



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OTOMOTİV ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME
MODELLERİ İLE OPTİMAL ROBOT YATIRIM KARARLARININ
BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

İhsan TURHAN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Melih CAN**

**ALANYA
2026**

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME
MODELLERİ İLE OPTİMAL ROBOT YATIRIM KARARLARININ
BELİRLENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

İhsan TURHAN

Anabilim Dalı: İşletme Mühendisliği

Program Adı: İşletme Mühendisliği

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Melih CAN

ALANYA

(2026)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

İhsan TURHAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, engin sabrı ve yol gösterici fikirleriyle desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih Can'a ve değerli katkıları adına jüri üyeleri hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu ve uzun süreçte bana olan inançlarını bir an bile kaybetmeyen, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Onların varlığı, bu çalışmayı tamamlamamdaki en büyük gücüm olmuştur.

İhsan TURHAN

ÖZET

OTOMOTİV ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME MODELLERİ İLE OPTİMAL ROBOT YATIRIM KARARLARININ BELİRLENMESİ

İhsan TURHAN

İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Mart, 2026 (85 Sayfa)

Küresel imalat sektörü, Endüstri 4.0 paradigmasının etkisiyle köklü bir yapısal dönüşüm içerisindedir. Bu ekosistemin sürükleyici unsurlarından olan otomotiv sanayisinde; tolerans sınırlarının daralması, ürün yaşam döngülerinin kısalması ve hata payını sıfıra indirme hedefleri, konvansiyonel üretim pratiklerini yetersiz kılmaktadır. Bilhassa araç emniyeti ve yapısal mukavemet açısından kritik bir konuma sahip olan BIW (beyaz gövde) hattındaki kaynak süreçleri, barındırdığı yüksek hassasiyet gereksinimi sebebiyle robotik otomasyon sistemlerinin en yoğun entegre edildiği alanlardan biri haline gelmiştir. Öte yandan, bu sistemlerin gerektirdiği yüksek sermaye yatırımları ve teknolojik demode olma (eskime) riski, doğru endüstriyel robotun seçilmesini işletmeler adına stratejik bir karar problemi biçimine dönüştürmektedir.

Bu çalışmada, otomotiv yan sanayi bünyesindeki bir kaynak hattının modernizasyonu kapsamında en elverişli endüstriyel robotun seçimine odaklanan bütünsel bir karar modeli geliştirilmiştir. Araştırma metodolojisinde, değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması aşamasında FUCOM yöntemi; alternatiflerin öncelik sırasının belirlenmesinde ise MARCOS yöntemi entegre biçimde uygulanmıştır. Geliştirilen model kapsamında, sektörde derin tecrübeye sahip altı uzmanın yargılarına başvurulmuş; teknik performans, finansal kısıtlar ve dijitalleşme uyumu boyutlarını kapsayan dokuz temel kriter temelinde dokuz farklı küresel robot markası analize tabi tutulmuştur.

Araştırmadan elde edilen bulgular, "Yatırım Maliyetleri" kriterinin en yüksek ağırlık derecesine sahip olduğunu, bu parametreyi ise sırasıyla "Dijitalleşme/Uyumluluk" ve "Çalışma Hızı" kriterlerinin izlediğini göstermektedir. MARCOS algoritması sonucunda elde edilen sıralamada A9 alternatifi, teknik yetkinlik

ile mali kararlılık arasında en optimal dengeyi kurarak ilk sırada yer almıştır. Son aşamada gerçekleştirilen 90 farklı senaryolu duyarlılık analizi ise önerilen karar modelinin, kriter ağırlıklarındaki olası dalgalanmalara karşı son derece dirençli ve yüksek kararlılıkta sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: Otomotiv Endüstrisi, Endüstriyel Robot Seçimi, Çok Kriterli Karar Verme, FUCOM, MARCOS.



ABSTRACT

DETERMINATION OF OPTIMAL ROBOT INVESTMENT DECISIONS IN AUTOMOTIVE MANUFACTURING PROCESSES USING MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING MODELS

İhsan TURHAN

Department of Management Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

March, 2026

The global manufacturing industry is currently experiencing a profound structural transformation under the influence of the Industry 4.0 paradigm. Within this evolving ecosystem, the automotive sector has emerged as one of the principal driving forces, where increasingly stringent tolerance requirements, shortened product life cycles, and the pursuit of near-zero defect production have progressively exposed the limitations of conventional manufacturing practices. In particular, welding processes carried out in the Body-in-White (BIW) line, which play a critical role in ensuring vehicle safety and structural durability, have become among the most intensively automated production stages due to their demanding precision requirements. Nevertheless, the substantial capital expenditures associated with these systems, coupled with the risk of technological obsolescence, have transformed the selection of the most appropriate industrial robot into a strategically significant decision-making problem for manufacturing enterprises.

In this study, a comprehensive decision-making framework was developed to identify the most suitable industrial robot for the modernization of a welding line within the automotive supplier industry. Within the proposed research methodology, the FUCOM method was employed to determine the relative importance of the evaluation criteria, while the MARCOS method was integrated to establish the priority ranking of the alternatives. During the construction of the model, the judgments of six experts possessing extensive sectoral experience were incorporated, and nine globally recognized robot brands were evaluated according to nine fundamental criteria encompassing technical performance, financial constraints, and digitalization compatibility dimensions.

The findings of the study indicate that the “Investment Costs” criterion possessed the highest significance weight, followed respectively by the “Digitalization/Interoperability” and “Operating Speed” criteria. According to the ranking results obtained through the MARCOS algorithm, alternative A9 achieved the highest overall performance by establishing the most balanced compromise between technical competence and financial sustainability. Furthermore, the sensitivity analysis conducted through 90 distinct scenarios demonstrated that the proposed decision model produces highly stable and resilient outcomes against potential fluctuations in criterion weights.

Keywords: Automotive Industry, Industrial Robot Selection, Multi-Criteria Decision Making , FUCOM, MARCOS.

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	4
2.1. Otomotiv Endüstrisinde Üretim Süreçleri ve Robotik Sistemler	6
2.2. Endüstriyel Robot Kullanım Alanları	8
2.2.1. Kaynak işlemleri	8
2.2.2. Boya ve yüzey kaplama	9
2.2.3. Güç Aktarma organları.....	9
2.2.4. Son montaj ve döşeme	10
2.2.5. Esnek ve fikstürsüz montaj	10
2.3. Endüstriyel Robot Seçiminde Etkili Olan Faktörler	11
2.3.1. Finansal fizibilite ve toplam sahip olma maliyeti	11
2.3.2. Organizasyonel ölçek ve istihdam etkisi.....	11
2.3.3. Esneklik ve geleceğe uyumluluk.....	12
2.3.4. İş güvenliği ve alan verimliliği	12
2.3.5. Bilimsel karar verme ve çok kriterli analiz.	12
2.4. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV)	13
2.4.1. Karar verme süreçleri	14
2.4.2. ÇKKV'nin yeri ve önemi.....	14
2.4.3. Literatürde kullanılan temel ÇKKV yöntemleri	15
2.4.3.1. AHP	16
2.4.3.2. TOPSIS	16
2.4.3.3. SAW	16

2.4.3.4. ELECTRE	16
2.4.3.5. VIKOR	16
2.4.4. Araştırma kapsamında kullanılan ÇKKV yöntemlerinin literatürdeki yeri	17
2.4.4.1. FUCOM yöntemi ile ÇKKV problemleri uygulamaları	18
2.4.4.2. MARCOS yöntemi ile ÇKKV problemleri uygulamaları.....	19
2.4.5. ÇKKV yöntemleriyle robot seçimi çalışmaları.....	20
3. YÖNTEM.....	23
3.1. Araştırma Metodolojisi ve Akış Şeması	23
3.2. FUCOM Yöntemi ve Adımları	25
3.2.1. Kriterlerin sıralanması.....	26
3.2.2. Karşılaştırmalı önceliklerin belirlenmesi	26
3.2.3. Ağırlık katsayıları için temel koşul	27
3.2.4. Matematiksel geçişlilik koşulu.....	27
3.2.5. Tutarlılık sapması ve nihai model	28
3.3. MARCOS Yöntemi ve Adımları.....	28
3.3.1. Başlangıç karar verme matrisinin oluşturulması.....	29
3.3.2. Genişletilmiş başlangıç matrisinin oluşturulması	29
3.3.3. Genişletilmiş başlangıç matrisinin normalize edilmesi.....	29
3.3.4. Ağırlıklı matrisin belirlenmesi	30
3.3.5. Alternatiflerin fayda derecelerinin hesaplanması.....	30
3.3.6. Alternatiflerin fayda fonksiyonunun belirlenmesi	31
3.3.7. Alternatiflerin sıralanması.....	31
3.4. Araştırmada Kullanılan Kriter ve Alternatifler	31
3.4.1. Kriterlerin belirlenmesi	32
3.4.1.1. Taşıma kapasitesinin önemi	32
3.4.1.2. Erişim mesafesinin önemi	32
3.4.1.3. Hassasiyetin Önemi.....	33
3.4.1.4. Entegrasyon kolaylığı ve sistem esnekliğinin önemi	33
3.4.1.5. Yatırım maliyetlerinin önemi	33
3.4.1.6. Çalışma hızı ve çevrim süresinin önemi	33
3.4.1.7. Bakım kolaylığının önemi.....	34
3.4.1.8. Dijitalleşme ve uyumluluğun önemi	34

3.4.1.9. İşletme ve bakım giderlerinin önemi.....	34
3.4.2. Alternatiflerin belirlenmesi	35
3.4.3. Karar vericilerin belirlenmesi	36
4. BULGULAR.....	38
4.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi	38
4.2. Problemin Tanımı.....	39
4.3. Kriter Ağırlıklarının FUCOM Yöntemi ile Belirlenmesi.....	40
4.3.1. Kriterlerin sıralanması.....	41
4.3.2. Karşılaştırmalı önceliklerin belirlenmesi	41
4.3.3. Ağırlık katsayıları için temel koşul	42
4.3.4. Matematiksel geçişlilik koşulu.....	43
4.3.5. Ağırlık katsayılarının belirlenmesi için model.....	44
4.3.6. Nihai ağırlık katsayıları.....	45
4.4. Alternatiflerin MARCOS Yöntemi ile Sıralanması	48
4.4.1. Başlangıç karar verme matrisinin oluşturulması.....	49
4.4.2. Genişletilmiş başlangıç matrisinin oluşturulması	50
4.4.3. Genişletilmiş başlangıç matrisinin normalize edilmesi.....	51
4.4.4. Ağırlıklı matrisin belirlenmesi	52
4.4.5. Alternatiflerin fayda derecelerinin hesaplanması.....	53
4.4.6. Alternatiflerin fayda fonksiyonunun belirlenmesi	54
4.4.7. Alternatiflerin sıralanması.....	54
4.5. Duyarlılık Analizi.....	55
5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
6. KAYNAKÇA.....	64
7. EKLER.....	73
EK-1: Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri	73
EK-2: Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu.....	75
EK-3: Duyarlılık Analizi Senaryoları	77
EK-4: Etik Kurul Raporu	85
ÖZGEÇMİŞ	86

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatürdeki Robot Seçimi Çalışmaları	21
Tablo 3.1. Kriter Açıklamaları	35
Tablo 3.2. Alternatif Robot Markaları	36
Tablo 3.3. Karar Verici Profilleri	37
Tablo 4.1. Karar Verici 1'in FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri	40
Tablo 4.2. Karar Verici 1 İçin Kriterlerin Önem Sırası ve Önem Dereceleri	41
Tablo 4.3. Karar Verici 1 İçin Kriterlerin Karşılaştırmalı Öncelik Değerleri	41
Tablo 4.4. Karar Verici 1 İçin Karşılaştırmalı Öncelik Vektörü	42
Tablo 4.5. Karar Verici 1 İçin FUCOM Ağırlık Katsayıları Koşulu	42
Tablo 4.6. Karar Verici 1 İçin FUCOM Geçişlilik Koşulu	43
Tablo 4.7. Karar Verici 1 İçin Ağırlık Katsayılarını Belirleyen Model	44
Tablo 4.8. Karar Verici 1 İçin Kriterlere Ait Ağırlık Katsayıları	45
Tablo 4.9. Karar Vericilere Ait Kriter Ağırlıkları	45
Tablo 4.10. Geometrik Ortalama Sonuçları ve Nihai Kriter Ağırlıkları	46
Tablo 4.11. KV1 İçin MARCOS Değerlendirmesi (Karar Matrisi)	58
Tablo 4.12. Başlangıç Karar Karar Matrisi	50
Tablo 4.13. Birleştirilmiş ve Genişletilmiş Karar Matrisi (İdeal ve Anti-İdeal)	50
Tablo 4.14. Normalize Edilmiş Matris	52
Tablo 4.15. Ağırlıklı Normalize Matris	52
Tablo 4.16. Fayda Dereceleri (K- ve K+)	53
Tablo 4.17. Fayda Fonksiyonları Değerleri [$f(K^-)$, $f(K^+)$, $f(K_i)$]	54
Tablo 4.18. Nihai Sıralama Sonuçları	55
Tablo 4.19. C1 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	57
Tablo Ek.1 Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri	73
Tablo Ek.2 Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri	74
Tablo Ek.3 Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu	75
Tablo Ek.4 Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu	76
Tablo Ek.5 C2 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	77
Tablo Ek.6 C3 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	78
Tablo Ek.7 C4 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	79
Tablo Ek.8 C5 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	80
Tablo Ek.9 C6 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	81

Tablo Ek.10 C7 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	82
Tablo Ek.11 C8 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	83
Tablo Ek.12 C9 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları	84



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Araştırma Metodolojisi Akış Şeması.....	24
Şekil 4.1. Kriter Ağırlıklarındaki %10 Değişim Senaryosu Altında Alternatiflerin Sıralama Duyarlılığı	58
Şekil 4.2. Kriter Ağırlıklarındaki %50 Değişim Senaryosu Altında Alternatiflerin Sıralama Duyarlılığı	59
Şekil 4.1. Kriter Ağırlıklarındaki %100 Değişim Senaryosu Altında Alternatiflerin Sıralama Duyarlılığı	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

A1	Alternatif Robot 1
AAI	Anti-İdeal Çözüm
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
AI	İdeal Çözüm / Yapay Zekâ
ANP	Analitik Ağ Süreci
ARAS	Toplamsal Oran Değerlendirme Yöntemi
BIW	Ham Gövde (Body-in-White)
BWM	En İyi-En Kötü Yöntemi (Best-Worst Method)
C1	Kriter 1
CRITIC	Kriterler Arası Korelasyona Dayalı Önem Derecelendirme
ÇAKV	Çok Amaçlı Karar Verme (Multi-Objective Decision Making)
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme (Multi-Criteria Decision Making)
ÇNKV	Çok Nitelikli Karar Verme (Multi-Attribute Decision Making)
DFC	Tam Tutarlılıktan Sapma (Deviation from Full Consistency)
ELECTRE	Gerçekliği İfade Eden Eleme ve Seçim Yöntemi
FTA	Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis)
FUCOM	Tam Tutarlılık Yöntemi (Full Consistency Method)
IP	Giriş Koruma Sınıfı (Ingress Protection)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IVF	Aralık Değerli Bulanık (Interval-Valued Fuzzy)
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği (Occupational Health and Safety)
COPRAS	Karmaşık Oransal Değerlendirme Yöntemi
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler
KV	Karar Verici
MARCOS	Uzlaşık Çözüme Göre Alternatiflerin Ölçülmesi ve Sıralanması
MCDM	Çok Kriterli Karar Verme (Multi-Criteria Decision Making)
MEREC	Kriterlerin Çıkarılma Etkilerine Dayalı Yöntem
MOORA	Oran Analizi Temelli Çok Amaçlı Optimizasyon
PROMETHEE	Tercih Sıralama Organizasyonu Yöntemi
ROI	Yatırım Getirisi (Return on Investment)
SAW	Basit Toplam Ağırlıklandırma (Simple Additive Weighting)

SLR	Sistematiik Literatür Taraması (Systematic Literature Review)
SPC	İstatistiksel Proses Kontrolü (Statistical Process Control)
SWARA	Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi
TCO	Toplam Sahip Olma Maliyeti (Total Cost of Ownership)
TODIM	Etkileşimli Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi
TOPSIS	İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniğı
VIKOR	Uzlaşık Çözüm Yöntemi
VOC	Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)
VZA	Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis)



1. GİRİŞ

Küresel üretim sistemleri, dijitalleşme ve Endüstri 4.0 paradigması ile köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Özellikle otomotiv sektörü; kalite beklentilerinin artması, ürün yaşam döngülerinin kısalması ve küresel rekabetin yoğunlaşması nedeniyle bu dönüşümün öncü alanlarından biri olarak kabul edilmektedir (Dalenogare vd., 2018). Günümüz üretim anlayışı, yalnızca maliyet odaklı değil; aynı zamanda esneklik, izlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve sıfır hata prensipleri üzerine inşa edilmektedir (Bechchar vd., 2025).

Bu dönüşümün merkezinde yer alan robotik otomasyon sistemleri, üretimde standardizasyonu artıran, çevrim sürelerini optimize eden ve insan kaynaklı varyasyonları minimize eden stratejik teknolojiler olarak değerlendirilmektedir (Bucko vd., 2020; Shanmugasundar vd., 2023). Ancak robot yatırımları yüksek sermaye gereksinimi, teknolojik eskime riski ve entegrasyon karmaşıklığı nedeniyle işletmeler için önemli bir karar problemine dönüşmektedir (Gamal & Mohamed, 2023; Höse vd., 2023).

Otomotiv üretim süreçleri içerisinde özellikle gövde üretim hatları, hata toleransının en düşük olduğu ve ürün güvenliğini doğrudan etkileyen kritik aşamalardır (Sayem vd., 2022). Bu hatlarda gerçekleştirilen kaynak operasyonlarının otomasyonu, kalite güvence, iş sağlığı ve operasyonel verimlilik açısından önemli avantajlar sunsa da uygun robotun seçimi çok sayıda teknik ve ekonomik kriterin eş zamanlı değerlendirilmesini gerektirmektedir (Tiburtino vd., 2023).

Küresel otomotiv endüstrisi, teknolojik inovasyonun ve pazar dinamiklerinin en hızlı değiştiği sektörlerin başında gelmektedir. Günümüzde otomotiv üreticileri, yalnızca araç üretmekle kalmayıp, aynı zamanda artan küresel rekabet, kısalan ürün yaşam döngüleri ve "sıfır hata" odaklı kalite standartları ile mücadele etmek zorundadır. Bu zorlayıcı ortam, geleneksel manuel üretim yöntemlerinin sınırlarını zorlamakta ve üretim hatlarının, özellikle de aracın yapısal bütünlüğünü belirleyen kaynak operasyonlarının, robotik otomasyon sistemlerine geçişini bir zorunluluk haline getirmektedir. Bu çalışmanın temelini oluşturan problem; yüksek yatırım maliyeti gerektiren bu teknolojik dönüşüm sürecinde, işletmenin stratejik hedeflerine en uygun robotik sistemin rasyonel ve bilimsel yöntemlerle seçilememesi riskidir. Otomotiv üretiminde karşılaşılan temel problemlerin başında, insan faktörüne dayalı varyasyonların neden olduğu "kalitesizlik maliyetleri" gelmektedir. Manuel kaynak süreçlerinde operatörün fiziksel yorgunluğu, dikkat dağınıklığı veya çevresel faktörler, kaynak dikişlerinde milimetrik sapmalara ve

dolayısıyla yapısal kusurlara yol açabilmektedir (Teli vd., 2013). Bu tür üretim hataları, nihai üründe güvenliği tehlikeye atarken, işletme için maliyetli geri çağırma süreçlerine ve marka prestijinin kaybına neden olmaktadır. Bu bağlamda, robotik sistemler sadece bir üretim aracı değil, aynı zamanda üretimde standardizasyonu sağlayan ve hatalı parça üretim maliyetlerini minimize eden bir kalite güvence mekanizması olarak kuramsal bir değer taşımaktadır (Bilgin vd., 2024).

Konuya iş sağlığı ve güvenliği perspektifinden bakıldığında, kaynak operasyonları yüksek radyasyon, zehirli gaz salınımı, gürültü ve ergonomik zorluklar barındıran "tehlikeli" sınıftaki işlemlerdir. Manuel kaynak yapan operatörlerin kas-iskelet sistemi hastalıklarına yakalanma riski ve uzun vadeli sağlık sorunları, işletmeler için iş gücü kaybı ve yasal sorumluluklar oluşturmaktadır. Üretim süreçlerinin insansızlaştırılarak robotik hücrelere devredilmesi, iş kazalarını minimize ederken, operatörlerin daha nitelikli ve düşük riskli denetleme görevlerine kaydırılmasına olanak tanıyarak kurumsal sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Hamizatun vd., 2023; Salvador, 2023). Bu teknik ve insani zorluklara ek olarak, otomotiv işletmelerinin karşı karşıya olduğu bir diğer temel baskı, artan üretim hızı beklentileri ve dijitalleşme gereksinimleridir.

Pazar sınırlarının ortadan kalktığı küresel ekonomide, üretim hızı ve çevrim sürelerinin optimizasyonu, karlılığın en temel belirleyicisi konumuna gelmiştir. Manuel hatlarda karşılaşılan darboğazlar, değişken talep hızına yanıt vermeyi zorlaştırmakta ve birim başına düşen üretim maliyetini artırmaktadır (Bucko vd., 2020). İşletmelerin pazardaki konumlarını koruyabilmeleri için üretim hatlarını sürekli olarak modernize etmeleri ve "yalın üretim" prensipleri doğrultusunda israfları ortadan kaldırmaları gerekmektedir. Robotik otomasyon, 7/24 kesintisiz ve yüksek hassasiyetle çalışma yeteneği sayesinde çevrim sürelerini minimize ederek işletmelere operasyonel bir çeviklik kazandırmaktadır (Das, 2024).

Endüstri 4.0 kavramının getirdiği dijitalleşme baskısı, üretim süreçlerinin sadece fiziksel olarak değil, verisel olarak da yönetilmesini gerektirmektedir. Akıllı fabrikalar vizyonu çerçevesinde, üretim hattındaki her bir bileşenin birbiriyle haberleşmesi ve üretim verilerinin gerçek zamanlı olarak analiz edilmesi beklenmektedir (Dalenogare vd., 2018). Manuel süreçlerde veri toplama ve izlenebilirlik kısıtlıyken; robotik sistemler, yapay zekâ entegrasyonu ve sensör teknolojileri sayesinde üretim sürecinin her aşamasında veri üretmekte ve bu veriler üzerinden dijital ikiz uygulamalarına olanak

tanımlanmaktadır. Bu teknolojik altyapı, arıza tahminlemeden kalite kontrolüne kadar geniş bir alanda karar destek süreçlerini beslemektedir (Raffik vd., 2023).

Kalite, hız, dijital dönüşüm ve iş güvenliği gibi çok boyutlu baskılar altında olan otomotiv işletmeleri için robot yatırımı kaçınılmaz bir hamledir. Ancak, onlarca farklı teknik parametre ve ekonomik kısıt arasından en doğru robotun seçilmesi, subjektif yargılardan arındırılmış, matematiksel temelli çok kriterli bir karar verme süreci gerektirmektedir. Bu çalışma, bahsedilen bu karmaşık problem setine FUCOM (Full Consistency Method) ve MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) yöntemlerini entegre ederek bilimsel bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır.

