, R., Ren, H., Li, X., & Ding, Y. (2023). UAV Cluster Task Assignment Algorithm Based on Improved Artificial Gorilla Troops Optimizer. *IEEE Access*, 11, 135133-135146.



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı:</b>	Ferhat YUNA
<b>Doğum tarihi:</b>	
<b>Doğum Yeri:</b>	
<b>Uyruğu:</b>	
<b>Adres:</b>	
<b>E-mail:</b>	
Eğitim	
<b>Lise:</b>	Necdet Taş Anadolu Lisesi (2012)
<b>Lisans:</b>	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği (2017)
<b>Doktora (Bütünleşik):</b>	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
<b>İngilizce:</b>	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
<b>Makaleler</b>	
1. Yuna, F., Erkayman, B., & Yılmaz, M. (2023). Inventory control model for intermittent demand: a comparison of metaheuristics. <i>Soft Computing</i> , 27(10), 6487-6505.	
2. Yuna, F., & Erkayman, B. (2021). A Genetic Algorithm-Based Model for Inventory Control in Intermittent Demands. <i>Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi</i> , (32), 696-701.	
<b>Doktora süresince üretilmiş diğer yayınlar</b>	
<b>Makaleler</b>	
3. Yuna, F., & Erkayman, B. (2024). Heuristic Solution Approaches for Due Diligence in Disaster Management. <i>International Journal of Applied Optimization Studies</i> , 4(1).	
4. Yuna, F., Emeç, Ş., Albayrak, Ö., Kılıç, R., Usanmaz, B., & Erkayman, B., (2020). A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Data Center Location Selection. <i>Brilliant Engineering</i> , vol.1, no.1, 13-20.	
<b>Kitap Bölümü</b>	
5. Yuna, F., & Erkayman, B. (2023, May). Arc Routing Problem and Solution	

Approaches for Due Diligence in Disaster Management. In International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (pp. 382-387). Singapore: Springer Nature Singapore.

### **Bildiriler**

6. Yuna, F., & Erkayman, B. (2019). A metaheuristic approach for an inventory model with random demands. In The 49th international conference on computers industrial engineering (CIE49).

7. Yuna, F., Erkayman, B., & Yılmaz, M., (2018). Arc Routing Problem and Solution Approaches in Directed Networks. International Symposium on Applied Sciences And Engineering (pp.183). Erzurum, Turkey

8. Yuna, F., Adar, T., Emeç, Ş., Kılıç Delice, E., & Akkaya, G., (2019). Investigation of the effect of the number of criteria on the threshold value in Autocratic MAGDM methodology based on Interval valued intuitionistic fuzzy set (IVIF): An application via MATLAB software. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (pp.1148-1156). Bayburt, Turkey

9. Kılıç, R., Albayrak Ünal, Ö., Yuna, F., & Erkayman, B., (2023). Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması ile Otomotiv Yedek Parçaları için Stok Kontrol Modeli. 42. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi (pp.28). Gaziantep, Turkey