Literatürde robot seçimine yönelik çeşitli çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri uygulanmış olmakla birlikte, kriter ağırlıklandırmasında yüksek tutarlılık sağlayan FUCOM yöntemi ile uzlaşık çözüm temelli sıralama yapan MARCOS yönteminin otomotiv kaynak robotu seçimi problemine entegre edildiği bütüncül bir modele rastlanmamıştır. Bu durum, mevcut çalışmalar açısından metodolojik bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermeyi amaçlamakta ve otomotiv sektöründe kaynak robotu seçimi problemine yönelik entegre bir FUCOM–MARCOS karar modeli önermektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen çok kriterli karar destek modelinin yalnızca optimal bir alternatif belirlemesi değil, aynı zamanda elde edilen sonuçların güvenilir ve tutarlı olup olmadığının değerlendirilmesi de amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, kriter ağırlıklarında meydana gelebilecek olası değişimlerin robot alternatiflerinin sıralamaları üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile incelenmiştir. Böylece önerilen FUCOM–MARCOS bütünleşik modelinin, farklı senaryo koşulları altında sonuç kararlılığını koruyup korumadığı test edilerek modelin karar vericiler açısından güvenilirliği analiz edilmiştir. Önerilen modelin, hem akademik literatüre metodolojik katkı sağlaması hem de sektörel karar vericilere rasyonel ve matematiksel temelli bir yatırım çerçevesi sunması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR

Otomotiv endüstrisi, küresel rekabetin ve teknolojik dönüşümün en yoğun yaşandığı sektörlerin başında gelmektedir. Üretim hatlarındaki otomasyon seviyesinin artması, robotik sistemlerin entegrasyonu ve değişen pazar dinamikleri, işletmeleri hem teknik altyapılarını güçlendirmeye hem de yatırım kararlarını daha rasyonel temellere oturtmaya zorlamaktadır. Bu bağlamda hazırlanan bu bölüm, otomotiv üretim süreçlerinin teknik detaylarından başlayarak, bu süreçlerde karşılaşılan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan bilimsel karar verme yöntemlerine uzanan kapsamlı bir literatür incelemesi sunmaktadır.

İlk olarak endüstriyel robotların otomotiv üretimindeki rolü, kaynak ve montaj gibi operasyonel kullanım alanları ve işletmelerin bu teknolojilere geçiş sürecinde etkili olan finansal ve stratejik faktörler irdelenecektir. Ancak, artan teknolojik seçenekler ve maliyet baskısı, yöneticilerin karar verme süreçlerini zorlaştırmaktadır. Bu ihtiyaca yönelik olarak karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinin teorik altyapısı ve literatürdeki temel uygulamaları ele alınacaktır. Çalışmanın devamında bu çalışmanın metodolojik zeminini oluşturan FUCOM ve MARCOS yöntemleri detaylandırılarak, bu yöntemlerin matematiksel çerçevesi ve otomotiv sektöründeki güncel uygulama örnekleri üzerinde durulacaktır. Böylece, sektörün dinamikleri ile bilimsel karar verme araçları arasındaki ilişki bütüncül bir yaklaşımla ortaya konulmuştur.

Otomotiv endüstrisi, endüstriyel devrimlerin başlangıcından bu yana üretim teknolojilerindeki yeniliklerin test sahası olmuş ve robotik teknolojilerin en yoğun entegre edildiği sektör olma özelliğini korumuştur. Günümüzde binek otomobillerin ve ticari araçların üretimi, geleneksel içten yanmalı motor mimarisinden, batarya paketleri ve elektrik motorlarını içeren hibrit veya tam elektrikli sistemlere doğru evrilmektedir. Bu yapısal dönüşüm, araçların bileşen sayısını ve montaj karmaşıklığını artırarak, üretim süreçlerinin büyük bir kısmının endüstriyel robotlar ve bilgisayar kontrollü tezgahlar aracılığıyla yürütülmesini zorunlu kılmıştır. Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, otomotiv sektörü en otomatikleşmiş tedarik zinciri olarak kabul edilmekte ve dünya genelindeki toplam endüstriyel robot yatırımlarının yaklaşık %30'unu tek başına gerçekleştirmektedir (Tripathi, 2024).

Mevcut üretim tesisleri incelendiğinde, otomasyon seviyesinin fabrikaların her bölümünde homojen bir dağılım göstermediği görülmektedir. Ham gövde ve boyahane

bölümleri, robot yoğunluğunun ve otomasyonun neredeyse %100 seviyelerine ulaştığı alanlardır. Buna karşılık, araç içi donanımların, kabloların ve hassas parçaların yerleştirildiği Döşeme ve Son Montaj hatları, insan iş gücünün hala baskın olduğu alanlar olarak kalmıştır. Yapılan araştırmalar, modern otomotiv fabrikalarında gövde üretiminin tamamen robotlara emanet edildiğini, ancak son montaj hatlarındaki işçilik yoğunluğunun hala %95 seviyelerinde seyrettiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sektörün mevcut gelişim odak noktasının, insan elinin hassasiyetini gerektiren bu son aşamaların da otomatikleştirilmesi üzerine yoğunlaştığını göstermektedir (Choi vd., 2010).

Sektördeki üretim stratejileri, salt üretim kapasitesini artırmaktan ziyade, sıfır hata hedefine ulaşma ve kalite standartlarını sürdürülebilir kılma yönünde ilerlemektedir. Manuel üretim süreçlerinde operatör yorgunluğu, dikkat dağınıklığı veya ergonomik zorluklar nedeniyle ortaya çıkan değişkenlikler, nihai ürün kalitesinde sapmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle üreticiler, insan kaynaklı hata riskini minimize etmek ve üretim hattından çıkan her aracın aynı standartta olmasını garanti altına almak için robotik sistemlere geçiş yapmaktadır. Özellikle kaynak ve birleştirme gibi kritik işlemlerde robotların sağladığı tekrarlanabilirlik hassasiyeti, firmaların rekabet gücünü doğrudan etkileyen bir faktör haline gelmiştir (Subroto ve Sunitiyoso, 2025).

Günümüz otomotiv pazarında müşteri taleplerinin çeşitlenmesi ve ürün yaşam döngülerinin kısalması, fabrikaların "esnek üretim" yeteneklerini geliştirmesini zorunlu kılmıştır. Geçmişin rijit ve sadece tek bir model üretebilen sabit üretim hatları, yerini model değişimlerine hızla uyum sağlayabilen esnek robotik hücrelere bırakmaktadır. "Fikstürsüz montaj" gibi modern kavramlar sayesinde, üretim hatlarında maliyetli donanım değişikliklerine gidilmeden, aynı hat üzerinde sedan, hatchback veya SUV gibi farklı gövde tiplerinin ardışık olarak üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu esneklik, üreticilerin pazar dalgalanmalarına ve değişen tüketici tercihlerine anlık reaksiyon verebilmesini sağlamaktadır (Papakostas vd., 2011).

Sektördeki teknolojik dönüşümün sosyo-ekonomik boyutu incelendiğinde ise, robot kullanımının yaygınlaşmasının istihdam dinamiklerini değiştirdiği görülmektedir. Almanya gibi otomotiv sanayisinin güçlü olduğu ülkelerde yapılan araştırmalar, robot yatırımlarının işsizliğe yol açtığı yönündeki endişelerin aksine, firmaların verimlilik artışı sayesinde pazar paylarını büyüttüklerini ve bu büyümenin istihdamı koruyucu bir etki yarattığını göstermektedir. Ayrıca, üretim süreçlerinde insan ve robotun birbirinden izole çalıştığı eski paradigmlar yıkılmakta; sensörlerle donatılmış yeni nesil sistemler ve

yapay zekâ destekli "cobot"lar sayesinde, insan ve makinenin aynı çalışma alanını güvenle paylaştığı iş birlikçi bir üretim modeline geçilmektedir (Armbruster vd., 2006; Das, 2022).

2.1. Otomotiv Endüstrisinde Üretim Süreçleri ve Robotik Sistemler

Otomotiv endüstrisinde, özellikle aracın iskelet yapısını oluşturan BIW hattı, üretim sürecinin en kompleks ve hata payının en düşük olduğu aşamadır. Bu aşamada gerçekleştirilen kaynak operasyonlarının modernizasyonu, sadece yeni bir teknolojinin entegrasyonu değil, aynı zamanda mevcut manuel süreçlerin barındırdığı kronik sorunların bertaraf edilmesi sürecidir. Ancak bu dönüşüm, işletmeler için teknik ve operasyonel birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların odak noktasını; insan hatasının neden olduğu kalite değişkenliği, hataların izlenebilirliğindeki güçlükler ve üretim hattındaki darboğazlar oluşturmaktadır. BIW hattında manuel kaynak süreçlerinin devam etmesindeki en kritik zorluk, insan hatasından kaynaklanan kusurların öngörülemez doğasıdır. Yapılan araştırmalar, otomotiv punta kaynağı operasyonlarında kusur oranının %30'un üzerine çıkabildiğini ve bu hataların büyük bir kısmının ancak yıkıcı testler veya ultrasonik muayenelerle tespit edilebildiğini göstermektedir. Bu durum, hatalı üretilen parçaların ancak süreç tamamlandıktan sonra fark edilmesine, dolayısıyla devasa bir yeniden işleme maliyetine ve verimlilik kaybına yol açmaktadır. Manuel süreçlerin barındırdığı bu belirsizlik, işletmeleri kaliteyi garanti altına almak için rastgele örnekleme yöntemlerine zorlamakta, bu da üretim güvenilirliğini tesadüflere bırakmaktadır (Paulraj & Raj, 2021).

Kalite kontrol süreçlerinin manuel olarak yürütülmesi, otomotiv üretiminde "gizli maliyetlerin" en büyük kaynağıdır. Kaynak eklemlerinin muayenesi çalışanlar tarafından yapıldığında, işlem süresi uzamakta ve insan gözünün kaçırabileceği mikro seviyedeki kusurlar nedeniyle hatalı tanımlama riski artmaktadır (Machaca & Rojas, 2025). Bu tür izlenebilirlik eksiklikleri, hatalı ürünlerin son kullanıcıya ulaşması riskini doğurmakta ve markalar için milyonlarca dolarlık geri çağırma maliyetlerine ve telafisi imkânsız prestij kayıplarına zemin hazırlamaktadır. Dolayısıyla modernizasyonun önündeki temel engel, manuel kontrolün yarattığı bu düşük verimlilik ve yüksek hata maliyeti sarmalıdır (Lucatello & Sornkarn, 2018).

Modernizasyon sürecindeki bir diğer stratejik zorluk, üretim hattındaki darboğazların doğru tespit edilememesi ve yönetilememesidir. BIW sistemleri, birbirine entegre birçok istasyondan oluşur ve tek bir istasyondaki manuel yavaşlık veya hatalı

yapılandırma tüm tesisin çıktısını doğrudan etkilemektedir. Geleneksel yöntemlerle bu darboğazların kök nedenlerini saptamak ve dinamik üretim taleplerine göre hattı yeniden yapılandırmak oldukça güçtür. İşletmeler, modernizasyon kararı verirken mevcut hattın durdurulma maliyeti ile yeni sistemin getireceği yüksek istasyon kullanım oranı arasındaki dengeyi kurmakta zorlanmaktadır (Kshatra vd., 2019; Aguilar vd., 2024).

Buna ek olarak, kaynak operasyonlarında ihtiyaç duyulan nitelikli iş gücü açığı, modernizasyonu bir tercih olmaktan çıkarıp zorunluluğa dönüştürmektedir. Düşük alışımli ve yüksek mukavemetli çeliklerin tamiri ve kaynağı, operatörden yüksek düzeyde teknik beceri talep etmektedir. Ancak sektörde yaşanan yetkinlik boşluğu manuel süreçlerdeki kalite standardizasyonunu imkânsız hale getirmektedir (Alhassan & Bashiru, 2013). Operatörler arası performans farklılıkları, kaynak parametrelerinin optimizasyonunu zorlaştırmakta ve bu durum işletmeleri hata ağacı analizi (FTA) gibi karmaşık hata önleme metodolojilerine başvurmaya itmektedir (Pontororing vd., 2018).

Son olarak, dijital dönüşümün önündeki "kurumsal boşluk", planlama aşamasında robotik sistemlerin maliyet ve alan gereksinimlerinin doğru kestirilememesine neden olmaktadır. Üretim geliştirme ile üretim planlama arasındaki bu dijital boşluk, özellikle kısıtlı alana sahip fabrikalarda robotik hücrelerin konumlandırılması ve akış sistemlerinin modellenmesi aşamasında ciddi planlama hatalarına yol açabilmektedir. Bu durum, yatırımın geri dönüş süresini uzatmakta ve modernizasyonun operasyonel başarısını tehlikeye atmaktadır (Wrobel vd., 2023).

Çok kriterli karar destek modellerinin analitik gücü, problemin teknik, ekonomik ve operasyonel boyutlarını yansıtan kriterlerin kapsamlılığı ile alternatif setinin sektörel gerçekleri temsil etme yeteneğine doğrudan bağlıdır. Bu bölümde, otomotiv kaynak operasyonları için kurgulanan modelin yapı taşlarını oluşturan değerlendirme kriterleri ve bu kriterler ışığında kıyaslamaya esas teşkil eden robot alternatifleri detaylandırılmaktadır. Kapsamlı bir literatür taraması ve uzman paneli görüşlerinin sentezi neticesinde belirlenen bu bileşenler, yüksek maliyetli ve stratejik bir yatırım olan robot seçiminin rasyonel bir zeminde gerçekleştirilmesini sağlayacak veri altyapısını sunmaktadır (Bechchar vd., 2025). Bu doğrultuda, öncelikle modelde yer alan kriterlerin teknik tanımları, operasyonel önemleri ve çalışmadaki seçim gerekçeleri literatür desteğiyle birlikte ele alınmaktadır. Stratejik çıkmazın bir diğer boyutu, Endüstri 4.0 ekosistemindeki hızlı teknolojik değişim ve eskime korkusudur. Otomotiv sektörü gibi ürün yaşam döngülerinin giderek kısaldığı bir alanda, bugün yapılan büyük ölçekli bir

yatırımın birkaç yıl içinde demode kalması veya yeni nesil araç tasarımlarına uyum sağlayamaması ciddi bir risk teşkil etmektedir. Karar vericiler, yüksek başlangıç maliyetli bir sistemi satın alırken, sistemin gelecekteki "stratejik esnekliğini" ve teknolojik ömrünü kestirmekte zorlanmaktadır. Teknolojik evrimin hızı, yatırımın geri dönüş süresi (ROI) üzerindeki belirsizliği artırarak yöneticilerin risk algısını tetiklemektedir (Höse vd., 2023).

Operasyonel düzeyde ise karar vericiler, tedarikçi güvenilirliği ve satış sonrası destek ağının yaygınlığı gibi nitel kriterlerin ağırlığını belirleme noktasında zorluk yaşamaktadır. Bir robotun teknik spesifikasyonları kâğıt üzerinde mükemmel görünse de tedarikçinin teknik servis hızı veya yedek parça bulunabilirliği konusundaki endişeler, yöneticilerin markaya olan "güven" duygusunu doğrudan etkilemektedir. Yanlış bir marka tercihi, üretim hattının durması gibi felaket senaryolarına yol açabileceğinden, karar vericiler sadece bir makine değil, aslında uzun vadeli bir operasyonel partner seçtiklerinin bilinciyle büyük bir sorumluluk baskısı hissetmektedir (Sayem vd., 2022).

Organizasyonel engeller ve bilgi eksikliği, bu çıkmazı daha da derinleştirmektedir. Üretim birimlerinin teknik beklentileri ile finans birimlerinin bütçe kısıtları arasındaki çatışmalar, karar sürecini politik ve duygusal bir zemine kaydırabilmektedir (Tiburtino vd., 2023). Özellikle gelişmekte olan ekonomilerdeki işletmeler için yüksek yatırım maliyetleri, kalifiye personel eksikliği ve altyapı yetersizlikleri, robotik dönüşümü bir "risk labirentine" dönüştürmektedir (Fuchs vd., 2025). Karar vericiler, tüm bu belirsizlikler altında hem maliyeti minimize eden hem de verimliliği maksimize eden o uzlaşık çözümü bulmak zorundadır (Tran vd., 2025).

2.2. Endüstriyel Robot Kullanım Alanları

Otomotiv üretim süreci, ham sacın şekillendirilmesinden aracın son kontrollerine kadar uzanan ve her aşaması farklı teknolojik yetkinlikler gerektiren çok katmanlı bir yapıdır. Bu süreçte endüstriyel robotlar; pres, gövde inşası, boya ve son montaj hatlarında kritik roller üstlenmektedir. Sektördeki robotik uygulamalar temel olarak malzeme taşıma, kaynak, yüzey kaplama ve montaj olmak üzere dört ana kategoride yoğunlaşmaktadır (Tripathi, 2024).

2.2.1. Kaynak işlemleri

Üretim hattının Ham Gövde aşaması, binlerce metal parçanın bir araya getirilerek araç iskeletinin oluşturulduğu, robot yoğunluğunun en yüksek olduğu bölümdür.

Özellikle nokta kaynağı ve ark kaynağı uygulamalarında robot kullanımı bir endüstri standardı haline gelmiştir. Manuel kaynak süreçlerinde operatörün fiziksel yorgunluğu veya anlık dikkatsizliği; gözenek oluşumu, yetersiz nüfuziyet veya kaynak çapakları gibi kalite kusurlarına yol açabilmektedir. Bu tür hatalar, aracın yapısal mukavemetini doğrudan etkilediği gibi, hat sonunda maliyetli onarım işlemlerini de beraberinde getirir. Üreticiler, insan faktöründen kaynaklanan bu değişkenliği ortadan kaldırmak ve her araçta standart bir birleşme kalitesi elde etmek amacıyla kaynak hatlarını tam otomasyonla yönetmektedir (Subroto & Sunitiyoso, 2025).

2.2.2. Boya ve yüzey kaplama

Boyahane bölümleri hem süreç verimliliği hem de iş sağlığı güvenliği açısından robotların en etkin kullanıldığı alanlardan biridir. Boya ve solventlerin içerdiği uçucu organik bileşenler (VOC), insan sağlığı için risk oluşturduğundan, bu alanların insansızlaştırılması öncelikli bir hedeftir. Teknolojik açıdan bakıldığında ise robotik sistemler, malzeme tasarrufu konusunda somut avantajlar sunmaktadır. Örneğin, BMW'nin Regensburg fabrikasında devreye alınan modern boya teknolojilerinde, robotlar toz boya akışını bir sıvı hassasiyetinde kontrol edebilmektedir. Sistem, boya tabancası araç gövdesinin boşluklarına denk geldiğinde akışı milisaniyeler içinde kesebilmekte, bu sayede "aşırı püskürtme" engellenmektedir. Bu hassas kontrol mekanizması sayesinde araç başına yaklaşık 1 kilogram boya tasarrufu sağlanarak hem maliyet avantajı hem de çevresel kazanım elde edilmektedir (Kochan, 2005).

2.2.3. Güç Aktarma organları

Motor, şanzıman ve aks gibi güç aktarma organlarının montajı, ağır parçaların mikron seviyesinde hassasiyetle birleştirilmesini gerektirir. Bu alanda geleneksel pozisyon kontrollü robotlar yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, robotlara insan elinin hassasiyetini kazandıran "Kuvvet Kontrolü" ve "Görüntü İşleme" teknolojileri geliştirilmiştir. Özellikle tork konvertörlerinin şanzımana yerleştirilmesi, valf gövdelerinin montajı veya pistonların silindir bloklarına takılması gibi işlemlerde, robotlar parçalar arasındaki temas kuvvetlerini algılayabilmektedir. Robot, montaj sırasında bir sıkışma veya direnç hissettiğinde, hareket açısını anlık olarak düzelterek parçanın zarar görmesini engeller ve montajı insan hassasiyetinde ancak makine hızında tamamlar (Gravel & Maslar, 2008).

2.2.4. Son montaj ve döşeme

Fabrikaların otomasyon seviyesinin en düşük olduğu bölüm, araç içi donanımların takıldığı "Son Montaj" hatlarıdır. Ön cam, arka cam ve koltuklar gibi ağır ve hacimli parçaların montajı büyük ölçüde robotize edilmiş olsa da kablo demetleri, halılar ve hortumlar gibi esnek parçaların montajı hala önemli bir zorluktur. Bu parçaların şekillerinin belirsiz olması ve montaj sırasında karmaşık el-göz koordinasyonu gerektirmesi, robotların algılama kapasitesini zorlamaktadır. Örneğin, bir gösterge panelinin araç içine yerleştirilmesi işlemi, robotik manipülatörler yardımıyla yapılsa dahi, ince bağlantıların yapılması genellikle insan operatörler tarafından gerçekleştirilmektedir (Choi vd., 2010).

2.2.5. Esnek ve fikstürsüz montaj

Modern üretim stratejileri, parçaları sabitlemek için kullanılan pahalı ve modele özgü fikstürlerin (kalıp/tutucu) kullanımını azaltmaya odaklanmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen "Fikstürsüz Montaj" konseptinde, robotlar birbirleriyle iş birliği içinde çalışır. Bir robot, üzerinde çalışılacak parçayı (örneğin bir kapı veya panel) tutup doğru pozisyona getirirken, diğer robot kaynak veya montaj işlemini gerçekleştirir. Bu yöntem, yeni bir araç modeli devreye alındığında fikstür yatırımı yapılmasına gerek bırakmadığı için üretim esnekliğini maksimum seviyeye çıkarır (Papakostas vd., 2011). Ayrıca, araçların konveyör üzerinde sürekli hareket ettiği hatlarda, robotların da aracı senkronize bir şekilde takip ederek işlem yapabilmesini sağlayan dinamik izleme sistemleri, dur-kalk kayıplarını önleyerek hat verimliliğini artırmaktadır (Shi & Menassa, 2010).

Endüstriyel robotların otomotiv üretim süreçlerinde kaynak, boyama, montaj ve malzeme taşıma gibi farklı operasyonlarda yaygın biçimde kullanılması, robot yatırımlarını yalnızca teknolojik bir tercih olmaktan çıkararak stratejik bir karar problemine dönüştürmektedir. Farklı uygulama alanlarının değişen teknik gereksinimleri, yatırım maliyetleri, üretim hacmi ve operasyonel beklentiler, işletmelerin karşısına birden fazla ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriteri aynı anda değerlendirmeyi gerektiren bir seçim süreci çıkarmaktadır. Bu nedenle, robotların kullanım alanlarının çeşitlenmesi, karar vericilerin hangi robotun, hangi koşullar altında ve hangi amaçla kullanılacağını sistematik biçimde analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır.

2.3. Endüstriyel Robot Seçiminde Etkili Olan Faktörler

Endüstriyel robot yatırımları, firmalar için sadece basit bir makine parkuru değişikliği değil, üretim stratejilerini, maliyet yapılarını ve pazar konumlarını doğrudan etkileyen çok boyutlu bir dönüşüm sürecidir. Yüksek başlangıç sermayesi gerektirmesi ve işletmeyi uzun vadeli bir teknolojik altyapıya bağlaması nedeniyle, bu kararlar yönetim kademeleri için karmaşık bir stratejik analiz sürecini beraberinde getirir. Küresel rekabet ortamında firmalar; üretim döngü sürelerini optimize etmek, hata oranlarını minimize etmek ve sürdürülebilir bir kalite standardı yakalamak amacıyla robotik sistemlere yönelmektedir. Ancak yatırım kararı verilirken, teknik yeterlilikten finansal geri dönüşe, organizasyonel uyumdan iş güvenliğine kadar geniş bir parametre setinin bütüncül olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Tripathi, 2024).

2.3.1. Finansal fizibilite ve toplam sahip olma maliyeti

Yatırım kararlarının temelinde yatan en belirgin faktör ekonomik gerekçelendirmedir. Ancak bu değerlendirme, sadece robotun satın alma maliyeti üzerinden yapılmaz; "Toplam Sahip Olma Maliyeti" yaklaşımı esas alınır. Bu yaklaşım; kurulum, entegrasyon, operatör eğitimi, enerji tüketimi ve periyodik bakım giderlerini kapsar. ROI hesaplanırken, robotun sağlayacağı doğrudan işçilik tasarrufunun yanı sıra, dolaylı malzeme tasarrufları da belirleyici olur. Örneğin boyahane yatırımlarında, robotların hammaddeyi mikron hassasiyetinde kullanarak israfı önlemesi, yatırımın kendini amorti etme süresini önemli ölçüde kısaltan finansal bir kaldıraç görevi görür (Kochan, 2005). Benzer şekilde, kaynak robotu seçimlerinde yapılan analizler, en düşük etiket fiyatına sahip robotun değil, bakım kolaylığı ve uzun operasyonel ömür sunan seçeneğin uzun vadede daha karlı olduğunu göstermektedir (Subroto & Sunitiyoso, 2025).

2.3.2. Organizasyonel ölçek ve istihdam etkisi

Yatırım kararlarını şekillendiren bir diğer kritik boyut, işletmenin ölçeği ve organizasyonel yapısıdır. Otomotiv ana sanayii gibi büyük ölçekli ve standart üretim yapan tesislerde robot kullanımı yerleşik bir norm iken, Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler için durum farklı dinamikler içerir. KOBİ'ler genellikle daha değişken ürün gamları ve daha küçük parti büyüklükleri ile çalıştıklarından, büyük endüstriyel robotların sunduğu sabit otomasyon çözümleri onlar için riskli olabilir. Almanya'daki üretim işletmeleri üzerine yapılan araştırmalar, KOBİ'lerin teknik yetersizlikten ziyade,

esnek olmayan sistemlere yatırım yapmaktan çekindiklerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, robot teknolojisine yatırım yapan firmaların verimlilik artışı sayesinde pazar paylarını büyüttükleri ve toplumdaki genel endişenin aksine, bu büyümenin istihdamı koruyucu hatta artırıcı bir etki yarattığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yatırım kararı, bir maliyet kalemi olarak değil, bir büyüme stratejisi olarak ele alınmalıdır (Armbruster vd., 2006).

2.3.3. Esneklik ve geleceğe uyumluluk

Modern üretim paradigmalarında ürün yaşam döngülerinin kısalması, yatırım kararlarında "esneklik" faktörünü maliyetin önüne geçirebilmektedir. Sadece tek bir araç modeline özgü tasarlanmış rijit otomasyon sistemleri, model değişimi yaşandığında âtıl kalma riski taşır. Bu riski yönetmek isteyen firmalar, pahalı ve ürüne özel sabitleme aparatlarına ihtiyaç duymayan, robotların iş birliği içinde çalıştığı esnek sistemlere yatırım yapmayı tercih etmektedir. Böylece yapılan robot yatırımı, gelecekte üretilecek farklı modellerde de kullanılarak sermaye verimliliği sağlanır (Papakostas vd., 2011).

2.3.4. İş güvenliği ve alan verimliliği

Fabrika yerleşim planı ve iş güvenliği gereksinimleri yatırım tercihlerini etkilemektedir. Geleneksel endüstriyel robotlar, güvenlik kafesleri ile izole edilmiş geniş alanlara ihtiyaç duyar ki bu da fabrika zemininde değerli metrekairelerin kaybı demektir. Buna karşılık, insanlarla yan yana güvenli bir şekilde çalışabilen cobot teknolojileri, hem güvenlik bariyeri maliyetlerini ortadan kaldırmakta hem de alan tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle sınırlı alana sahip tesisler için bu yeni nesil teknolojiler, yatırımın cazibesini artıran önemli bir faktördür (Das, 2022).

2.3.5. Bilimsel karar verme ve çok kriterli analiz.

Son olarak bütün kriterler sağlansa bile, seçilecek robotun teknik özellikleri ile işletmenin ihtiyaçları arasında tam bir uyum olması gerekir. Hız, yük taşıma kapasitesi ve erişim mesafesi gibi teknik kriterler, genellikle maliyet kriterleri ile çelişebilmektedir. En hızlı veya en güçlü robot, her zaman en ekonomik veya enerji verimliliği en yüksek seçenek olmayabilir. Yöneticilerin bu çelişen kriterler arasında sübjektif yargılardan uzak, rasyonel kararlar verebilmesi için bilimsel metodolojiler devreye girmektedir. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Fuzzy AHP) ve Bulanık ARAS gibi çok kriterli karar verme yöntemleri, belirsizlik içeren nitel kriterleri sayısal verilere dönüştürerek analiz

edilmesini sağlar. Bu yöntemler sayesinde işletmeler, "bakım kolaylığı" veya "tedarikçi güvenilirliği" gibi soyut kavramları matematiksel ağırlıklarla dengeleyerek en optimal yatırım kararını vermektedir (Tran vd., 2025).

Robot seçiminde dikkate alınması gereken finansal, teknik, operasyonel ve stratejik faktörlerin çok sayıda olması ve bu faktörlerin çoğu zaman birbiriyle çelişen hedefler içermesi, karar verme sürecini oldukça karmaşık hâle getirmektedir. Örneğin, teknik açıdan yüksek performans sunan bir robotun yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması ya da maliyet açısından avantajlı bir seçeneğin esneklik ve dijital uyumluluk bakımından yetersiz kalması, karar vericileri zorlayıcı ödünleşmeler ile karşı karşıya bırakmaktadır. Bu tür çok boyutlu ve çelişkili yapıya sahip karar problemlerinin, sezgisel veya tek ölçütlü değerlendirme yaklaşımlarıyla sağlıklı biçimde çözülmesi güçleşmekte; bu durum, bilimsel temelli ÇKKV yöntemlerine olan ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

2.4. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV)

Bilimsel ve endüstriyel gelişmelerin beraberinde getirdiği karmaşık yapı, karar verme süreçlerini sadece sezgisel bir tercih olmaktan çıkarıp, çok boyutlu bir analiz gerektiren sistematik bir eyleme dönüştürmüştür. Karar vericiler, günümüz koşullarında çoğu zaman birbiriyle çelişen hedefleri aynı anda dengelemek zorunda kaldıkları durumlarla karşılaşmaktadır (Kahraman vd., 2015). ÇKKV, bu tür karmaşık problemlerin çözümünde, alternatiflerin belirli kriterler çerçevesinde değerlendirilmesini, sıralanmasını veya en uygun olanın seçilmesini sağlayan analitik bir metodoloji sunmaktadır (Taherdoost & Madanchian, 2023). (Velasquez & Hester, 2013; Durak, 2023).

Karar verme, insanoğlunun günlük yaşantısından karmaşık organizasyonel yapılara kadar hayatın her alanında karşılaştığı temel bir bilişsel süreçtir. Bu eylem, en basit tanımıyla, mevcut alternatifler arasından bir seçim yapma işlemi olarak görülse de, günümüz koşullarında çok daha kapsamlı bir zihinsel süreci ifade etmektedir. Karar verme, salt bir tercih yapmaktan öte, bilgi toplamadan kriterlerin belirlenmesine, alternatiflerin oluşturulmasından sonuçların analiz edilmesine kadar uzanan çok katmanlı bir eylemdir (Durak, 2023). Özellikle belirsizliğin yüksek olduğu, fizyolojik, biyolojik, kültürel ve sosyal faktörlerin etkileşimde bulunduğu durumlarda, karar vericilerin rasyonel veya irrasyonel varsayımlara dayanarak bir sonuca ulaşmaya çalıştığı karmaşık

bir problem çözme mekanizması olarak da tanımlanabilir (Taherdoost & Madanchian, 2023).

Geçmişte karar verme süreçleri daha çok sezgisel yöntemlerle veya tek bir kritere dayalı olarak yürütülürken, modern dünyada problemlerin artan karmaşıklığı, daha sistematik ve analitik yaklaşımları zorunlu kılmıştır. Karar vericilerin karşılaştığı problemler artık tek bir doğru cevabı olmayan, birbiriyle çelişen birden fazla hedefin aynı anda gözetilmesini gerektiren bir yapıya bürünmüştür (Kahraman vd., 2015). Bu noktada, karar analizinin devreye girmesiyle süreç, belirsiz ve net olmayan koşullarda dahi en uygun çözümün belirlenmesi için yapılandırılmış bir çerçeveye oturtulmaktadır. Karar analizi; alternatifler, sonuçlar, belirsizlikler, tercihler ve hedefler gibi bileşenleri bir araya getirerek problemin parçalara ayrılmasını ve mantıksal bir bütünlük içinde çözümlenmesini sağlar (Durak, 2023).

2.4.1. Karar verme süreçleri

Karar verme süreci, rastgele bir seçimden ziyade belirli bir disiplin ve sıralı adımlar bütünüdür. Literatürde bu süreç genellikle problemin tanımlanmasıyla başlar. Problemin doğru ve açık bir şekilde ortaya konulması, sonraki adımların başarısı için temel teşkil etmektedir. Ardından, ulaşılmak istenen hedefler belirlenir ve bu hedeflere götürecek kriterler saptanır (Durak, 2023).

Sürecin devamında, belirlenen kriterlere uygun alternatifler geliştirilir. Bu aşama, potansiyel çözüm yollarının çeşitliliği ve kalitesi açısından belirleyicidir. Alternatiflerin analizi sırasında, her bir seçeneğin belirlenen kriterler çerçevesinde olası sonuçları ve riskleri titizlikle değerlendirilir. Nihayetinde, yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular ışığında en uygun alternatif seçilir ve uygulama aşamasına geçilir (Durak, 2023). Bu sistematik yaklaşım, karar vericilerin karmaşık senaryolar karşısında daha tutarlı ve savunulabilir kararlar almasına olanak tanır (Umm-e-Habiba & Asghar, 2009).

2.4.2. ÇKKV'nin yeri ve önemi

Geleneksel karar verme yöntemleri, genellikle maliyet minimizasyonu veya kâr maksimizasyonu gibi tek bir hedefe odaklanırken, gerçek dünya problemleri çoğu zaman birbiriyle çelişen birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesini gerektirir. Örneğin, bir ürünün hem en kaliteli hem de en ucuz olması genellikle mümkün değildir; bu tür durumlarda kriterler arasında bir denge kurulması gerekir (Velasquez & Hester, 2013). İşte bu noktada ÇKKV yöntemleri devreye girmektedir.

ÇKKV, birden fazla ve genellikle birbiriyle çelişen kriterlerin bulunduğu durumlarda, karar vericilerin en uygun alternatifini seçmelerine, alternatifleri sıralamalarına veya sınıflandırmalarına yardımcı olan analitik yöntemler bütünüdür (Durak, 2023; Taherdoost & Madanchian, 2023). Bu yöntemler, nicel ve nitel verilerin bir arada kullanılmasına imkân tanınmasıyla, karar verme süreçlerinin insan doğasına daha uygun ve esnek bir hale gelmesini sağlar. Kararın kalitesi, büyük ölçüde karar vericinin sahip olduğu bilginin miktarına ve kalitesine bağlıdır; ÇKKV yöntemleri bu bilgiyi işleyerek en iyi çözüme ulaşılmasını kolaylaştırır (Ocelíková vd., 2005).

ÇKKV yöntemleri genel olarak iki ana kategori altında incelenmektedir: Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKKV) ve Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV). ÇNKKV sonlu sayıdaki alternatifler arasından seçim yapmaya odaklanırken, ÇAKV sonsuz sayıdaki alternatifin bulunduğu sürekli karar uzaylarında optimizasyon yapmayı hedefler (Kahraman vd., 2015; Taherdoost & Madanchian, 2023). AHP, TOPSIS, ELECTRE ve VIKOR gibi yaygın kullanılan teknikler, karar vericilerin tercihlerini matematiksel modellere dönüştürerek, subjektif yargıların daha objektif bir zeminde değerlendirilmesine olanak tanır (Velasquez & Hester, 2013).

Sonuç olarak, karar verme süreçlerinde ÇKKV'nin yeri, sadece matematiksel bir hesaplama aracı olmasının ötesindedir. ÇKKV, modern yönetim ve mühendislik problemlerinin çözümünde, belirsizliklerin yönetilmesinde ve farklı paydaşların görüşlerinin sürece dahil edilmesinde vazgeçilmez bir yaklaşım sunmaktadır. Karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir yol haritası sunan bu yöntemler, karar vericilerin daha şeffaf, tutarlı ve veriye dayalı kararlar almasında büyük bir role sahiptir (Durak, 2023).

2.4.3. Literatürde kullanılan temel ÇKKV yöntemleri

Karar verme problemlerinin karmaşıklaşması ve çeşitlenmesi, literatürde çok sayıda farklı ÇKKV yönteminin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Her bir yöntemin kendine özgü avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları bulunmaktadır. Araştırmacılar, problemin doğasına, mevcut veri tipine ve karar vericinin tercihlerine en uygun yöntemi seçmek durumundadır (Velasquez & Hester, 2013). Literatürde sıklıkla başvurulan ve geçerliliği kabul görmüş temel yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

2.4.3.1. AHP

Saaty tarafından geliştirilen bu yöntem, karmaşık bir problemi hiyerarşik bir yapıda alt bileşenlere ayırarak analiz etmeyi sağlar (Saaty, 1990). AHP, kriterler ve alternatifler arasında ikili karşılaştırmalar yaparak karar vericinin sübjektif yargılarını sayısal ağırlıklara dönüştürür. Özellikle nitel kriterlerin ağırlıklı olduğu durumlarda sağladığı tutarlılık analizi sayesinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Ada, 2022).

2.4.3.2. TOPSIS

Hwang ve Yoon tarafından önerilen bu yöntem, alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlığına göre sıralanması prensibine dayanır (Hwang & Yoon, 1981). Yöntemin temel mantığı, seçilen alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak mesafede olması gerektiğidir (Ocelíková vd., 2005). Hesaplama kolaylığı ve anlaşılır yapısı nedeniyle mühendislikten personel seçimine kadar pek çok alanda tercih edilmektedir (Ada, 2022).

2.4.3.3. SAW

SAW en eski ve en basit ÇKKV yöntemlerinden biri olarak bilinir (Fishburn, 1967). Bu yöntemde, her bir kriterin ağırlığı ile alternatifin o kriterdeki değeri çarpılarak toplanır ve genel bir skor elde edilir (Hwang & Yoon, 1981). Basit yapısına rağmen, veri girişinin doğru yapıldığı durumlarda etkili sonuçlar verebilmektedir (Velasquez & Hester, 2013).

2.4.3.4. ELECTRE

Electre yöntem ailesi, alternatiflerin birbirine üstünlük ilişkilerini analiz ederek eleme yapmaya odaklanır (Roy, 1968). Alternatifler arasında kesin bir sıralama yapmaktan ziyade, kabul edilebilir ve edilemez seçenekleri belirlemek için uyum ve uyumsuzluk indekslerini kullanır. Özellikle çok sayıda alternatifin olduğu durumlarda etkili bir eleme aracıdır (Taherdoost & Madanchian, 2023).

2.4.3.5. VIKOR

Vikor çelişen kriterlerin bulunduğu durumlarda uzlaşık bir çözüm bulmayı hedefler (Opricovic & Tzeng, 2003). TOPSIS yöntemine benzer şekilde ideal çözüme yakınlığı esas alsa da VIKOR yöntemi "çoğunluk kuralı" ve "maksimum grup faydası"

gibi kavramları da sürece dahil ederek, karar vericiler arasında bir uzlaşa sağlamaya çalışır (Velasquez & Hester, 2013).

Bu yöntemlerin yanı sıra, PROMETHEE, ANP (Analitik Ağ Süreci) ve son yıllarda belirsizliklerin daha iyi modellenmesi adına bu yöntemlerin bulanık mantık ile genişletilmiş versiyonları da literatürde sıkça kullanılmaktadır (Kahraman vd., 2015)

2.4.4. Araştırma kapsamında kullanılan ÇKKV yöntemlerinin literatürdeki yeri

ÇKKV yöntemleri, karmaşık problemlerin çözümünde belirsizlikleri yönetmek, çelişen kriterleri dengelemek ve en uygun stratejiyi belirlemek amacıyla literatürde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle karmaşık karar problemlerinin çözümünde, kriter ağırlıklandırma ve alternatif sıralama süreçlerinin farklı yöntemlerle birleştirildiği hibrit modellerin kullanımı literatürde giderek yaygınlaşmaktadır (Çakır & Can, 2019). Bu tür bütünleşik yaklaşımlar, karar sürecinin farklı aşamalarındaki tutarlılığı artırarak daha kapsamlı bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmanın metodolojik çerçevesi; kriter ağırlıklarının belirlenmesinde yüksek tutarlılık sağlayan FUCOM yöntemi ve alternatiflerin sıralanmasında uzlaşık çözüm temelli MARCOS yöntemi üzerine inşa edilmiştir.

Tam Tutarlılık Yöntemi (FUCOM), ÇKKV literatürüne Pamučar ve arkadaşları tarafından kazandırılan, kriter ağırlıklarını belirlemek için kullanılan modern ve etkin bir sübjektif ağırlıklandırma yöntemidir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında FUCOM, karar vericiden çok daha az sayıda ikili karşılaştırma talep etmesi ve buna rağmen matematiksel olarak daha tutarlı sonuçlar üretmesi ile öne çıkmaktadır (Pamuçar vd., 2018).

FUCOM, özellikle n adet kriterin olduğu bir problemde sadece $n - 1$ karşılaştırma yaparak çözüm üretebilmektedir. Bu durum, AHP yöntemindeki $\frac{n(n-1)}{2}$ olan işlem yükünü ciddi oranda azaltarak karar vericinin bilişsel yorgunluğunu minimize eder (Peker ve Görener, 2022). Yöntemin temelinde, kriterlerin önem sırasına göre dizilmesi ve ardından bu sıralamanın "Tam Tutarlılıktan Sapma" (DFC) değerini minimize edecek bir optimizasyon modeliyle doğrulanması yatmaktadır (Toptancı, 2023). FUCOM'un sunduğu bu yüksek tutarlılık oranı, yöntemin MOORA, VIKOR ve ARAS gibi diğer ÇKKV teknikleriyle entegrasyonunu da kolaylaştırmaktadır (Feizi vd., 2021).

FUCOM, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde karar vericinin ikili karşılaştırma yükünü minimize ederken, elde edilen sonuçların matematiksel tutarlılığını

geleneksel yöntemlere göre çok daha yüksek bir güvenilirlikle sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Sadece $n - 1$ adet karşılaştırma ile çalışması, karar verme sürecini daha dinamik ve rasyonel hale getirmektedir. Öte yandan, alternatiflerin sıralanması aşamasında kullanılan MARCOS yöntemi, alternatifleri sadece ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıklarına göre değil, aynı zamanda bu çözümler arasındaki uzlaşık konumlarına göre değerlendirerek çok daha stabil bir sıralama sunar. Bu iki yöntemin entegrasyonu hem ağırlıklandırma hem de sıralama aşamalarında metodolojik bir hassasiyet ve bütünlük sağlamaktadır.

MARCOS yöntemi, ÇKKV süreçlerinde alternatiflerin ideal ve anti-ideal referans noktalarına olan uzaklıklarını temel alarak uzlaşık bir çözüm sunan güçlü bir analiz aracıdır. Stević ve arkadaşları tarafından 2020 yılında literatüre kazandırılan bu yöntem, karar vericilerin subjektif yargılarını ve kriterler arasındaki karmaşık ilişkileri yönetmekte yüksek etkinlik göstermektedir (Stević vd., 2019).

MARCOS yöntemi, her türlü karar verme probleminde stabilite ve güvenilirlik sunması amacıyla geliştirilmiştir. Yöntemin gelişim sürecinde en belirgin adım, belirsizliklerin modele dahil edilmesidir (Stević vd., 2019). Bu kapsamda yöntem; Fermatean Fuzzy (Alrasheedi & vd., 2024), Picture Fuzzy (Hao & Ma, 2024) ve T-Spherical Uncertain Linguistic (Wang & Ullah, 2023) gibi ileri düzey bulanık mantık yaklaşımlarıyla zenginleştirilmiştir. Bu gelişim, karar vericilerin "evet", "hayır" veya "kararsız" gibi net olmayan beyanlarını matematiksel modele daha hassas bir şekilde yansıtmasına olanak tanımıştır.

Ayrıca, yöntemin bibliyometrik analizleri, MARCOS'un kısa sürede popülerlik kazanarak birçok farklı disiplinde temel bir çözüm yöntemi haline geldiğini göstermektedir (Demir vd., 2024).

2.4.4.1. FUCOM yöntemi ile ÇKKV problemleri uygulamaları

Literatürdeki son çalışmalar, FUCOM'un farklı sektörlerdeki kritik problemlerin çözümünde etkin bir araç olduğunu göstermektedir:

- Enerji ve Sürdürülebilirlik: Pakistan'daki güneş enerjisi sahalarının seçimi (Ateeq vd., 2025) ve su sistemlerinin optimizasyonunda FUCOM'un gücü test edilmiştir (Ong vd., 2021).
- Eğitim ve Kamu Yönetimi: Eğitim 4.0 hazırlık göstergelerinin belirlenmesinde kaba kümelerle entegre edilen modeller (Almacen vd.,

2023) ile çevre eğitiminin önündeki engellerin analizinde bulanık yaklaşımlar (Baki, 2022) başarıyla uygulanmıştır.

- Endüstriyel Verimlilik ve Güvenlik: İmalat ortamlarındaki karar süreçlerinde (Sofuoğlu, 2020) ve dağıtım merkezlerindeki ergonomik risklerin değerlendirilmesinde (Toptancı, 2023) yöntemin pratikliği vurgulanmıştır.
- Karşılaştırmalı Analizler: Yöntemin objektifliği, ROC gibi diğer ağırlıklandırma teknikleriyle karşılaştırılarak doğrulanmış ve karar verme süreçlerindeki doğruluğu kanıtlanmıştır (Prayoga vd., 2022).

2.4.4.2. MARCOS yöntemi ile ÇKKV problemleri uygulamaları

Literatürdeki son çalışmalar, MARCOS yönteminin özellikle kriter ağırlıklandırma yöntemleriyle (CRITIC, MEREC, SPC) entegre edildiğini göstermektedir:

- Lojistik ve Taşımacılık: İç lojistik süreçlerinde en uygun forklift seçimi için CRITIC-MARCOS modeli kullanılmıştır (Huskanović vd., 2023). Ayrıca, yeşil işleme optimizasyonunda da yöntemin etkinliği kanıtlanmıştır (Shanmugasundar vd., 2022).
- Enerji ve Sürdürülebilirlik: Yenilenebilir enerji yatırımlarının optimizasyonunda, stratejik kararların verilmesi için MARCOS modeli uygulanmıştır (Younis vd., 2025). Benzer şekilde, AB ülkelerinin döngüsel ekonomi performanslarının değerlendirilmesinde MEREC temelli bir MARCOS yaklaşımı tercih edilmiştir (Seyhan, 2023).
- Endüstriyel Üretim ve Malzeme Seçimi: Otomotiv sektöründe sinterlenmiş kasnak üretimi için malzeme seçiminde CRITIC-MARCOS entegrasyonu başarılı sonuçlar vermiştir (Ranjan vd., 2023).
- Sağlık ve Tedarik Zinciri: Sağlık sektörü tedarik zincirinde sürdürülebilir tedarikçi değerlendirmesi için SPC-MARCOS gibi özgün modeller geliştirilmiştir (Alrasheedi vd., 2024).

2.4.5. ÇKKV yöntemleriyle robot seçimi çalışmaları

Literatürde bu problem kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, robot yatırımı kararlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi, robot seçimi için kullanılan karar verme yaklaşımlarının geliştirilmesi, farklı kriterlerin önem düzeylerinin ortaya konulması ve alternatif robotların sistematik bir şekilde değerlendirilmesi gibi çeşitli konuların ele alındığı görülmektedir. Ayrıca, karar verme sürecinin daha sistematik, tutarlı ve bilimsel bir temele dayandırılması amacıyla farklı yöntem ve yaklaşımların kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Literatürde endüstriyel robot ve işbirlikçi robot seçimi problemi; işletmelerin teknolojik, finansal ve operasyonel hedefleri doğrultusunda belirsizlik altındaki alternatifleri değerlendirmesini amaçlayan çok boyutlu bir odak noktası teşkil etmektedir. Bu odak çerçevesinde, karar süreçlerini etkileyen yapısal faktörleri ve kriterleri inceleyen çalışmalardan Silva vd. (2022), sistematik literatür taraması yöntemiyle seçim kriterlerini beş ana boyutta kavramsallaştırırken; Medina & Crispim (2010), açıklayıcı faktör analizi kullanarak yöneticilerin yatırım kararlarında finansal stratejilerin teknolojik unsurlardan daha belirleyici bir rol oynadığını saptamıştır.

Seçim aşamasında uzman yargıları (öznel) ile teknik verilerin (nesnel) bütünleştirilmesi ve bilgi belirsizliğinin yönetilmesi amacıyla; Karsak (1998) bulanık veri zarflama analizi ile esnek bir teknik verimlilik modeli sunmuş, Anand vd. (2014) bulanık AHP yöntemiyle, Parameshwaran vd. (2015) ise bulanık AHP, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerini entegre ederek yapılandırılmış hiyerarşik karar destek çerçeveleri geliştirmişlerdir. Karar kriterleri arasındaki karmaşık etkileşimlerin ve psikolojik belirsizliklerin modellenmesi bağlamında; Kanth vd. (2018) Analitik Ağ Süreci (ANP) ile kriter bağımlılıklarını yapılandırmış, Koulouriotis vd. (2014) bulanık digraf yöntemiyle alternatif performanslarını tekil bir matematiksel indekse dönüştürmüş; Vahdani vd. (2014) ile Wang vd. (2018) ise sırasıyla IVF-COPRAS ve Bulut Modeli-TODIM algoritmalarını kullanarak kesin olmayan veriler altında dirençli sıralamalar elde etme katkısı sunmuşlardır.

Son dönem araştırmalarında ise klasik algoritmaların tutarlılığını test eden ve ideal çözümü arayan ÇKKV optimizasyonlarına odaklanılmış; Şahin (2020) ARAS, SAW ve WPM hibrit sonuçlarını Borda yöntemiyle sentezleyerek yöntemsel bir katkı sağlamış, Shanmugasundar vd. (2023) altı farklı ÇKKV yönteminin sonuçlarındaki yüksek korelasyonu kanıtlamış ve Tran vd. (2025) Endüstri 4.0 gereksinimleri kapsamında

Compromise Programming ve TOPSIS entegrasyonu ile ampirik olarak doğrulanmış, matematiksel açıdan ideal çözüme en yakın karar mimarisini literatüre kazandırmıştır.

Bu kapsamda, tablo 2.1’de robot seçimi ve robot yatırımı konularında gerçekleştirilen çalışmalar; ele alınan problem, kullanılan yöntem ve elde edilen temel sonuçlar açısından özetlenmiştir. Bu çalışmaların incelenmesi ile literatürde ele alınan yaklaşımlar değerlendirilmiş ve mevcut araştırma alanındaki boşlukların ortaya konulması amaçlanmıştır.

Tablo 2.1. Literatürdeki robot seçimi çalışmaları

Yazar(lar) ve Yıl	Araştırma Konusu	Metodoloji	Temel Bulgular
Medina & Crispim (2010)	Otomotiv yan sanayisinde endüstriyel robot yatırımı karar süreçleri.	Açıklayıcı Faktör Analizi (Nitel ve nicel karma desen).	Yatırım/seçim kararlarında finansal stratejilerin (maliyet ve ROI), teknolojik parametrelere kıyasla daha belirleyici olduğu saptanmıştır.
Wang vd. (2018)	Belirsizlik altında endüstriyel robot seçimi.	Bulut Modeli ve TODIM entegreli Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV).	Karar verici psikolojisini ve veri belirsizliğini yansıtan, karmaşık ortamlarda dirençli (robust) sonuçlar veren bir model geliştirilmiştir.
Silva vd. (2022)	İşbirlikçi robot (kobot) benimseme ve seçim kriterlerinin belirlenmesi.	Sistemik Literatür Taraması (SLR) ve Kartopu Örnekleme.	Seçim kriterleri beş boyutta (Finansal, Operasyonel, Teknolojik, Stratejik, İnsani) sınıflandırılmış; esneklik, ergonomi ve güvenlik temel avantajlar olarak öne çıkmıştır.
Shanmugasundar vd. (2023)	Endüstriyel robot seçiminde çeşitli ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi.	SAW, TOPSIS, LINMAP, VIKOR, ELECTRE-III, NFM.	Yöntemler arası yüksek tutarlılık gözlemlenmiş; kriter ağırlıklandırma stratejilerinin nihai karar üzerindeki belirleyiciliği vurgulanmıştır.
Tran vd. (2025)	Endüstri 4.0 kapsamında optimum endüstriyel robot seçimi.	Compromise Programming ve TOPSIS entegrasyonu.	"İdeal çözüme yakınlık" prensibine dayalı, ampirik olarak doğrulanmış ve matematiksel açıdan optimize edilmiş bir karar destek modeli sunulmuştur.
Karsak (1998)	Robot seçiminde öznel ve teknik parametrelerin entegrasyonu.	Bulanık Veri Zarflama Analizi (VZA).	Kesin olmayan verilerin analize dahil edildiği, maliyet ve teknik verimliliği eşzamanlı değerlendiren esnek bir performans sıralaması elde edilmiştir.
Anand vd. (2014)	İmalat sektörü için endüstriyel robot seçim modeli.	Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (Bulanık AHP).	Uzman yargılarındaki belirsizlikler minimize edilerek, alternatiflerin teknik ve ekonomik kriterler bazında yapılandırılmış bir önceliklendirmesi sağlanmıştır.
Parameshwaran vd. (2015)	Nesnel ve öznel kriterleri birleştiren entegre robot seçim modeli.	Bulanık AHP, Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR.	Karar probleminde uzman görüşleri (öznel) ile teknik verilerin (nesnel) sistematik olarak harmanlanarak alternatiflerin sıralanması gerçekleştirilmiştir.
Kanth vd. (2018)	Otomasyon sistemlerinde robot seçimi optimizasyonu.	Analitik Ağ Süreci (ANP).	Karar kriterleri arasındaki yapısal etkileşimler ve bağımlılıklar ağ modeliyle sistematize edilmiştir.
Koulouriotis vd. (2014)	Robot değerlendirmesi ve seçiminde uzman görüşü belirsizliğinin yönetimi.	Bulanık Digraf ve Matris Yöntemi.	Kriterler arası etkileşimler görselleştirilmiş ve alternatif performansları tekil bir sayısal indeks üzerinden sıralanmıştır.
Şahin (2020)	Çok boyutlu endüstriyel robot seçim süreci.	Hibrit ÇKKV (ARAS, SAW, WPM) ve Borda Yöntemi.	İncelenen dokuz model arasında ARAS yönteminin en tutarlı model olduğu saptanmış, sonuçlar Borda yöntemiyle sentezlenerek literatüre özgün bir katkı sunulmuştur.
Vahdani vd. (2014)	Kesin verilerin eksikliğinde bulanık ortamda robot seçimi.	IVF-COPRAS (Aralık Değerli Bulanık COPRAS).	Ağırlık ve fayda derecesi arasında bağıntı kurularak, diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla daha hassas ve dirençli bir sıralama elde edilmiştir.

Tablo 2.1’de sunulan literatür özeti incelendiğinde, otomotiv sektöründe robot seçimi ve robot yatırımı konularının farklı bakış açıları ve çeşitli yöntemlerle ele alındığı görülmektedir. Özellikle erken dönem çalışmalarda robot yatırımı kararlarını etkileyen

faktörler daha çok finansal ve stratejik boyutlarıyla incelenmiş, maliyet, yatırımın geri dönüş süresi ve uzun vadeli kazanç gibi unsurların belirleyici olduğu ortaya konmuştur. Daha sonraki süreçte ise teknolojik gelişmelere paralel olarak robot seçimi probleminin çok kriterli ve karmaşık bir karar verme süreci olduğu kabul edilmiş ve bu kapsamda Bulanık AHP, TOPSIS, VIKOR, ANP, COPRAS, ARAS ve TODIM gibi ÇKKV yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar, robot seçimi sürecinde teknik performans, maliyet, esneklik, güvenlik ve operasyonel uygunluk gibi çok sayıda kriterin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ve kullanılan yöntemin karar sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bununla birlikte literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, otomotiv sektöründe robot seçimi probleminin çözümünde farklı ÇKKV yöntemlerinin kullanılmış olmasına rağmen, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde FUCOM yönteminin ve alternatiflerin değerlendirilmesinde MARCOS yönteminin birlikte kullanıldığı bütünsel bir karar verme modeline rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalar genellikle geleneksel ve yaygın kullanılan yöntemlere odaklanmış olup, daha yeni ve yüksek tutarlılık sağlayan yöntemlerin bu alana uygulanmasının sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, otomotiv sektöründe robot seçimi probleminin çözümünde farklı ve güncel yöntemlerin kullanılmasına yönelik önemli bir araştırma boşluğunun bulunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma hem kullanılan yöntemlerin güncelliği hem de otomotiv sektöründe robot seçimi problemine uygulanması bakımından literatüre özgün bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

3. YÖNTEM

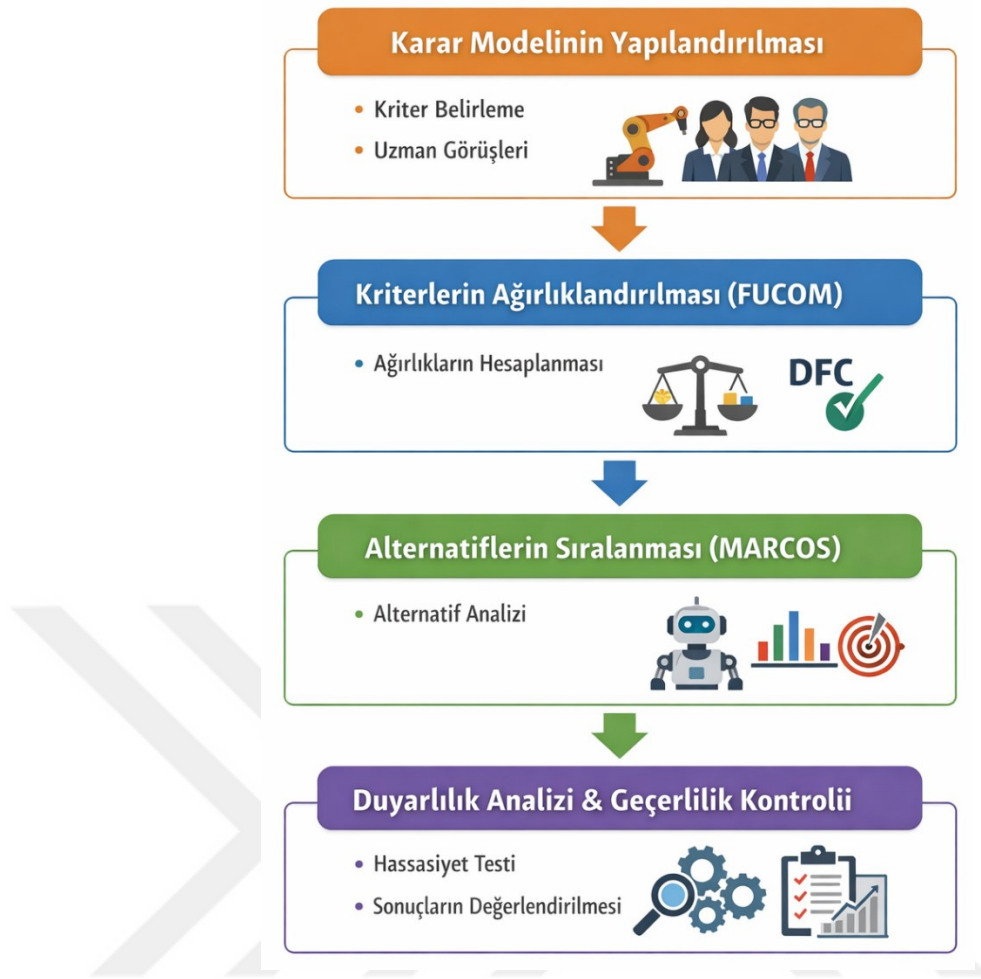
Bu bölümde, çalışmanın amacına ulaşabilmesi için izlenen araştırma yaklaşımı, kullanılan veri toplama süreci ve tercih edilen çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulanma adımları sistematik bir bütünlük içinde açıklanmaktadır. Bir önceki bölümde sunulan literatür taraması, otomotiv sektöründe robot seçim problemlerinin çok boyutlu ve belirsizlik içeren bir karar yapısına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan yöntemlerin yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda karar verici yargılarının tutarlılığı ve sonuçların güvenilirliği açısından da güçlü bir analitik altyapı sunması hedeflenmiştir.

Otomotiv yan sanayisinde kaynak operasyonları için endüstriyel robot seçimi; teknik performans göstergeleri, ekonomik kısıtlar ve operasyonel gereklilikler arasında denge kurulmasını zorunlu kılan karmaşık bir karar problemidir. Bu problem yapısı, tek bir kritere dayalı değerlendirme yaklaşımlarının yetersiz kalmasına neden olmakta; çok kriterli ve sistematik karar verme yöntemlerinin kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle çalışmada, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde yüksek tutarlılık sağlayan FUCOM yöntemi ile alternatiflerin sıralanmasında ideal çözüme dayalı karşılaştırma imkânı sunan MARCOS yöntemi bütünleşmiş bir biçimde kullanılmıştır.

Önerilen metodolojik çerçeve, gerçek bir sanayi problemi üzerine kurgulanmış olup, sektörde deneyimli uzman görüşlerine dayalı olarak şekillendirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, teorik modeller ile uygulama alanı arasında güçlü bir bağ kurulması ve elde edilen sonuçların pratikte uygulanabilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, elde edilen sıralama sonuçlarının kararlılığını test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilerek modelin geçerliliği desteklenmiştir.

3.1. Araştırma Metodolojisi ve Akış Şeması

Bu çalışma, otomotiv yan sanayisinde kaynak operasyonları için en uygun endüstriyel robotun seçilmesi problemini, ÇKKV yaklaşımı çerçevesinde ele almaktadır. Önerilen metodoloji, Şekil 3.1.'de gösterildiği üzere problemin tanımlanmasından elde edilen sonuçların doğrulanmasına kadar uzanan, birbirini izleyen ve bütüncül bir yapıya sahip dört temel aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Araştırma metodolojisi akış şeması

İlk aşamada, problemin kapsamı ve amacı net bir şekilde tanımlanmıştır. Otomotiv sektöründeki güncel üretim ihtiyaçları ve literatürdeki benzer robot seçim çalışmaları incelenerek değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler; robotun teknik performansını, ekonomik uygunluğunu ve operasyonel verimliliğini yansıtacak şekilde sınıflandırılmıştır.

Belirlenen kriterlerin sektörel gerçekliği yansıtmalarını sağlamak amacıyla, otomotiv üretim süreçlerinde deneyime sahip 6 uzmandan oluşan bir karar verici paneli oluşturulmuştur. Uzman görüşleri doğrultusunda hem nitel hem de nicel veriler toplanarak karar modelinin temeli oluşturulmuştur.

Karar verme sürecinde her kriterin nihai sonuca olan etkisi eşit değildir. Bu nedenle kriter ağırlıklarının belirlenmesi kritik bir adımdır. Çalışmada bu amaçla, Pamučar vd. (2018) tarafından geliştirilen FUCOM yöntemi kullanılmıştır.

FUCOM yöntemi, sınırlı sayıda ikili karşılaştırma ile kriterler arasındaki göreceli önem derecelerini belirleyebilmesi ve DFC değerini minimize etmesi sayesinde, uzman

yargılarındaki çelişkileri azaltmaktadır. Bu özellik, özellikle uzman sayısının sınırlı olduğu uygulamalarda yöntemin güvenilirliğini artırmaktadır.

Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, piyasada yaygın olarak kullanılan 9 farklı endüstriyel robot alternatifi MARCOS yöntemi ile değerlendirilmiştir. MARCOS yöntemi, her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere göre konumunu dikkate alan bir fayda fonksiyonu oluşturarak sıralama yapmaktadır.

Bu yaklaşım, alternatiflerin yalnızca en iyi veya en kötü çözüme olan uzaklıklarını değil, aynı zamanda bu iki uç arasındaki uzlaşık konumlarını da dikkate alarak daha dengeli ve istikrarlı bir sıralama sunmaktadır.

Son aşamada, elde edilen sıralama sonuçlarının güvenilirliği test edilmiştir. Kriter ağırlıklarında meydana gelebilecek olası değişimlerin alternatif sıralamasını nasıl etkilediği analiz edilerek, önerilen karar modelinin kararlılığı değerlendirilmiştir. Bu analiz, çalışmanın metodolojik sağlamlığını destekleyerek sonuçların geçerliliğini güçlendirmektedir.

3.2. FUCOM Yöntemi ve Adımları

Bu çalışmada değerlendirme kriterlerinin ağırlıklarının belirlenmesinde FUCOM yöntemi kullanılmıştır. FUCOM yöntemi, Dragan Pamučar, Željko Stević ve Siniša Sremac tarafından geliştirilmiş olup ilk kez “*A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM)*” başlıklı çalışmada literatüre kazandırılmıştır (Pamučar vd., 2018).

FUCOM, çok kriterli karar verme problemlerinde kriter ağırlıklandırma sürecinde karşılaşılan temel sorunlardan biri olan uzman yargılarındaki tutarsızlığı minimize etmeyi amaçlayan yeni nesil bir yöntemdir. Literatürde yaygın olarak kullanılan AHP, BWM ve SWARA gibi yöntemler, karar vericilerden yüksek sayıda ikili karşılaştırma talep etmekte ve bu durum hem bilişsel yükü artırmakta hem de tutarlılık problemlerine yol açabilmektedir. FUCOM yöntemi ise yalnızca $n - 1$ adet karşılaştırma gerektirmesi ve matematiksel bir optimizasyon modeli aracılığıyla tam tutarlılığa en yakın çözümü üretmesi bakımından önemli avantajlar sunmaktadır.

Yöntemin temel felsefesi; kriterlerin göreceli önem sırasının uzmanlar tarafından belirlenmesi ve bu sıralamaya dayalı olarak kriter ağırlıklarının mantıksal tutarlılığı maksimum olacak şekilde hesaplanmasıdır. Bu özellik, FUCOM’u özellikle sınırlı sayıda uzman görüşüne dayanan endüstriyel uygulamalar için uygun ve güvenilir bir yöntem

hâline getirmektedir. Bu çalışmada da otomotiv yan sanayisinde kaynak operasyonları için robot seçimi problemine uygulanarak kriterlerin görelî önem dereceleri belirlenmiştir.

FUCOM yöntemi aşağıdaki adımlar izlenerek uygulanmaktadır:

3.2.1. Kriterlerin sıralanması

FUCOM yöntemi başlangıcında, değerlendirme problemi kapsamında belirlenen kriter kümesi $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ önem derecelerine göre sıralanmaktadır. Sıralama, karar vericinin bilgi ve deneyimine dayalı olarak, en önemli kriterden en az önemli kritere doğru yapılır. Böylece kriterler aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (3.1)$$

Burada k , kriterlerin sıralamadaki yerini göstermektedir. Eğer iki veya daha fazla kriterin aynı öneme sahip olduğu düşünülüyorsa, “>” işareti yerine “=” işareti kullanılarak bu durum ifade edilmektedir. Kriterlerin sıralanması işleminde herhangi bir matematiksel hesaplama yapılmamakta, yalnızca kriterlerin görelî önem sıralaması belirlenmektedir.

3.2.2. Karşılaştırmalı önceliklerin belirlenmesi

Kriterler sıralandıktan sonra sıralanmış kriterler arasında karşılaştırmalı öncelikler belirlenmektedir. Bu karşılaştırma yalnızca ardışık kriterler arasında yapılır. $\varphi_{k/(k+1)}$, sıralamada k . sırada yer alan kriterin, $k + 1$. sıradaki kritere göre önem derecesini ifade etmektedir. Bu karşılaştırmalar sonucunda elde edilen karşılaştırmalı önceliklerin vektörü aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \quad (3.2)$$

Karşılaştırmalı öncelikler iki farklı biçimde belirlenebilir. İlk yaklaşımda, karar verici kriterleri doğrudan ikili olarak karşılaştırarak $\varphi_{k/(k+1)}$ değerlerini tanımlar. İkinci yaklaşımda ise tüm kriterler en önemli kritere göre değerlendirilir ve bu değerlere dayanarak ardışık kriterler arasındaki oranlar hesaplanır. Her iki durumda da amaç, kriterler arasındaki görelî önem farklarını nicel olarak ifade etmektir.

3.2.3. Ağırlık katsayıları için temel koşul

Karşılaştırmalı önceliklerin belirlenmesinden sonra kriterlerin nihai ağırlık katsayıları $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ hesaplanmaktadır. FUCOM yöntemine göre ağırlık katsayılarının, Bölüm 3.2.2’de elde edilen karşılaştırmalı önceliklerle tutarlı olması gerekmektedir. Bu nedenle, ardışık kriterlerin ağırlıkları arasındaki oran, karşılaştırmalı önceliğe eşit olmalıdır:

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (3.3)$$

Bu koşul, kriter ağırlıklarının karar vericinin değerlendirmeleriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır.

3.2.4. Matematiksel geçişlilik koşulu

Yöntemin tam tutarlılık ilkesini sağlaması için, yalnızca ardışık kriterler arasındaki oranların değil, daha uzak kriterler arasındaki oranların da tutarlı olması gerekmektedir. Bu bağlamda matematiksel geçişlilik koşulu tanımlanmaktadır.

Eğer

$$\varphi_{\frac{k}{k+1}} = \frac{w_k}{w_{k+1}} \quad (3.4)$$

ve

$$\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} \quad (3.5)$$

ise, aşağıdaki ilişki elde edilir:

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (3.6)$$

Bu koşul, kriter ağırlıklarının matematiksel olarak geçişli ve tutarlı olmasını garanti altına almaktadır. Tam tutarlılık ancak bu koşulun sağlanmasıyla mümkün olmaktadır.

3.2.5. Tutarlılık sapması ve nihai model

Gerçek problemlerde tam eşitliklerin sağlanması her zaman mümkün olmadığından, FUCOM yönteminde tutarlılık sapması değeri olan DFC tanımlanmaktadır. Bu sapma değeri χ ile gösterilmektedir. Amaç, ağırlık katsayılarının belirlenmesi sürecinde χ değerini minimize etmektir.

Bu doğrultuda, kriter ağırlıklarının aşağıdaki koşulları sağlaması gerekmektedir:

- Ardışık kriterler arasındaki ağırlık oranlarının, karşılaştırmalı önceliklerden en fazla χ kadar sapması,
- Geçişlilik koşulundan kaynaklanan sapmaların χ ile sınırlandırılması,
- Ağırlıkların toplamının bire eşit olması ve negatif olmaması.

Bu koşullar altında FUCOM'un nihai optimizasyon modeli aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\min \chi \text{ s.t. } \begin{cases} \left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi \\ \left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ w_j \geq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Bu model çözüldüğünde, kriterlerin nihai ağırlık katsayıları ile tutarlılık derecesi χ elde edilir. $\chi = 0$ olması durumunda, kriter ağırlıkları tam tutarlılık koşulunu sağlamaktadır.

3.3. MARCOS Yöntemi ve Adımları

Bu çalışmada kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, endüstriyel robot alternatiflerinin değerlendirilmesi ve sıralanması amacıyla MARCOS yöntemi kullanılmıştır. MARCOS yöntemi, Stević, Pamučar, Puška ve Chatterjee (2020) tarafından geliştirilmiş olup, alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlere göre göreceli konumlarını esas alan birçok kriterli karar verme yaklaşımı sunmaktadır. (Stević vd., 2019)

MARCOS yönteminin temel mantığı, karar problemine ait alternatiflerin yalnızca birbirleriyle değil, aynı zamanda teorik olarak tanımlanan en iyi (ideal) ve en kötü (anti-ideal) çözümlerle karşılaştırılmasıdır. Bu sayede alternatiflerin fayda dereceleri hesaplanmakta ve karar verici açısından en uygun uzlaşmacı çözüm belirlenmektedir.

3.3.1. Başlangıç karar verme matrisinin oluşturulması

MARCOS yöntemi başlangıcında, problem kapsamında değerlendirilecek m adet alternatif ve n adet kriter tanımlanır. Buna göre başlangıç karar matrisi oluşturulur:

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (3.8)$$

Burada x_{ij} , i . alternatifin j . kritere göre performans değerini ifade etmektedir. Grup karar verme durumunda, her bir uzmanın oluşturduğu karar matrisleri uygun bir toplulaştırma yöntemi (aritmetik ortalama, geometrik ortalama vb.) kullanılarak tek bir grup karar matrisine dönüştürülmektedir.

3.3.2. Genişletilmiş başlangıç matrisinin oluşturulması

Oluşturulmuş olan başlangıç karar matrisi ideal (AI) ve anti-ideal (AAI) çözümler eklenerek genişletilmektedir. Anti-ideal çözüm, kriterler açısından en kötü performansa sahip alternatif; ideal çözüm ise en iyi performansa sahip alternatif olarak tanımlanır. Genişletilmiş karar matrisi aşağıdaki biçimdedir:

$$X = \begin{array}{c|cccc} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \hline AAI & x_{a1} & x_{a2} & \cdots & x_{an} \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \\ AI & x_{ai1} & x_{ai2} & \cdots & x_{ain} \end{array} \quad (3.9)$$

Anti-ideal ve ideal çözümler, kriterlerin yapısına bağlı olarak belirlenmektedir. Fayda ve maliyet kriterleri için bu değerler aşağıdaki şekilde tanımlanır:

Anti-ideal çözüm:

$$AAI_j = \begin{cases} \min_i x_{ij}, & j \in B \\ \max_i x_{ij}, & j \in C \end{cases} \quad (3.10)$$

İdeal çözüm:

$$AI_j = \begin{cases} \max_i x_{ij}, & j \in B \\ \min_i x_{ij}, & j \in C \end{cases} \quad (3.11)$$

Burada B fayda kriterleri kümesini, C ise maliyet kriterleri kümesini ifade etmektedir.

3.3.3. Genişletilmiş başlangıç matrisinin normalize edilmesi

Başlangıç matrisi ideal ve anti-ideal çözümle genişletildikten sonra oluşturulmuş olan genişletilmiş karar matrisi normalize edilir. Normalizasyon işlemi, kriterlerin farklı ölçü birimlerinden kaynaklanan etkileri ortadan kaldırmak amacıyla uygulanır.

Normalize edilmiş matris $N = [n_{ij}]$, kriter türüne bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

Maliyet kriterleri için:

$$n_{ij} = \frac{x_{AI,j}}{x_{ij}} \quad (3.12)$$

Fayda kriterleri için:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{AI,j}} \quad (3.13)$$

Bu işlemler sonucunda ideal çözümün her bir kriter için normalize edilmiş değeri bire eşit olmaktadır.

3.3.4. Ağırlıklı matrisin belirlenmesi

Normalize edilmiş matrisin her bir elemanı, ilgili kriterin ağırlık katsayısı ile çarpılarak ağırlıklı normalize edilmiş matris elde edilir:

$$v_{ij} = n_{ij} \times w_j \quad (3.14)$$

Burada w_j , j . kriterin ağırlık katsayısını göstermektedir. Bu ağırlıklar FUCOM, AHP, BWM veya başka bir ağırlıklandırma yöntemi ile belirlenebilir.

3.3.5. Alternatiflerin fayda derecelerinin hesaplanması

Her bir alternatif için ağırlıklı normalize edilmiş matrisin satır toplamı hesaplanarak toplam fayda değeri elde edilir:

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (3.15)$$

Ardından, her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere göre fayda dereceleri hesaplanır:

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{AAI}} \quad (3.16)$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{AI}} \quad (3.17)$$

Burada S_{AAI} ve S_{AI} , sırasıyla anti-ideal ve ideal çözümlerin toplam fayda değerlerini ifade etmektedir.

3.3.6. Alternatiflerin fayda fonksiyonunun belirlenmesi

Alternatiflerin fayda dereceleri hesaplandıktan sonra alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerle olan göreceli konumlarını ifade eden nihai fayda fonksiyonu hesaplanır. Fayda fonksiyonu, ideal ve anti-ideal fayda derecelerinin uzlaştırılmasıyla elde edilir:

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (3.18)$$

Burada ideal ve anti-ideal çözümlere göre fayda fonksiyonları şu şekilde tanımlanır:

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (3.19)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (3.20)$$

3.3.7. Alternatiflerin sıralanması

MARCOS yöntemine göre yapılan hesaplamalar sonucunda alternatifler nihai fayda fonksiyonu $f(K_i)$ değerlerine göre sıralanır. En yüksek fayda fonksiyonuna sahip alternatif, karar problemi için en uygun alternatif olarak belirlenir.

3.4. Araştırmada Kullanılan Kriter ve Alternatifler

Çok kriterli karar destek modellerinin analitik gücü, problemin teknik, ekonomik ve operasyonel boyutlarını yansıtan kriterlerin kapsamlılığı ile alternatif setinin sektörel gerçekleri temsil etme yeteneğine doğrudan bağlıdır. Bu bölümde, otomotiv kaynak operasyonları için kurgulanan modelin yapı taşlarını oluşturan değerlendirme kriterleri ve bu kriterler ışığında kıyaslamaya esas teşkil eden robot alternatifleri detaylandırılmaktadır. Kapsamlı bir literatür taraması ve uzman paneli görüşlerinin sentezi neticesinde belirlenen bu bileşenler, yüksek maliyetli ve stratejik bir yatırım olan robot seçiminin rasyonel bir zeminde gerçekleştirilmesini sağlayacak veri altyapısını sunmaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle modelde yer alan kriterlerin teknik tanımları,

operasyonel önemleri ve çalışmadaki seçim gerekçeleri literatür desteğiyle birlikte ele alınmaktadır.

3.4.1. Kriterlerin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan alternatiflerin sistematik bir şekilde sıralanabilmesi adına, mevcut literatür kapsamlı bir taramadan geçirilmiş ve bu doğrultuda analize esas teşkil edecek 9 temel kriter belirlenmiştir.

3.4.1.1. Taşıma kapasitesinin önemi

Otomotiv endüstrisinde endüstriyel robotların taşıma kapasitesi; operasyonel verimlilik, üretim sürekliliği ve iş güvenliği açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Ağır bileşenlerin sıklıkla manipüle edildiği bu sektörde, robotların performans kaybı yaşamadan teknik yük gereksinimlerini karşılayabilmesi, üretim hattının aksamadan çalışması için temel bir zorunluluktur. Yüksek taşıma kapasitesine sahip robotik sistemler, çevrim sürelerini optimize ederek birim zamandaki çıktı miktarını artırmakta ve böylece genel üretim verimliliğine doğrudan katkı sağlamaktadır. Ayrıca, robotun taşıma kapasitesinin iş yüküne uygun olarak belirlenmesi, aşırı yüklemekten kaynaklanabilecek mekanik arızaları ve kaza risklerini minimize ederek daha güvenli bir çalışma ekosisteminin tesis edilmesine olanak tanımaktadır (Murali vd., 2025).

3.4.1.2. Erişim mesafesinin önemi

Endüstriyel robotların erişim mesafesi hem üretim hattının mekânsal düzenlemesi hem de operasyonel verimlilik açısından stratejik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Robotun erişim kapasitesinin çalışma alanının fiziksel boyutlarıyla tam uyumlu olması, süreç içerisindeki darboğazların ve operasyonel aksaklıkların önlenmesi adına temel bir gerekliliktir (Murali vd., 2025). Geniş erişim kabiliyetine sahip sistemler, farklı koordinatlardaki çok sayıda görevi tek bir merkezden yürütebilme esnekliği sunarak ihtiyaç duyulan toplam ünite sayısını azaltmakta ve bu sayede üretim süreçlerinin yalınlaşmasına imkân tanımaktadır (Sivaji vd., 2025). Ayrıca, yeterli bir erişim menzili, robotun kinematik hareketleri sırasında çevre bileşenlerle çarpışma riskini minimize ederek dinamik üretim sahalarında operasyonel güvenliği pekiştirmektedir (Rozina & Rawashdeh, 2024).

3.4.1.3. Hassasiyetin önemi

Robotların çalışma hassasiyeti, otomotiv sektöründe kalite güvencesinin temel unsurlarından biridir. Yüksek hassasiyete sahip robotlar, bileşenlerin önceden tanımlanan teknik spesifikasyonlara uygun şekilde üretilmesini sağlayarak hata oranlarını ve yeniden işleme gereksinimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ferrerias-Higuero vd., 2020). Hassasiyet aynı zamanda ürünler arasında tutarlılık sağlayarak, güvenlik ve güvenilirliğin kritik olduğu otomotiv endüstrisinde yüksek kalite standartlarının sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Gümbel & Dröder, 2024). Bu bağlamda, hassas robotlara yapılan yatırımlar; malzeme israfının azaltılması ve ürün kalitesinin artırılması yoluyla uzun vadede işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Murali vd., 2025).

3.4.1.4. Entegrasyon kolaylığı ve sistem esnekliğinin önemi

Endüstriyel robotların mevcut üretim sistemlerine entegrasyon kolaylığı ve sistem esnekliği, modern otomotiv üretim ortamlarında önemli bir değerlendirme kriteridir. Mevcut iş akışlarına kolayca entegre edilebilen robotik sistemler, daha az bakım ve eğitim gereksinimi doğurarak operasyonel verimliliği artırmaktadır (Murali vd., 2025). Ayrıca robotların bakım gereksinimlerinin dikkatli biçimde değerlendirilmesi, seçilen sistemlerin mevcut üretim süreçleriyle sorunsuz bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanımakta ve olası operasyonel aksaklıkların önüne geçmektedir (Belgiu vd., 2022).

3.4.1.5. Yatırım maliyetlerinin önemi

Endüstriyel robot yatırımları, yüksek ilk yatırım maliyetleri nedeniyle stratejik düzeyde ele alınması gereken kararlar arasında yer almaktadır. Robotların tedarik, kurulum ve devreye alma maliyetleri oldukça yüksek olup, bu durum kapsamlı bir finansal planlamayı zorunlu kılmaktadır. İşletmeler, başlangıç yatırımlarını gerekçelendirebilmek için otomasyon yatırımlarının geri dönüş süresi (ROI) ve uzun vadeli sağlayacağı faydaları titizlikle değerlendirmelidir (Medina & Crispim, 2010). Bu kapsamda, minimum maliyetle belirli uygulamalar için en uygun performansı sunan robotların seçilmesi, üretkenliğin ve verimliliğin maksimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Sivaji vd., 2025).

3.4.1.6. Çalışma hızı ve çevrim süresinin önemi

Robotların çalışma hızı ve çevrim süresi, üretim hatlarının toplam performansını doğrudan etkileyen temel faktörlerdir. Yüksek çalışma hızları, robotların görevlerini daha

kısa sürede tamamlamasına imkân tanıyarak imalat süreçlerindeki toplam çıktı hızının artmasını sağlamaktadır (Rozina & Rawashdeh, 2024). Çevrim süresinin düşürülmesi, işletme maliyetlerinin azalmasına ve kaynak kullanımının daha etkin hâle getirilmesine katkı sunmaktadır (Kostov & Hristov, 2023). Bununla birlikte, hız ve çevrim süresi optimizasyonunun kalite standartlarından ödün vermeden gerçekleştirilmesi, üretim süreçlerinde kalite sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır (Kostov & Hristov, 2023).

3.4.1.7. Bakım kolaylığının önemi

Bakım kolaylığı, endüstriyel robotların uzun vadeli performansı ve üretim sürekliliği açısından hayati bir kriterdir. Robot bileşenlerine erişim kolaylığı, yedek parça bulunabilirliği ve bakım işlemlerinin karmaşıklık düzeyi, bakım süreçlerinin etkinliğini doğrudan etkilemektedir (Shanmugasundar vd., 2023). Bakımı daha kolay olan robotlar, plansız duruş sürelerini azaltarak üretim akışının kesintisiz sürdürülmesine olanak tanımakta; bu durum özellikle üretim programlarının oldukça sıkı olduğu otomotiv endüstrisi için kritik bir avantaj sağlamaktadır (Murali vd., 2025).

3.4.1.8. Dijitalleşme ve uyumluluğun önemi

Endüstri 4.0 kapsamında dijitalleşme ve teknolojik uyumluluk, robot seçiminde giderek daha belirleyici bir kriter hâline gelmiştir. Teknolojik açıdan uygun seçilen robotlar, otomotiv üretiminde artan kişiselleştirilmiş ürün taleplerine ve farklı ürün karmalarına hızlı şekilde uyum sağlanmasına imkân tanımaktadır (Shi & Menassa, 2010). Bunun yanı sıra, hassas konumlandırma, kuvvet kontrolü ve sensör entegrasyonu gibi ileri teknolojik yetkinliklere sahip robotlar, manuel olarak gerçekleştirilmesi zor ve hata riski yüksek işlemlerde yüksek kalite standartlarının korunmasını desteklemektedir (Kochan, 2005).

3.4.1.9. İşletme ve bakım giderlerinin önemi

Robot seçiminde yalnızca ilk yatırım maliyetlerinin değil, robotun tüm kullanım ömrü boyunca oluşacak işletme ve bakım giderlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Toplam sahip olma maliyetinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi, uzun vadeli ve sürdürülebilir yatırım kararları açısından kritik öneme sahiptir (Murali vd., 2025). Enerji tüketimi ile mekanik bileşenlerin, özellikle dişli kutusu ve eklemlerin güvenilirliğinin birlikte analiz edilmesi, bakım planlamasının optimize edilmesine ve toplam yaşam

döngüsü maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunurken, çevresel etkilerin de minimize edilmesini sağlamaktadır (Zhi & Nai-Yong, 2020).

Literatür ve sektörel gereklilikler dikkate alınarak belirlenen kriterler doğrultusunda ayrıntılı olarak açıklanan kriterler, otomotiv üretim süreçlerinde endüstriyel robot seçimi kararını etkileyen teknik, ekonomik ve yönetsel boyutları bütüncül bir bakış açısıyla yansıtmaktadır. Bu kriterler, literatürde öne çıkan çalışmalardan ve sektörel uygulamalardan yararlanılarak belirlenmiş; hem akademik geçerliliği hem de endüstriyel uygulanabilirliği gözetilerek yapılandırılmıştır. Analiz sürecinde kullanılacak kriterlerin açık, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir olması amacıyla her bir kriter için kapsamlı tanımlamalar yapılmış ve ilgili literatür kaynakları ile desteklenmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan kriterlerin kısaltmaları, tanımları, fayda yönleri ve dayandıkları temel kaynaklar Tablo 3.1’de sistematik bir biçimde sunulmaktadır.

Tablo 3.1. Kriter açıklamaları

Kısaltma	Kriter Adı	Açıklaması	Fayda Yönü	Kaynağı (Atfı)
C1	Taşıma Kapasitesi	Robotun, uç eyleyicisi ile taşıyacağı maksimum ağırlık kapasitesi.	Fayda (Maksimum)	Tran vd., 2025
C2	Erişim Mesafesi	Robotun kinematik yapısının, çalışma alanındaki tüm noktalara engellere çarpmadan ulaşabilme yeteneği.	Fayda (Maksimum)	Papa vd., 2011
C3	Çalışma Hassasiyeti	Robotun tanımlanan koordinatlara her seferinde aynı hata payı (tolerans) ile gidebilme yeteneği.	Fayda (Maksimum)	Gravel & Maslar, 2008
C4	Entegrasyon Kolaylığı ve Sistem Esnekliği	Robotun özel çalışma koşullarına (temiz oda, boyahane vb.) ve spesifik iş türüne yapısal uygunluğu.	Fayda (Maksimum)	Choi vd., 2010
C5	Yatırım Maliyetleri	Satın alma, kurulum, enerji tüketimi ve periyodik bakım masraflarının toplamı.	Maliyet (Minimum)	Subroto & Sunitiyoso, 2025
C6	Çalışma Hızı ve Çevrim Süresi	Belirli bir görevin tamamlanma hızı; üretim kapasitesini doğrudan etkileyen faktör.	Fayda (Hız/Kapasite)	Das, 2023
C7	Bakım Kolaylığı	Yedek parça bulunabilirliği, teknik servis hızı ve üretici firmanın sağladığı eğitim olanakları.	Fayda (Maksimum)	Subroto & Sunitiyoso, 2025
C8	Dijitalleşme/ Uyumluluk (Iot, AI)	Yazılımsal kullanım kolaylığı ve değişen üretim senaryolarına hızlı uyum sağlayabilme yetisi.	Fayda (Maksimum)	Kochan, 2005; Shi & Menassa, 2010
C9	İşletme ve Bakım Giderleri	Robotun kullanım ömrü boyunca oluşan bakım, enerji ve servis maliyetleri	Maliyet (Minimum)	Landscheidt & Kans, 2016

3.4.2. Alternatiflerin belirlenmesi

Literatürde endüstriyel robot seçimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların farklı sektör ve uygulama alanları için çeşitli marka ve modelleri alternatif olarak değerlendirmeye aldıkları görülmektedir. Bu bağlamda, öne çıkan çalışmalar ve kullanılan alternatifler aşağıda özetlenmiştir:

- Gamal & Mohamed (2023), otomotiv endüstrisi için gerçekleştirdikleri robot seçim sürecinde hibrit bir karar verme yöntemi kullanarak; A9, A3, A2 markalarını alternatif olarak değerlendirmişlerdir.

- Shanmugasundar vd. (2022), sprey boyama robotlarının optimal seçimi üzerine yaptıkları çalışmada; A9, A1, A4 ve A2 markalarından oluşan bir alternatif setini ele almışlardır.
- Nhieu vd. (2025), endüstriyel paletleme robotlarının performansını kıyasladıkları güncel çalışmalarında; A2 ve A3 gibi hem geleneksel hem de kolaboratif robot markalarını analizlerine dahil etmişlerdir.
- Chodha vd. (2022), ark kaynağı robotu seçimi için yürüttükleri araştırmada; A2, A1, A4, A9, A6 ve A3 markalarını TOPSIS ve Entropi yöntemleriyle incelemişlerdir.
- Tamrakar (2014), AHP yönteminin endüstrideki uygulamasını gösterdiği çalışmada; A1, A9, A4, A2 ve A6 markalarını karar verme sürecindeki alternatifler olarak belirlemiştir.
- Rajani & JawaharBabu (2016), punta kaynağı operasyonları için en uygun robotun seçilmesinde; A9 ve A2 markalarını baz alarak bir karar destek sistemi sunmuşlardır.

Bu çalışmada değerlendirmeye alınan alternatif robotların belirlenme sürecinde hem mevcut literatürdeki öncü çalışmalar hem de sektörde deneyimli uzmanların görüşleri esas alınmıştır. Bu doğrultuda yapılan sentez sonucunda, analize dâhil edilen robot alternatifleri Tablo 3.2.'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Alternatif robot markaları

Kod	Alternatif Robot Markası
A1	Alternatif Robot Markası 1
A2	Alternatif Robot Markası 2
A3	Alternatif Robot Markası 3
A4	Alternatif Robot Markası 4
A5	Alternatif Robot Markası 5
A6	Alternatif Robot Markası 6
A7	Alternatif Robot Markası 7
A8	Alternatif Robot Markası 8
A9	Alternatif Robot Markası 9

3.4.3. Karar vericilerin belirlenmesi

Karar verme sürecinin kalitesi ve elde edilen sonuçların güvenilirliği, değerlendirmeyi yapan uzman grubunun yetkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Otomotiv endüstrisindeki robot seçim kararları; sadece teknik birimlerin değil, finansman ve planlama birimlerinin de görüşünü gerektiren çok disiplinli bir süreçtir. Bu nedenle çalışmada, problemin farklı boyutlarını temsil eden 6 kişilik heterojen bir uzman grubu oluşturulmuştur.

Uzmanların seçiminde; sektördeki tecrübe süreleri, robotik sistemlere aşinalıkları ve işletme içindeki karar yetkileri dikkate alınmıştır. Uzman grubu tarafından yapılan dilsel değerlendirmeler, çalışmanın veri setini oluşturmaktadır. Karar verici grubun profili Tablo 3.3’de sunulmuştur.

Tablo 3.3. Karar verici profilleri

Karar Vericiler	Görevi	Tecrübe Yıl	Uzmanlık Alanı
KV1	Genel Müdür	13	Makine Mühendisi, Arge ve Üretim
KV2	Firma Sahibi	20	Robotik Kaynak ve Boya Hatları
KV3	Otomasyon Mühendisi	7	Endüstriyel Tesis Kurulumu
KV4	Elektrik Elektronik Mühendisi	5	Bakım Mühendisi
KV5	Robotik Birim Sorumlusu	5	Elektronik Mühendisi, Robot Hatları
KV6	Devreye Alma Mühendisi	8	CNC Sistemleri, Mühendislik

Uzmanlar, kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında kendi tecrübelerine dayanarak ikili karşılaştırmalar yapmış; alternatiflerin değerlendirilmesi aşamasında ise her bir robot adayını teknik veriler ışığında puanlamışlardır. Uzmanların farklı bakış açılarına sahip olması, kararın tek taraflı olmasını engelleyerek daha dengeli bir sonuç elde edilmesini sağlamıştır.

4. BULGULAR

4.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Küresel otomotiv endüstrisi, Endüstri 4.0 devrimi ile tarihinin en köklü ve agresif dönüşüm süreçlerinden birini yaşamaktadır. Üretim hatlarında "sıfır hata" hedefine ulaşma zorunluluğu, artan işçilik maliyetleri ve pazarın değişken taleplerine anlık cevap verebilme ihtiyacı, işletmeleri manuel süreçlerden tam otomasyonlu robotik sistemlere geçişe zorlamaktadır. Bu dönüşümün merkezinde ise, aracın gövde bütünlüğünü ve güvenliğini doğrudan etkileyen kaynak operasyonları yer almaktadır. Ancak, yüksek yatırım maliyetleri ve teknolojinin hızlı eskime riski göz önüne alındığında, bir otomotiv işletmesi için robot seçimi sadece teknik bir satın alma işlemi değil, işletmenin gelecekteki rekabet gücünü belirleyen stratejik bir yönetim kararıdır (Bechchar vd., 2025; Routray & Das, 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, otomotiv üretim süreçlerinin en kritik aşamalarından biri olan BIW hattındaki kaynak operasyonlarında kullanılacak robotlara yönelik yatırım kararlarında, yöneticilerin karşılaştığı maliyet, hız, hassasiyet ve esneklik gibi birbirleriyle çelişebilen çok sayıdaki kriteri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektir. Geleneksel yatırım kararları çoğunlukla yalnızca satın alma maliyeti gibi tek boyutlu parametrelere dayanmaktadır. Buna karşılık bu çalışma, teknik yetkinlik ile finansal verimliliği birlikte ele alan entegre bir değerlendirme modeli sunmayı hedeflemektedir (Shanmugasundar vd., 2023; Gamal & Mohamed, 2023).

Çalışmanın önemi, ele aldığı problemin karmaşıklığına sunduğu hibrit metodolojik çözümde yatmaktadır. Otomotiv sektöründeki karar vericiler, yatırım sürecinde genellikle sayısal veriler (taşıma kapasitesi, erişim mesafesi) ile sözel/nitel veriler (tedarikçi güvenilirliği, kullanım kolaylığı) arasında denge kurmakta ve hata yapma korkusuyla "karar felci" yaşamaktadır. Bu bağlamda çalışma, literatürde etkinliği kanıtlanmış FUCOM ile MARCOS tekniklerini ilk kez otomotiv kaynak robotu seçimi özelinde birleştirerek özgün bir model sunmaktadır.

Bu çalışma, aşağıdaki katkıları sağlaması açısından akademik ve sektörel yüksek bir değer taşımaktadır:

- **Metodolojik Katkı:** Literatürde otomotiv sektöründeki robot seçim problemlerinde FUCOM ve MARCOS yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bütünlük bir modele rastlanmamıştır. FUCOM'un çok az ikili karşılaştırma ile

sağladığı yüksek tutarlılık derecesi ve MARCOS'un ideal çözümleri referans alan stabil sıralama yeteneği, literatürdeki yöntem çeşitliliğine özgün bir katkı sunmaktadır.

- **Sektörel Uygulama:** Özellikle kaynak robotları özelinde belirlenen teknik kriterlerin (hassasiyet, IP koruma sınıfı, erişim mesafesi vb.) sınıflandırılması, otomotiv yan sanayi profesyonelleri için hazır bir seçim rehberi niteliği taşımaktadır. Bu model, sanayideki teknolojik dönüşümün önündeki "karar verme bariyerlerini" aşmaya yardımcı olmaktadır (Sayem vd., 2022; Tiburtino vd., 2023).
- **Yönetsel Fayda:** Çalışma, yöneticilere sadece "hangi robotun en iyi olduğu" sorusunun cevabını değil, aynı zamanda bu seçimin matematiksel ispatını sunmaktadır. Bu durum, yatırım kararlarını rasyonel bir zemine oturtarak, hatalı yatırımlardan kaynaklanan sermaye kayıplarını ve operasyonel riskleri önlemeyi amaçlamaktadır (Fuchs vd., 2025; Tran vd., 2025).

Bu çalışma; teorik arka planı güçlü, matematiksel olarak doğrulanmış ve endüstriyel gerçeklerle örtüşen bir karar modeli sunarak, otomotiv işletmelerinin kaynak verimliliğini artırmayı ve Endüstri 4.0 yolculuğunda stratejik bir yol haritası oluşturmayı hedeflemektedir.

4.2. Problemin Tanımı

Bu çalışmanın uygulama aşaması, otomotiv yan sanayisinde faaliyet gösteren ve üretim hattında kapasite artışına gitmeyi hedefleyen orta-büyük ölçekli bir işletmenin gerçek hayat problemi üzerine kurgulanmıştır. İşletme, araç gövde birleştirme hattında kullanılmak üzere, manuel kaynak operasyonlarını ikame edecek yeni nesil endüstriyel robot sistemlerine yatırım yapmayı planlamaktadır. Mevcut durumda, operatör kaynaklı hataların maliyeti, çevrim sürelerinin uzunluğu ve iş güvenliği riskleri, işletmeyi otomasyona zorlayan temel faktörlerdir.

Karar problemi, işletmenin teknik gereksinimlerini karşılayabilecek potansiyel robot alternatifleri arasından hem teknik performans hem de ekonomik verimlilik açısından en optimal seçeneğin belirlenmesidir. Problem yapısı gereği çok sayıda birbiriyle çelişen kriter içerdiğinden ve karar sürecinde belirsizlikler barındırdığından, ÇKKV metodolojisi benimsenmiştir.

Önerilen karar modeli hiyerarşik bir yapıda tasarlanmış olup şu üç temel bileşenden oluşmaktadır:

1. Amaç: Otomotiv kaynak hattı için en uygun endüstriyel robotun seçilmesi.
2. Kriterler: Robotların performansını ölçmeye yarayan teknik ve yönetsel göstergeler.
3. Alternatifler: Piyasada mevcut olan ve 9 farklı robot markası/modeli.

Çalışmada, kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde karar vericilerin subjektif yargılarını minimum karşılaştırma ile maksimum tutarlılık düzeyinde matematiksel modele aktaran FUCOM yöntemi; alternatiflerin sıralanmasında ise ideal ve anti-ideal referans noktalarına göre uzlaşık bir çözüm sunan MARCOS yöntemi bütünlük olarak kullanılmıştır.

4.3. Kriter Ağırlıklarının FUCOM Yöntemi ile Belirlenmesi

Bu bölümde, çalışmada yer alan değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları FUCOM yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, karar verici panelinde yer alan her bir uzmandan kriterleri öncelik sırasına göre sıralamaları ve ardışık kriterler arasında göreceli önem karşılaştırmaları yapmaları istenmiştir. Elde edilen uzman görüşleri, FUCOM yönteminin gerektirdiği şekilde değerlendirilerek kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

Her bir uzmana ait kriter sıralamaları ve yapılan karşılaştırmaların sonuçları Tablo 4.1’de sunulmaktadır. Söz konusu tabloda, ilk sütunda uzman tarafından belirlenen kriter ağırlık vektörünü temsil eden $\tilde{w}(c_{jk})$ değerleri yer almakta, ikinci sütunda ise ardışık kriterler arasındaki göreceli önem oranlarını ifade eden $\varphi_{j/(j+1)}$ değerleri gösterilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, FUCOM yöntemine ait optimizasyon modeli ilgili yöntemin işlem adımları takip edilerek (denklem 3.1’den denklem 3.7’ye kadar) çözümleme yapılmış ve her bir uzman için kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Aşağıda KV1 için sonuçlar paylaşılmıştır. Diğer KV sonuçları EK-1’de yer almaktadır.

Tablo 4.1. Karar verici 1’in FUCOM önem dereceleri ve öncelik değerleri

KV1			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\varphi_{j/(j+1)}$
1	C6	1	1,2
2	C5	1,2	1,208333333
3	C1	1,45	1,24137931
4	C4	1,8	1,25
5	C8	2,25	1,2
6	C3	2,7	1,166666667
7	C9	3,15	1,142857143
8	C2	3,6	1,097222222
9	C7	3,95	

4.3.1. Kriterlerin sıralanması

FUCOM yöntemi kapsamında belirlenen kriterler karar verici değerlendirmelerine göre en önemli kriterden en az önemli kritere doğru sıralanmıştır. Bu sıralama, denklem (3.1)'de verilen gösterime uygun olarak Tablo 4.2.'de belirtilen sıralama elde edilmiştir. Bu sıralamaya göre karar vericinin değerlendirme sürecinde C₆ kriterine en yüksek önemi verdiği görülmektedir. Bu bağlamda karar vericinin kriter önem dereceleri Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Karar verici 1 için kriterlerin önem sırası ve önem dereceleri

Kriterler	C ₆	C ₅	C ₁	C ₄	C ₈	C ₃	C ₉	C ₂	C ₇
$\tilde{w}(c_{jk})$	1.00	1.20	1.45	1.80	2.25	2.70	3.15	3.60	3.95
Önem Sırası	$C_6 > C_5 > C_1 > C_4 > C_8 > C_3 > C_9 > C_2 > C_7$								

İlgili tabloda yer alan 1.00, 1.20, 1.45, 1.80, 2.25, 2.70, 3.15, 3.60 ve 3.95 değerleri, kriterlerin doğrudan ağırlıklarını değil, önem derecelerini ifade eden göreceli önem göstergeleridir. Bu değerler, kriterlerin birbirlerine göre önem düzeylerini nicel olarak ortaya koymakta ve kriterler arasında kademeli bir önem farklılığı bulunduğunu göstermektedir. Değerler büyüdükçe kriterin önem sırasındaki konumu alt seviyelere düşmektedir. Bu önem dereceleri, FUCOM yönteminin bir sonraki aşamasında hesaplanacak olan karşılaştırmalı öncelik oranlarının ve nihai kriter ağırlıklarının belirlenmesi için temel veri niteliği taşımaktadır.

4.3.2. Karşılaştırmalı önceliklerin belirlenmesi

Denklem (3.2)'ye uygun olarak ardışık kriterler arasında karşılaştırmalı öncelik değerleri belirlenmiştir. Kriter önem derecelerine bağlı olarak elde edilen karşılaştırmalı öncelik değerleri Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Karar verici 1 için kriterlerin karşılaştırmalı öncelik değerleri

Kriterler	Hesaplama	Sonuç
$\varphi_{C5/C6} = 1.20/1.00$		$= 1.20$;
$\varphi_{C1/C5} = 1.45/1.20$		$= 1.21$;
$\varphi_{C4/C1} = 1.80/1.45$		$= 1.24$;
$\varphi_{C8/C4} = 2.25/1.80$		$= 1.25$;
$\varphi_{C3/C8} = 2.70/2.25$		$= 1.20$;
$\varphi_{C9/C3} = 3.15/2.70$		$= 1.17$;
$\varphi_{C2/C9} = 3.60/3.15$		$= 1.14$;
$\varphi_{C7/C2} = 3.95/3.60$		$= 1.1$

Buna göre karşılaştırmalı öncelik vektörü Tablo 4.4.'te ifade edilmektedir.

Tablo 4.4. Karar verici 1 için karşılaştırmalı öncelik vektörü

Kriterler	C ₆	C ₅	C ₁	C ₄	C ₈	C ₃	C ₉	C ₂	C ₇
$\Phi =$	(1.20,	1.21,	1.24,	1.25,	1.20,	1.17,	1.14,	1.10)	

Tablo 4.2’de elde edilen önem derecelerine bağlı olarak ardışık kriterler arasındaki karşılaştırmalı öncelik değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler, her bir kriterin kendisinden sonra gelen kritere göre göreceli önem oranını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, C₆ kriterinin C₅ kriterine göre 1.20 kat, C₅ kriterinin C₁ kriterine göre 1.21 kat, C₁ kriterinin C₄ kriterine göre 1.24 kat ve C₄ kriterinin C₈ kriterine göre 1.25 kat daha önemli olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, sıralamanın alt basamaklarında da kriterler arasında belirli oranlarda önem farklılıkları bulunduğu görülmektedir.

Elde edilen karşılaştırmalı öncelik değerlerinin 1.10 ile 1.25 arasında değişmesi, kriterler arasında tutarlı ve kademeli bir önem farkı bulunduğunu göstermektedir. Bu oranlar, kriterlerin yalnızca sıralamasını değil, aynı zamanda birbirlerine göre göreceli üstünlük düzeylerini de nicel olarak ortaya koymaktadır. Hesaplanan karşılaştırmalı öncelik vektörü, FUCOM yönteminin sonraki aşamasında kullanılacak olan ağırlık katsayılarının belirlenmesinde temel girdi olarak kullanılmaktadır.

4.3.3. Ağırlık katsayıları için temel koşul

Denklem (3.3)’e göre, kriter ağırlıkları arasındaki oranların karşılaştırmalı öncelik değerlerine eşit olması gerekmektedir. Bu koşula bağlı olarak Tablo 4.5’te verilen eşitlikler elde edilmektedir.

Tablo 4.5. Karar verici 1 için FUCOM ağırlık katsayıları koşulu

Hesaplama	Sonuç
$\frac{w_6}{w_5} =$	1.20;
$\frac{w_5}{w_1} =$	1.21;
$\frac{w_1}{w_4} =$	1.24;
$\frac{w_4}{w_8} =$	1.25;
$\frac{w_8}{w_3} =$	1.20;
$\frac{w_3}{w_9} =$	1.17;
$\frac{w_9}{w_2} =$	1.14;
$\frac{w_2}{w_7} =$	1.10

Tablo 4.5’te kriter ağırlıkları arasındaki oranların, bir önceki aşamada elde edilen karşılaştırmalı öncelik değerlerine eşit olması koşulu esas alınmıştır. Bu kapsamda oluşturulan eşitlikler, her bir kriterin ağırlığının kendisinden bir üst sırada yer alan kriterin ağırlığına oranını göstermektedir. Örneğin, $w_6/w_5 = 1.20$ eşitliği, C_6 kriterinin ağırlığının C_5 kriterinin ağırlığından 1.20 kat daha fazla olması gerektiğini ifade etmektedir. Benzer şekilde diğer oranlar da sıralı kriterler arasındaki göreceli ağırlık ilişkilerini tanımlamaktadır.

Bu aşamada elde edilen eşitlikler, kriter ağırlıklarının doğrudan sayısal değerlerini değil, ağırlıklar arasındaki oransal ilişkiyi ve dengeyi tanımlayan temel matematiksel koşulları ortaya koymaktadır. Böylece kriter ağırlıkları, karar vericinin belirlediği önem sıralaması ve karşılaştırmalı öncelik değerleri ile tutarlı olacak şekilde yapılandırılmaktadır.

4.3.4. Matematiksel geçişlilik koşulu

Denklem (3.4)’e göre matematiksel geçişlilik koşulu Tablo 4.6’da gösterildiği şekilde hesaplanır.

Tablo 4.6. Karar verici 1 için FUCOM geçişlilik koşulu

Hesaplama	İşlem	Sonuç
$\frac{w_6}{w_1}$	$= 1.20 \times 1.21 = 1.45;$	
$\frac{w_5}{w_4}$	$= 1.21 \times 1.24 = 1.50;$	
$\frac{w_1}{w_8}$	$= 1.24 \times 1.25 = 1.55;$	
$\frac{w_4}{w_3}$	$= 1.25 \times 1.20 = 1.50;$	
$\frac{w_8}{w_9}$	$= 1.20 \times 1.17 = 1.40;$	
$\frac{w_3}{w_2}$	$= 1.17 \times 1.14 = 1.33;$	
$\frac{w_9}{w_7}$	$= 1.14 \times 1.10 = 1.25$	

Tablo 4.6’da kriterler arasındaki karşılaştırmaların matematiksel olarak tutarlı olup olmadığını kontrol etmek amacıyla geçişlilik koşulu uygulanmıştır. Bu koşul, ardışık iki karşılaştırmalı öncelik değerinin çarpımının, ilgili kriterler arasındaki dolaylı karşılaştırma oranını vermesi esasına dayanmaktadır. Örneğin, $w_6/w_1 = 1.20 \times 1.21 = 1.45$ sonucu, C_6 kriterinin C_1 kriterine göre önem düzeyinin dolaylı olarak hesaplandığını ve önceki önem dereceleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Elde edilen diğer sonuçlar da benzer şekilde kriterler arasındaki dolaylı önem ilişkilerini ortaya koymakta ve tüm oranların kendi içinde tutarlı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Bu aşama, belirlenen kriter sıralaması ve karşılaştırmalı öncelik değerlerinin matematiksel açıdan çelişki içermediğini doğrulamakta ve böylece nihai kriter ağırlıklarının güvenilir bir şekilde hesaplanabilmesi için gerekli olan tutarlılık koşulunun sağlandığını ortaya koymaktadır.

4.3.5. Ağırlık katsayılarının belirlenmesi için model

Denklem (3.5) kullanılarak karar verici 1 için Tablo 4.7’de gösterilen ağırlık katsayılarını belirleyen model oluşturulmuştur.

Tablo 4.7. Karar verici 1 için ağırlık katsayılarını belirleyen model

Amaç	Kısıtlar
$\min \chi$	$\left \frac{w_6}{w_5} - 1.20 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_5}{w_1} - 1.21 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_1}{w_4} - 1.24 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_4}{w_8} - 1.25 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_8}{w_3} - 1.20 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_3}{w_9} - 1.17 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_9}{w_2} - 1.14 \right \leq \chi$
	$\left \frac{w_2}{w_7} - 1.10 \right \leq \chi$
	$\sum_{j=1}^9 w_j = 1$

Tablo 4.7’de kriterlere ait nihai ağırlık katsayılarının belirlenebilmesi amacıyla matematiksel bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelde amaç, kriter ağırlıkları arasındaki oranlar ile daha önce belirlenen karşılaştırmalı öncelik değerleri arasındaki sapmayı temsil eden χ değerini minimize etmektir. Modelde yer alan kısıtlar, her bir kriter ağırlığı oranı ile ilgili karşılaştırmalı öncelik değeri arasındaki farkın χ değerinden büyük olmamasını sağlamaktadır. Böylece kriter ağırlıkları, karar vericinin belirlediği önem dereceleri ile mümkün olan en yüksek uyumu gösterecek şekilde hesaplanmaktadır.

Modelde ayrıca tüm kriter ağırlıklarının toplamının 1’e eşit olması ve ağırlık değerlerinin sıfırdan büyük olması koşulları da tanımlanmıştır. Bu koşullar, elde edilen ağırlıkların normalize edilmiş ve karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır.

4.3.6. Nihai ağırlık katsayıları

Modelin çözülmesi sonucunda kriterlere ait ağırlık katsayıları denklem (3.7) kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar Tablo 4.8.'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Karar verici 1 için kriterlere ait ağırlık katsayıları

Kriterler	C ₆	C ₅	C ₁	C ₄	C ₈	C ₃	C ₉	C ₂	C ₇
Ağırlık Katsayıları	(0.2109	0.1757	0.1454	0.1172	0.0937	0.0781	0.0669	0.0586	0.0534) ^T

Modelin çözülmesi sonucunda kriterlere ait nihai ağırlık katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek ağırlık değerine sahip kriter C₆ (0.2109) olup, bu kriter karar sürecinde en etkili kriter olarak öne çıkmıştır. Bunu sırasıyla C₅ (0.1757), C₁ (0.1454) ve C₄ (0.1172) kriterleri izlemiştir. Bu kriterlerin diğer kriterlere göre daha yüksek ağırlık değerlerine sahip olması, karar verici açısından değerlendirme sürecinde daha belirleyici bir rol oynamıştır.

Diğer taraftan, C₈ (0.0937), C₃ (0.0781) ve C₉ (0.0669) kriterlerinin orta düzeyde etkiye sahip olduğu, C₂ (0.0586) ve C₇ (0.0534) kriterlerinin ise en düşük ağırlık değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, kriterlerin karar sürecine katkı düzeylerini nicel olarak ortaya koymakta ve daha önce belirlenen önem sıralaması ile uyumlu bir dağılım göstermektedir.

Çalışma kapsamında yer alan tüm karar vericilere ait kriter ağırlıkları hesaplanmış, hesaplama sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Karar vericilere ait kriter ağırlıkları

Kriter	KV1 (Ağırlık)	KV2 (Ağırlık)	KV3 (Ağırlık)	KV4 (Ağırlık)	KV5 (Ağırlık)
C1	0.1454	0.0824	0.1167	0.0656	0.0696
C2	0.0586	0.1464	0.1459	0.0522	0.1354
C3	0.0781	0.0988	0.1776	0.0573	0.1030
C4	0.1172	0.0507	0.0584	0.1503	0.0548
C5	0.1757	0.1198	0.0801	0.1194	0.1838
C6	0.2108	0.0682	0.2042	0.0767	0.0516
C7	0.0534	0.1796	0.0681	0.1812	0.0613
C8	0.0937	0.0565	0.0517	0.2029	0.2573
C9	0.0670	0.1976	0.0973	0.0945	0.0831

Tablo 4.9'da yer alan kriter ağırlıkları incelendiğinde, karar vericilerin kriterlerin önem düzeylerine ilişkin değerlendirmelerinde hem benzerlikler hem de farklılıklar olduğu görülmektedir. KV1 için en önemli kriter C6 (0.2108) olarak belirlenirken, en düşük ağırlığa sahip kriter C7 (0.0534) olmuştur. Benzer şekilde KV3 de C6 kriterine en yüksek ağırlığı (0.2042) vermiştir. Bu durum, KV1 ve KV3'ün C6 kriterini karar

sürecinde en belirleyici kriterlerden biri olarak gördüklerini ve bu kriter açısından benzer bir değerlendirme eğilimine sahip olduklarını göstermektedir. Buna karşılık KV1'in en düşük önem verdiği kriter C7 iken, KV3'ün en düşük önem verdiği kriter C8 (0.0517) olmuştur. Bu sonuç, her iki karar vericinin en önemli kriter konusunda benzer görüşte olmalarına rağmen, en az önemli kriter konusunda farklı değerlendirmeler yaptıklarını göstermektedir.

KV2'nin değerlendirmesinde en önemli kriterin C9 (0.1976), en az önemli kriterin ise C4 (0.0507) olduğu görülmektedir. KV4 ise en yüksek ağırlığı C8 kriterine (0.2029) verirken, en düşük ağırlığı C2 kriterine (0.0522) vermiştir. Benzer şekilde KV5 de C8 kriterini (0.2573) en önemli kriter olarak değerlendirmiştir. Bu durum, özellikle KV4 ve KV5'in C8 kriterinin önemi konusunda ortak bir görüşe sahip olduklarını göstermektedir. Ancak KV4 için en az önemli kriter C2 iken, KV5 için en az önemli kriter C6 (0.0516) olmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, karar vericiler arasında bazı kriterlerin önemi konusunda görüş birliği bulunduğu, bazı kriterlerde ise farklı değerlendirmelerin yapıldığı anlaşılmaktadır. Özellikle C6 kriterinin KV1 ve KV3 tarafından en önemli kriter olarak belirlenmesi ve C8 kriterinin KV4 ve KV5 tarafından en önemli kriter olarak değerlendirilmesi, bu kriterlerin belirli uzman grupları açısından öne çıktığını göstermektedir. Buna karşılık en düşük öneme sahip kriterler karar vericilere göre değişiklik göstermektedir. Bu durum, kriterlerin öneminin uzmanların bilgi birikimi, deneyimi ve bakış açısına bağlı olarak farklı şekillerde değerlendirilebildiğini ortaya koymaktadır.

Karar vericilere ait kriter ağırlıkları geometrik ortalama yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ve elde edilen değerler normalize edilerek, kriterlerin nihai ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen nihai kriter ağırlıkları Tablo 4.10'da sunulmuştur.

Tablo 4.10. Geometrik ortalama sonuçları ve nihai kriter ağırlıkları

Kriter	Geometrik Ortalama (GM)	Nihai Ağırlık (W _j)
C1	0.0914	0.1019
C2	0.0976	0.1088
C3	0.0958	0.1068
C4	0.0778	0.0868
C5	0.1299	0.1448
C6	0.1030	0.1149
C7	0.0938	0.1045
C8	0.1074	0.1197
C9	0.1002	0.1117

Tablo 4.10’da yer alan geometrik ortalama ve buna bağılı olarak elde edilen nihai kriter ağırlıkları birlikte değerdendirildiğinde, karar vericilerin bireysel değerdendirmelerinin bütünlleştirilmesi sonucunda kriterler arasında dengeli ancak belirgin bir öncelik dağılımı oluştğı görülmektedir. Nihai ağırlık değerdelerine göre en yüksek öneme sahip kriter C5 (0.1448) olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, yatırım maliyetleri kriterinin karar sürecinde en belirleyici unsur olduğunu göstermektedir. Yatırım maliyetlerinin diğerd tüm kriterlere kıyasla daha yüksek ağırlığa sahip olması, karar vericilerin ekonomik faktörleri teknik ve operasyonel faktörlere göre daha öncelikli değerdendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle yatırım gerektiren sistemlerin seçiminde maliyet unsurunun temel belirleyici olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

C5 kriterini sırasıyla C8 (0.1197) ve C6 (0.1149) kriterleri takip etmektedir. C8 kriterinin üst sıralarda yer alması, dijitalleşme ve teknolojik uyumluluk faktörlerinin karar sürecinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu sonuç, sistemlerin mevcut ve gelecekteki teknolojik altyapıya uyum sağlayabilme kapasitesinin karar vericiler açısından kritik bir unsur olarak değerdendirildiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde C6 kriterinin yüksek ağırlık değerdelerine sahip olması, çalışma hızı ve çevrim süresi gibi performans temelli faktörlerin de karar sürecinde önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yalnızca ekonomik değerdil, aynı zamanda sistemin verimliliğı ile ilgili faktörlerin de dikkate alındığını göstermektedir.

Orta düzey önem grubunda yer alan kriterler incelendiğinde, C9 (0.1117), C2 (0.1088), C3 (0.1068) ve C7 (0.1045) kriterlerinin birbirine oldukça yakın ağırlık değerdelerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, söz konusu kriterlerin karar sürecinde birbirine benzer düzeyde etkili olduğunu ve karar vericiler tarafından dengeli bir şekilde değerdendirildiğini göstermektedir. Bu kriterler arasında büyük ağırlık farklarının bulunmaması, bu faktörlerin karar sürecinde tamamlayıcı unsurlar olarak rol oynadığını ve tek başına belirleyici olmadığını, ancak genel değerdendirmeye katkı sağladığını göstermektedir.

En düşük ağırlık değerdelerine sahip kriter ise C4 (0.0868) olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, entegrasyon kolaylığı ve sistem esnekliğı kriterinin diğerd kriterlere kıyasla daha düşük öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu kriterin ağırlık değerdelerinin sıfıra yakın olmaması, tamamen önemsiz olarak değerdendirilmediğini, ancak diğerd kriterlere kıyasla daha düşük öncelik düzeyinde ele alındığını göstermektedir. Benzer şekilde C1 kriterinin (0.1019) de görece daha düşük ağırlığa sahip olması, taşıma

kapasitesi kriterinin karar sürecinde temel belirleyicilerden biri olmadığını, ancak yine de belirli bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, nihai kriter ağırlıkları ekonomik faktörlerin, teknolojik uyumluluk unsurlarının ve operasyonel performans kriterlerinin karar sürecinde ön plana çıktığını göstermektedir. Özellikle yatırım maliyetleri, dijitalleşme uyumluluğu ve çalışma performansına ilişkin kriterlerin üst sıralarda yer alması, karar vericilerin hem ekonomik sürdürülebilirliği hem de teknik verimliliği birlikte dikkate aldığını ortaya koymaktadır.

4.4. Alternatiflerin MARCOS Yöntemi ile Sıralanması

Bu bölümde, FUCOM yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak, çalışmada ele alınan alternatiflerin MARCOS yöntemi ile değerlendirilmesi ve sıralanması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir alternatifin belirlenen kriterlere göre performans değerleri dikkate alınarak karar matrisi oluşturulmuş ve MARCOS yönteminin gerektirdiği işlem adımları izlenerek analiz süreci yürütülmüştür.

Alternatiflerin değerlendirilmesinde, karar matrisine ideal ve anti-ideal çözümler dâhil edilerek, her bir alternatifin bu referans çözümlere göre göreceli konumu belirlenmiştir. MARCOS yöntemi kapsamında gerçekleştirilen normalizasyon, ağırlıklandırma ve fayda fonksiyonu hesaplamaları sonucunda alternatiflerin toplam fayda değerleri elde edilmiştir. Bu değerler esas alınarak alternatifler büyükten küçüğe sıralanmış ve karar problemi için en uygun alternatif belirlenmiştir.

MARCOS yöntemine ait hesaplama adımları, yöntemsel çerçeve doğrultusunda uygulanmıştır. Elde edilen sıralama sonuçları ve ilgili hesaplamalar bu bölümde tablolar hâlinde sunulmuş olup, örnek olarak KV1'in yapmış olduğu değerlendirme paylaşılmıştır. Tablo 4.11'de KV1'e ait karar matrisi verilmiştir. Diğer karar vericilerin sıralama ve hesaplama sonuçları eklerde sunulmuştur.

Tablo 4.11. KV1 için MARCOS değerlendirmesi (karar matrisi)

Kriterler / Alternatifler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	3	1	2	4	5	7	8	9	6
C2	2	1	3	4	6	7	8	9	5
C3	2	1	3	4	6	7	8	9	5
C4	2	1	3	4	5	6	7	8	9
C5	5	4	6	3	2	1	7	8	9
C6	2	1	3	4	5	7	8	9	6
C7	3	2	4	1	5	6	7	8	9
C8	2	1	3	4	5	6	7	8	9
C9	3	2	4	1	5	6	7	8	9

Tablo 4.11’de MARCOS yönteminin ilk adımı kapsamında KV1 tarafından alternatiflerin her bir kritere göre değerlendirilmesiyle oluşturulan başlangıç karar matrisi sunulmaktadır. Bu matriste satırlar kriterleri (C1–C9), sütunlar ise alternatifleri (A1–A9) temsil etmekte olup, her bir hücrede yer alan x_{ij} değeri, ilgili alternatifin ilgili kriter açısından göreceli öncelik düzeyini göstermektedir. Değerlendirmeler, sıralamaya dayalı bir öncelik ölçeği kullanılarak yapılmış olup, bu ölçekte “1 = en yüksek öncelik (en iyi performans)” ve “9 = en düşük öncelik (en zayıf performans)” anlamına gelmektedir. Dolayısıyla tabloda yer alan küçük sayılar alternatifin ilgili kriter açısından daha avantajlı olduğunu, büyük sayılar ise daha düşük önceliğe sahip olduğunu ifade etmektedir.

Tablo genel olarak incelendiğinde, A2 alternatifinin birçok kriter açısından düşük sayısal değerler aldığı, dolayısıyla KV1 tarafından yüksek öncelikli alternatiflerden biri olarak değerlendirildiği görülmektedir. Örneğin C1, C2, C3, C6 ve C8 kriterlerinde A2 alternatifi 1 değeri ile en yüksek önceliğe sahip alternatif konumundadır. Buna karşılık A8 ve A9 alternatiflerinin birçok kriterde 8 ve 9 gibi yüksek değerler aldığı, yani bu alternatiflerin ilgili kriterler açısından daha düşük öncelikli olarak değerlendirildiği anlaşılmaktadır. Özellikle C1, C2, C3, C6 ve C8 kriterlerinde A8 alternatifinin 9 değeri alması, bu alternatifin söz konusu kriterler açısından KV1’e göre en düşük performansa sahip alternatiflerden biri olduğunu göstermektedir.

Bazı kriterler açısından ise farklı alternatiflerin öne çıktığı görülmektedir. Örneğin C5 kriterinde A6 alternatifi 1 değeri ile en yüksek önceliğe sahip alternatif olurken, A9 alternatifi 9 değeri ile en düşük öncelikli alternatif olmuştur. Benzer şekilde C7 ve C9 kriterlerinde A4 alternatifi 1 değeri ile en yüksek önceliğe sahip alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, alternatiflerin tüm kriterlerde aynı performansı göstermediğini ve her alternatifin belirli kriterlerde daha avantajlı bir konumda olabildiğini göstermektedir.

4.4.1. Başlangıç karar verme matrisinin oluşturulması

MARCOS yöntemi başlangıcında, problem kapsamında değerlendirilecek m adet alternatif ve n adet kriter tanımlanır. Buna göre denklem (3.8) kullanılarak başlangıç karar matrisi oluşturulmuştur.

Örnek $X_{1,1}$ hesabı:

$$x_{ij} = (\sum_k x_{ij}^k) * \left(\frac{1}{6}\right)$$

$$x_{1,1} = \frac{3+8+6+4+7+7}{6} = 5.83$$

Örnek $X_{1,1}$ hesabında gösterilen hesaplama ile başlangıç karar matrisinin indisleri hesaplanmıştır. Tablo 4.12’de başlangıç karar matrisi değerleri verilmiştir.

Tablo 4.12. Başlangıç karar karar matrisi

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
AAI (Anti-İdeal)	3.33	2.83	3.33	4.67	5.67	3.33	3.17	3.00	4.83
A1	5.83	7.67	6.83	5.83	5.17	3.33	3.33	3.83	3.17
A2	7.33	6.33	6.83	5.67	5.67	3.50	3.17	3.83	2.67
A3	7.50	7.00	6.33	5.83	4.33	4.17	3.50	3.17	3.17
A4	7.83	5.67	7.00	5.67	5.00	3.83	3.17	3.00	3.83
A5	3.33	2.83	3.33	4.67	5.33	6.50	8.00	6.17	4.83
A6	6.83	7.33	6.50	6.00	4.33	4.00	3.50	3.50	3.00
A7	7.00	6.83	5.33	6.67	4.33	4.67	4.00	3.00	3.17
A8	7.83	6.50	6.67	5.67	4.67	3.67	3.17	3.17	3.67
A9	4.67	7.50	4.33	6.50	4.00	6.00	5.17	4.00	2.83
AI (İdeal)	7.83	7.67	7.00	6.67	4.00	6.50	8.00	6.17	2.67

4.4.2. Genişletilmiş başlangıç matrisinin oluşturulması

Karar vericilerin değerlendirmeleri eşit ağırlıklı kabul edilerek, alternatif–kriter bazında aritmetik ortalama alınmış ve bu şekilde oluşturulan birleşik karar matrisi üzerinden denklem (3.10) ve denklem (3.11) kullanılarak MARCOS yöntemi uygulanmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 4.13’te verilmiştir.

Tablo 4.13. Birleştirilmiş ve genişletilmiş karar matris (ideal ve anti-ideal)

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
AAI (Anti-İdeal)	3.33	2.83	3.33	4.67	5.67	3.33	3.17	3.00	4.83
A1	5.83	7.67	6.83	5.83	5.17	3.33	3.33	3.83	3.17
A2	7.33	6.33	6.83	5.67	5.67	3.50	3.17	3.83	2.67
A3	7.50	7.00	6.33	5.83	4.33	4.17	3.50	3.17	3.17
A4	7.83	5.67	7.00	5.67	5.00	3.83	3.17	3.00	3.83
A5	3.33	2.83	3.33	4.67	5.33	6.50	8.00	6.17	4.83
A6	6.83	7.33	6.50	6.00	4.33	4.00	3.50	3.50	3.00
A7	7.00	6.83	5.33	6.67	4.33	4.67	4.00	3.00	3.17
A8	7.83	6.50	6.67	5.67	4.67	3.67	3.17	3.17	3.67
A9	4.67	7.50	4.33	6.50	4.00	6.00	5.17	4.00	2.83
AI (İdeal)	7.83	7.67	7.00	6.67	4.00	6.50	8.00	6.17	2.67

Tablo 4.13’te karar vericilerin değerlendirmelerinin birleştirilmesiyle elde edilen grup karar matrisi ile MARCOS yönteminin temel bileşenlerinden olan anti-ideal (AAI) ve ideal (AI) çözümler gösterilmektedir. Birleştirilmiş karar matrisi, her bir alternatife her bir kriterle ilişkin performans değerlerinin karar verici değerlendirmelerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmesiyle oluşturulmuştur. Tabloda kullanılan ölçekte düşük değerler alternatife ilgili kriter açısından daha yüksek önceliğe sahip olduğunu, yüksek değerler ise daha düşük önceliği ifade etmektedir. Bu nedenle alternatiflerin performansı

değerlendirilirken değerlerin ideal çözüme yakınlığı ve anti-ideal çözümden uzaklığı dikkate alınmaktadır. Anti-ideal çözüm satırı, her bir kriter için alternatifler arasında en düşük performansı temsil eden değerlerden; ideal çözüm satırı ise en yüksek performansı temsil eden değerlerden oluşturulmuştur. Bu iki referans nokta, alternatiflerin göreceli performanslarının belirlenmesinde temel karşılaştırma düzeyini oluşturmaktadır.

Alternatifler genel olarak değerlendirildiğinde, bazı alternatiflerin belirli kriterlerde ideal çözüme daha yakın performans sergilediği görülmektedir. Örneğin A4 alternatifinin C1 kriterinde 7.83 değeri ile ideal çözüm değeriyle aynı seviyede olduğu, bu kriter açısından en güçlü alternatiflerden biri olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde A7 alternatifinin C4 kriterinde 6.67 değeri ile ideal çözüme ulaştığı, ayrıca A5 alternatifinin C6 ve C7 kriterlerinde sırasıyla 6.50 ve 8.00 değerleri ile ideal çözüm seviyesinde yer aldığı görülmektedir. Buna karşılık A5 alternatifinin C1, C2, C3 ve C4 kriterlerinde anti-ideal değerlere oldukça yakın olduğu, bu kriterler açısından göreceli olarak daha zayıf bir performans sergilediğini göstermektedir. Genel olarak tablo incelendiğinde, hiçbir alternatifin tüm kriterlerde ideal çözüme tamamen ulaşamadığı, ancak bazı alternatiflerin belirli kriterlerde daha avantajlı konumda olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, alternatiflerin çok kriterli bir yapı içerisinde farklı, güçlü ve zayıf yönleri sahip olduğunu göstermekte olup, MARCOS yönteminin sonraki aşamalarında gerçekleştirilecek normalizasyon ve fayda fonksiyonu hesaplamaları ile alternatiflerin genel performans düzeyleri ve nihai sıralamaları belirlenmiştir.

4.4.3. Genişletilmiş başlangıç matrisinin normalize edilmesi

Normalize edilmiş matris $N = [n_{ij}]$, kriter türüne bağlı olarak denklem (3.12) ve denklem (3.13) kullanılarak elde edilir.

Örnek hesap:

$$n_{AAI,C1} = \frac{x_{AAI,C1}}{x_{AI,C1}} = \frac{3.333}{7.833} = 0.4253$$

Örnek hesapta gösterilen hesaplamada fayda kriteri olan $n_{AAI,C1}$ indisi denklem (3.13) kullanılarak hesaplanmıştır. Diğer indislerde kriter türüne göre belirtilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda Tablo 4.14.'te verilen normalize edilmiş matris oluşturulmuştur.

Tablo 4.14. Normalize edilmiş matris

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
AAI (Anti-İdeal)	0.43	0.37	0.48	0.70	0.71	0.51	0.40	0.49	0.55
A1	0.74	1.00	0.98	0.88	0.77	0.51	0.42	0.62	0.84
A2	0.94	0.83	0.98	0.85	0.71	0.54	0.40	0.62	1.00
A3	0.96	0.91	0.90	0.88	0.92	0.64	0.44	0.51	0.84
A4	1.00	0.74	1.00	0.85	0.80	0.59	0.40	0.49	0.70
A5	0.43	0.37	0.48	0.70	0.75	1.00	1.00	1.00	0.55
A6	0.87	0.96	0.93	0.90	0.92	0.62	0.44	0.57	0.89
A7	0.89	0.89	0.76	1.00	0.92	0.72	0.50	0.49	0.84
A8	1.00	0.85	0.95	0.85	0.86	0.56	0.40	0.51	0.73
A9	0.60	0.98	0.62	0.98	1.00	0.92	0.65	0.65	0.94
AI (İdeal)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tablo 4.13'te, genişletilmiş karar matrisindeki değerler MARCOS yöntemi kapsamında Tablo 4.14'te normalize edilerek kriterler arasında karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Normalizasyon işlemi sonucunda tüm kriterler için ideal çözüm değerleri 1'e eşitlenmiş, diğer alternatiflerin değerleri ise bu referans değere göre oransal olarak ifade edilmiştir. Bu kapsamda normalize edilmiş değerlerin 1'e yakın olması, alternatifin ilgili kriter açısından ideal çözüme daha yakın ve daha avantajlı olduğunu, düşük değerler ise ideal çözümden uzaklaştığını göstermektedir.

4.4.4. Ağırlıklı matrisin belirlenmesi

Ağırlıklı matris indisleri denklem (3.14) kullanılarak hesaplanmıştır.

Örnek hesap:

$$v_{a1,c1} = n_{a1,c1} \times w_{c1} = 0.745 \times 0.102 = 0.0758$$

Diğer indislerde örnek hesapta gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.15. Ağırlıklı normalize matris

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
AAI (Anti-İdeal)	0.04	0.04	0.05	0.06	0.10	0.06	0.04	0.06	0.06
A1	0.08	0.11	0.10	0.08	0.11	0.06	0.04	0.07	0.10
A2	0.10	0.09	0.10	0.07	0.10	0.06	0.04	0.07	0.12
A3	0.10	0.10	0.10	0.08	0.13	0.07	0.05	0.06	0.10
A4	0.10	0.08	0.11	0.07	0.12	0.07	0.04	0.06	0.08
A5	0.04	0.04	0.05	0.06	0.11	0.11	0.10	0.12	0.06
A6	0.09	0.10	0.10	0.08	0.13	0.07	0.05	0.07	0.10
A7	0.09	0.10	0.08	0.09	0.13	0.08	0.05	0.06	0.10
A8	0.10	0.09	0.10	0.07	0.12	0.06	0.04	0.06	0.09
A9	0.06	0.11	0.07	0.08	0.14	0.11	0.07	0.08	0.11
AI (İdeal)	0.10	0.11	0.11	0.09	0.14	0.11	0.10	0.12	0.12

Tablo 4.14'te, normalize edilmiş değerler FUCOM yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılarak Tablo 4.15'te verilen değerler elde edilmiştir. Bu değerler ağırlıklı normalize matrisi oluşturmuştur. Bu işlem sonucunda her bir alternatifin kriterler

açısından performansı, kriterlerin önem düzeyleri dikkate alınarak yeniden ifade edilmiştir. Tabloda yer alan yüksek değerler, alternatifin ilgili kriterde hem iyi performans gösterdiğini hem de bu kriterin karar sürecinde önemli bir ağırlığa sahip olduğunu göstermektedir.

4.4.5. Alternatiflerin fayda derecelerinin hesaplanması

Fayda dereceleri denklem (3.15), denklem (3.16) ve denklem (3.17) kullanılarak aşağıda örnek hesapta gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

Örnek hesap:

$$S_{a1} = \sum_{j=1}^9 v_{a1,j} = S_{a1x} + S_{a1y}$$

$$S_{a1x} = 0.07588 + 0.10880 + 0.10426 + 0.07595 + 0.11210$$

$$S_{a1y} = 0.05892 + 0.04354 + 0.07441 + 0.09406$$

$$S_{a1} = 0.74793$$

$$K_{a1}^- = \frac{S_{a1}}{S_{AAI}} = \frac{0.747}{0.517} = 1.445$$

$$K_{a1}^+ = \frac{S_{a1}}{S_{AI}} = \frac{0.747}{0.999} = 0.748$$

Diğer değerlerde aynı denklemler kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.16’da verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.16. Fayda dereceleri (K- ve K+)

Alternatif	K-	K+
A1	1.4456	0.7485
A2	1.4605	0.7562
A3	1.5035	0.7785
A4	1.3977	0.7237
A5	1.3592	0.7038
A6	1.5222	0.7882
A7	1.5013	0.7773
A8	1.4343	0.7426
A9	1.5832	0.8197

Tablo 4.16’da alternatiflerin anti-ideal (K⁻) ve ideal (K⁺) çözümlere göre fayda dereceleri gösterilmektedir. K⁻ değeri, alternatifin anti-ideal çözüme göre ne kadar iyi durumda olduğunu; K⁺ değeri ise ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu ifade etmektedir. Bu kapsamda K⁺ değerinin yüksek olması, alternatifin genel performans açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

4.4.6. Alternatiflerin fayda fonksiyonunun belirlenmesi

Her bir alternatifin fayda fonksiyonu denklem (3.19), denklem (3.20) ve denklem (3.18) kullanılarak hesaplanmıştır.

Örnek hesap:

$$f(K_{a1}^+) = \frac{K_{a1}^+}{K_{a1}^+ + K_{a1}^-} = \frac{1.445}{2.193} = 0.65894$$

$$f(K_{a1}^-) = \frac{K_{a1}^-}{K_{a1}^+ + K_{a1}^-} = \frac{0.748}{2.193} = 0.3410$$

$$f(K_{a1}) = \frac{K_{a1}^+ + K_{a1}^-}{1 + \frac{1-f(K_{a1}^+)}{f(K_{a1}^+)} + \frac{1-f(K_{a1}^-)}{f(K_{a1}^-)}} = \frac{0.748+1.44514}{1+0.5176+1.932} = 0.63577$$

Bu hesaplamalar sonucunda Tablo 4.17 oluşturulmuştur.

Tablo 4.17. Fayda fonksiyonları değerleri [f(K-), f(K+), f(Ki)]

Alternatif	f(K-)	f(K+)	f(Ki)
A1	0.3411	0.6589	0.6361
A2	0.3411	0.6589	0.6427
A3	0.3411	0.6589	0.6616
A4	0.3411	0.6589	0.6151
A5	0.3411	0.6589	0.5981
A6	0.3411	0.6589	0.6699
A7	0.3411	0.6589	0.6606
A8	0.3411	0.6589	0.6311
A9	0.3411	0.6589	0.6967

Tablo 4.17’de alternatiflerin MARCOS yöntemi kapsamında hesaplanan nihai fayda fonksiyonu değerleri gösterilmektedir. Tabloda yer alan f(Ki) değerleri, alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlere göre genel performansını ifade eden nihai fayda düzeyidir. Bu değer yüksek olması, alternatifin genel olarak daha iyi performans gösterdiğini ve ideal çözüme daha yakın olduğunu göstermektedir.

4.4.7. Alternatiflerin sıralanması

Denklem (3.18) kullanılarak elde edilen fayda değeri sonuçları, alternatiflerin nihai fayda fonksiyonu $f(K_i)$ değerlerine göre Tablo 4.18’de büyükten küçüğe sıralanmıştır. En yüksek fayda fonksiyonuna sahip alternatif, karar problemi için en uygun alternatif olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.18. Nihai sıralama sonuçları

Sıra	Alternatif	Skor (f(Ki))	Sıra	Alternatif	Skor (f(Ki))
1	A9	0.6967	6	A1	0.6361
2	A6	0.6699	7	A8	0.6311
3	A3	0.6616	8	A4	0.6151
4	A7	0.6606	9	A5	0.5981
5	A2	0.6427			

MARCOS yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre alternatifler, hesaplanan fayda fonksiyonu değerleri $f(K_i)$ esas alınarak Tablo 4.18’de verilen tabloda sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, A9 alternatifinin 0,6967 fayda değeri ile en yüksek skora sahip olduğu ve karar problemi için en uygun alternatif olarak belirlendiği görülmektedir. Bu sonuç, A9 markasının ideal çözüme en yakın ve anti-ideal çözüme en uzak alternatif olduğunu göstermektedir.

A9 sırasıyla A6 (0.6699), A3 (0.6616) ve A7 (0.6606) alternatifleri takip etmektedir. Üst sıralarda yer alan bu markaların fayda değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, söz konusu robotların teknik, ekonomik ve operasyonel kriterler açısından benzer ve yüksek performans düzeylerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Orta sıralarda bulunan A2 (0.6427) ve A1 (0.6361) alternatifleri, ideal çözüme göre kabul edilebilir bir performans sergilemekle birlikte, özellikle bazı kriterler açısından üst sıralarda yer alan alternatiflere kıyasla görece daha düşük fayda değerlerine sahiptir. Bu durum, A2 ve A1 markalarının belirli güçlü yönleri sahip olduğunu göstermekle birlikte, çalışmada ele alınan kriterlerin tümü dikkate alındığında ilk sıralarda yer alan alternatiflerin gerisinde kaldığını göstermektedir.

Alt sıralarda yer alan A8 (0.6311), A4 (0.6151) ve A5 (0.5981) alternatiflerinin ise hem ideal çözüme olan uzaklıklarının hem de toplam fayda değerlerinin daha yüksek olduğu, dolayısıyla karar problemi açısından daha az uygun seçenekler sunduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, MARCOS yöntemi ile elde edilen sıralama sonuçları, otomotiv yan sanayisinde kaynak operasyonları için robot seçimi probleminde A9’un en uygun alternatif olduğunu ortaya koymakta; diğer markalar arasındaki performans farklarını ise açık ve karşılaştırılabilir bir biçimde göstermektedir.

4.5. Duyarlılık Analizi

Bu bölümde, karar modelinde kullanılan kriter ağırlıklarının alternatiflerin nihai sıralamaları üzerindeki etkisini ortaya koymak ve sonuçların ne ölçüde kararlı olduğunu değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Çok kriterli karar verme problemlerinde kriter ağırlıkları, alternatiflerin performans değerlerini ve buna bağlı olarak nihai sıralamayı doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, ağırlıklarda meydana gelebilecek olası dalgalanmaların karar sonuçlarını nasıl

etkilediğinin analiz edilmesi, önerilen modelin güvenilirliği, kararlılığı ve sağlamlığının test edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde duyarlılık analizinin temel olarak üç farklı yaklaşımla gerçekleştirilebileceği belirtilmektedir: Bunlardan ilki, kriter ağırlıklarındaki değişikliklerin sıralama sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır; ikincisi sıralama sonuçlarının dinamik bir ortamda incelenmesini esas alan yöntemlerdir; sonuncusu ise önerilen hibrit modelin sonuçlarının çeşitli ÇKKV yaklaşımlarıyla karşılaştırılmasıdır. Bu çalışmada, modelin sağlamlığını ve önerilen çözümün tutarlılığını ölçmek amacıyla, literatürde yaygın olarak kabul gören ve kriter ağırlıklarının sistematik olarak değiştirilmesiyle sıralama sonuçlarının incelenmesini esas alan yöntem tercih edilmiştir (Božanić vd., 2021; Pamučar vd., 2021).

$$\omega_i^* = \frac{\omega_i(1 - \omega_c^*)}{1 - \omega_c} \quad (4.1)$$

Bu kapsamda, her bir kriterin ağırlığı ayrı ayrı ele alınmış ve söz konusu kriterin ağırlığı %10'dan başlayarak %100'e kadar %10'luk artışlarla kademeli olarak artırılmıştır. Her bir senaryoda ilgili kriterin ağırlığı artırılırken diğer kriterlerin ağırlıkları denklem (4.1) kullanılarak modele uygun şekilde yeniden düzenlenmiş ve her senaryo için alternatiflerin MARCOS yöntemi kapsamında fayda fonksiyonu değerleri yeniden hesaplanmıştır. Böylece kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatiflerin performans değerleri ve sıralamaları üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen bu analiz sayesinde, hangi alternatiflerin belirli kriterlere karşı daha duyarlı olduğu, hangi alternatiflerin farklı ağırlık senaryolarında sıralamasını koruduğu ve hangi kriterlerin karar sonucu üzerinde daha belirleyici olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca bu süreç, elde edilen nihai sıralamanın belirli bir kriter ağırlığına aşırı bağımlı olup olmadığını değerlendirmeye ve modelin genel tutarlılığını test etmeye olanak sağlamıştır. Duyarlılık analizi sonucunda elde edilen bulgular, karar vericilere daha güvenilir ve sağlam bir değerlendirme sunmakta olup, alternatiflerin farklı öncelik durumlarına göre nasıl bir performans göstereceğini ortaya koyması açısından önemli katkı sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, Tablo 4.19'da C1 kriteri için, eklerde verilen tablolarda ise her bir kriter için ayrı ayrı sunulmuş ve ilgili kriter ağırlığındaki değişimin alternatif sıralamalarına etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

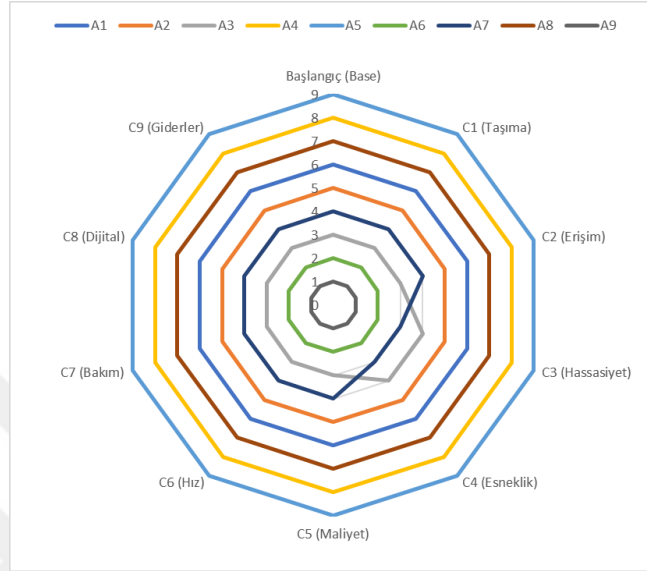
Tablo 4.19. C1 kriteri için duyarlılık analizi senaryoları

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.635 (6.)	0.643 (5.)	0.660 (3.)	0.615 (8.)	0.599 (9.)	0.670 (2.)	0.659 (4.)	0.630 (7.)	0.697 (1.)
%20 (0.2)	0.637 (8.)	0.663 (5.)	0.680 (2.)	0.644 (7.)	0.576 (9.)	0.681 (1.)	0.673 (4.)	0.658 (6.)	0.679 (3.)
%30 (0.3)	0.639 (8.)	0.684 (5.)	0.701 (1.)	0.674 (6.)	0.553 (9.)	0.692 (2.)	0.687 (3.)	0.686 (4.)	0.662 (7.)
%40 (0.4)	0.642 (8.)	0.704 (3.)	0.722 (1.)	0.703 (4.)	0.529 (9.)	0.703 (5.)	0.701 (6.)	0.713 (2.)	0.644 (7.)
%50 (0.5)	0.644 (7.)	0.725 (4.)	0.743 (1.)	0.733 (3.)	0.505 (9.)	0.714 (6.)	0.715 (5.)	0.742 (2.)	0.625 (8.)
%60 (0.6)	0.646 (7.)	0.747 (4.)	0.764 (2.)	0.763 (3.)	0.481 (9.)	0.725 (6.)	0.730 (5.)	0.770 (1.)	0.607 (8.)
%70 (0.7)	0.649 (7.)	0.768 (4.)	0.785 (3.)	0.793 (2.)	0.456 (9.)	0.736 (6.)	0.744 (5.)	0.799 (1.)	0.588 (8.)
%80 (0.8)	0.651 (7.)	0.789 (4.)	0.807 (3.)	0.824 (2.)	0.431 (9.)	0.748 (6.)	0.759 (5.)	0.827 (1.)	0.570 (8.)
%90 (0.9)	0.653 (7.)	0.811 (4.)	0.828 (3.)	0.855 (2.)	0.406 (9.)	0.759 (6.)	0.773 (5.)	0.856 (1.)	0.551 (8.)
%100 (1.0)	0.655 (7.)	0.832 (4.)	0.850 (3.)	0.886 (1.)	0.381 (9.)	0.770 (6.)	0.788 (5.)	0.886 (2.)	0.531 (8.)

Tablo 4.19’da yer alan C1 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10 iken A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, ağırlığın artırılmasıyla birlikte sıralamanın değiştiği görülmektedir. %30–%50 aralığında A3 alternatifinin, %60–%90 aralığında ise A8 alternatifinin ilk sıraya yükseldiği, %100 senaryosunda ise A4 ve A8 alternatiflerinin en yüksek fayda değerine ulaştığı belirlenmiştir. C1 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A3, A4 ve A8 alternatiflerinin sıralamada yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık A9 alternatifinin sıralamada gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C1 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili bir kriter olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer kriterler için gerçekleştirilen duyarlılık analizi sonuçları ekler bölümünde gösterilmiştir.

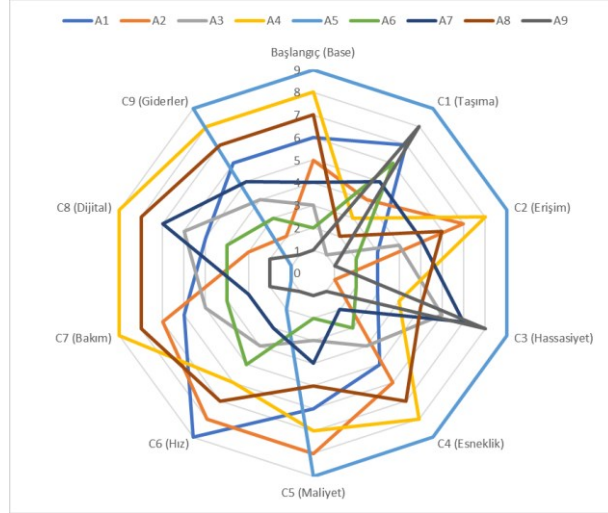
C1 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçlarının daha bütüncül bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, alternatiflerin farklı ağırlık senaryoları altındaki performansları radar grafikler yardımıyla görselleştirilmiştir. Bu kapsamda %10, %50 ve %100 ağırlık senaryolarına ilişkin sonuçlar Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, örneklem teşkil etmesi amacıyla Tablo 4.19’da C1 kriteri özelinde sunulmuş; diğer kriterlere ait detaylı veri setleri ise ekler bölümünde paylaşılmıştır. Bununla birlikte, modelin bütüncül performansını ve alternatiflerin tüm kriter senaryoları altındaki genel karakteristiklerini aynı anda gözlemleyebilmek adına radar grafiklerinden yararlanılmıştır.



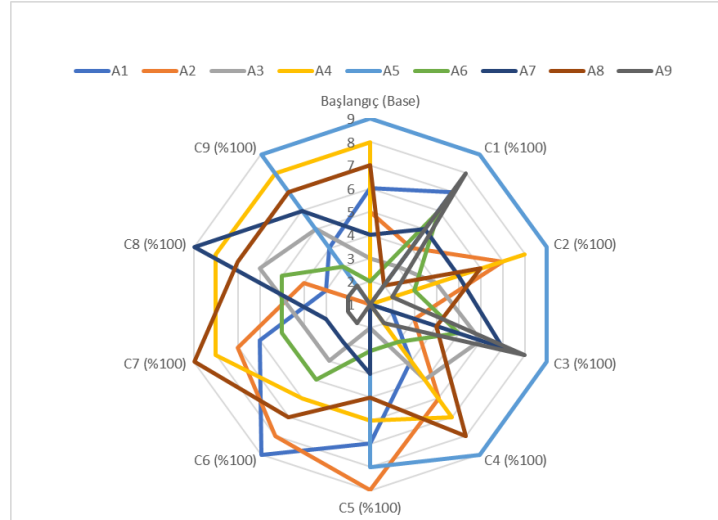
Şekil 4.2 Kriter ağırlıklarındaki %10 değişim senaryosu altında alternatiflerin sıralama duyarlılığı

Şekil 4.1 incelendiğinde, kriter ağırlıklarının %10 oranında sistematik olarak değiştirildiği senaryoların tamamında ana modelde birinci sırada yer alan A9 robotunun yerini koruduğu görülmektedir. Grafikteki iç içe geçmiş halkaların birbirini kesmeyen düzenli yapısı, modelin düşük ölçekli parametre değişimlerine karşı yüksek bir kararlılık sergilediğini ispatlamaktadır. Bu aşamada A9’u takiben A6 ve A3 robotlarının da sıralamadaki yerlerini muhafaza etmesi, kurulan modelin güvenilir bir temele dayandığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.3 Kriter ağırlıklarındaki %50 değişim senaryosu altında alternatiflerin sıralama duyarlılığı

Kriterlerin karar üzerindeki baskınlığının %50 seviyesine çıkarıldığı senaryolar Şekil 4.2’de sunulmuştur. Bu radikal ağırlık kaymalarına rağmen A9 robotu, test edilen dokuz kriterin beşinde (C2, C4, C5, C6 ve C9) liderliğini sürdürerek güçlü bir direnç göstermiştir. Ancak bu hassasiyet düzeyinde bazı kırılma noktaları gözlemlenmiştir; örneğin C1 kriteri %50 ağırlığa ulaştığında liderlik A3 robotuna, C7 ve C8 gibi teknoloji odaklı kriterlerde ise liderlik A5 robotuna geçmektedir. Çizgilerin kesişmeye başladığı bu yapı, alternatiflerin farklı teknik yetkinlik alanlarına sahip olduğunu ve modelin bu uzmanlık alanlarını doğru şekilde teşhis ettiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.4 Kriter ağırlıklarındaki %100 değişim senaryosu altında alternatiflerin sıralama duyarlılığı

Duyarlılık analizinin en uç noktası olan %100 ağırlık (ekstrem senaryo) sonuçları Şekil 4.3’te sunulmuştur. Bu grafik, her bir kriterin karara tek başına etki etmesi durumunda alternatiflerin karakteristik sınırlarını ortaya koyan bir "stres testi" niteliğindedir. Sonuçlar, A9 alternatifinin özellikle yatırım maliyeti (C5) odağında

rakipsiz olduğunu, buna karşılık hız ve dijitalleşme (C6, C7, C8) gibi teknik uçlarda A5 robotunun uzmanlaştığını göstermektedir. A9'un başlangıç modelindeki liderliği, tüm bu uç teknik yetkinlikler arasında en rasyonel dengeyi kuran alternatif olmasından kaynaklanmaktadır.

Duyarlılık analizi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; kriter ağırlıklarında yapılan değişikliklerin alternatif sıralamaları üzerinde doğrudan etkili olduğu ve ağırlıkların belirli seviyelere ulaşmasıyla birlikte sıralamanın değiştiği görülmektedir. Bazı kriterlerin ağırlığı artırıldığında belirli alternatiflerin üst sıralara çıkması, bu robotların ilgili kriterler açısından yüksek performans kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, ana modelde en uygun seçenek olarak belirlenen A9 robotunun farklı senaryoların çoğunda üst sıralardaki yerini koruması, verilen kararın kararlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.

Sıralamanın diğer ucunda yer alan A5 alternatifi ise, analiz edilen senaryoların genelinde alt sıralarda kalarak modelin en düşük performanslı seçeneği olma özelliğini sürdürmüştür. En uygun seçenek (A9) ile en düşük performanslı seçenek (A5) arasındaki bu belirgin fark, modelin alternatifleri ayırt etme yeteneğinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır.

Elde edilen bulgular, modelin rastlantısal sonuçlar üretmediğini, aksine ağırlık değişimlerine karşı mantıksal bir tutarlılık ve yüksek bir direnç sergilediğini ortaya koymuştur. Analiz verileri, MARCOS yöntemi ile ulaşılan sıralama sonuçlarının güvenilir olduğunu; önerilen karar modelinin farklı ağırlık senaryoları altında bile mantıklı sonuçlar üreterek karar vericiler için rasyonel ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu doğrulamaktadır.

5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, otomotiv üretim süreçlerinde kaynak operasyonları için optimal endüstriyel robot yatırım kararının, çok sayıda teknik ve ekonomik kriterin eş zamanlı değerlendirilmesini gerektiren stratejik bir problem olduğu ortaya konulmuştur. Bu amaçla FUCOM ve MARCOS yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanıldığı, tutarlılığı yüksek ve uygulamaya dönük bir karar destek modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, A9 alternatifinin en uygun robot olarak belirlenmesi hem marka sıralaması hem de kriter önceliklendirmesi açısından literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatür incelendiğinde, robot seçimi çalışmalarının önemli bir bölümünün teknik performans odaklı olduğu (Karsak, 1998; Anand vd., 2014; Parameshwaran vd., 2015); ancak finansal sürdürülebilirlik, dijital dönüşüm uyumu ve toplam sahip olma maliyeti gibi stratejik boyutların görece daha sınırlı ele alındığı görülmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma yalnızca teknik uygunluğu değil, yatırımın işletmeye uzun vadeli katkısını merkeze alan bütüncül bir perspektif sunmaktadır.

Çalışma sonucunda alternatif sıralaması $A9 > A6 > A3$ şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sıralama, literatürdeki bazı bulgularla örtüşmekle birlikte, belirli açılardan farklılaşmaktadır. Örneğin, Şahin (2020) tarafından dokuz hibrit ÇKKV modelinin test edildiği çalışmada, A1 modeli en tutarlı alternatif olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise A1 modelinin altıncı sırada yer alması, kriter ağırlıklarının farklılaşmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle C5 (Yatırım Maliyeti) ve C8 (Dijitalleşme/Uyumluluk) kriterlerine verilen yüksek ağırlık, yüksek ilk yatırım maliyetine sahip markaların geriye düşmesine neden olmuştur. Bu durum, marka prestijinden ziyade finansal etkinliğin ön plana çıkarıldığı bir karar mantığını yansıtmaktadır.

Gamal ve Mohamed (2023)'in otomotiv sektörü kapsamında robot seçimine yönelik yapmış oldukları çalışmalarında A3 ve A2 alternatifleri öncelikli alternatifler olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada A3 alternatifinin ilk üçte yer alması bu bulguyu destekler niteliktedir. Ancak birinci sırada A9 alternatifinin yer alması, Uzak Doğu menşeli robotların Avrupa menşeli rakiplerine kıyasla daha avantajlı maliyet-performans oranı sunmasıyla açıklanabilmektedir. Bu durum, özellikle orta ölçekli otomotiv yan sanayi işletmeleri için kritik bir tercih faktörü oluşturmaktadır.

Parameshwaran vd. (2015) tarafından robot seçimine yönelik bulanık TOPSIS ve bulanık VIKOR yöntemleriyle yapılan çalışmada teknik kriterlerin sıralamayı

domine ettiği belirtilmiştir. Buna karşılık mevcut çalışmada teknik performans tek başına belirleyici olmamıştır. A9 alternatifinin liderliğinde; enerji tüketimi, kurulum maliyeti ve dijital entegrasyon kabiliyeti gibi işletme temelli kriterler belirleyici rol oynamıştır. Bu yaklaşım, robotun “ne yapabildiğinden” ziyade “işletmeye ne kazandırdığına” odaklanan daha stratejik bir değerlendirme erevesi sunmaktadır.

Robot seçimi literatüründe kriter öncelikleri konusunda belirgin bir fikir birliği bulunmamaktadır. Karsak (1998) ve Anand (2014) gibi alışmalar, “Hassasiyet” ve “Yük Kapasitesi” gibi teknik kriterleri en kritik faktörler olarak tanımlamıştır. Ancak bu çalışmada en yüksek ağırlık C5 (Yatırım Maliyeti – 0.1448) kriterine verilmiştir. Bu sonuç, otomotiv yan sanayisinde finansal sürdürülebilirliğin hlen temel belirleyici olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte C8 (Dijitalleşme/Uyumluluk) ve C6 (alışma Hızı) kriterlerinin st sıralarda yer alması, sektörün yalnızca maliyet değil; hız, veri entegrasyonu ve Endüstri 4.0 uyumu ekseninde dönüşüm geçirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, klasik üretim paradigmasından akıllı üretim altyapısına geçişin nicel bir yansımasıdır.

Silva vd. (2022) alışmasında cobot ve endüstriyel robot yatırımlarında “Esneklik” ve “Güvenlik” kriterlerinin yükselen trend olduğunu vurgulamıştır. Ancak bu çalışmada C4 kriterinin görece düşük kalması, analiz edilen BIW hattının yüksek hız ve rijitlik gerektiren yapısından kaynaklanmaktadır. BIW hatlarında esneklikten ziyade çevrim süresi stabilitesi ve tekrar hassasiyeti daha kritik olduğundan, karar vericilerin öncelikleri de bu doğrultuda şekillenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan FUCOM–MARCOS hibrit modeli, literatrde sıkça kullanılan ÇKKV yöntemleriyle metodolojik açıdan kıyaslanacak olursa; İmran ve Ullah (2025) tarafından otomotiv sektöründe uygulanan EDAS yöntemi, alternatifleri yalnızca ortalama çözüme uzaklık üzerinden değerlendirirken; bu çalışmada kullanılan MARCOS yöntemi, alternatiflerin hem ideal hem de anti-ideal çözüme olan greliliklerini aynı anda dikkate alarak daha geniş bir karar yelpazesi sunmuştur. Bu metodolojik hassasiyet, özellikle A9 ile A6 alternatifleri arasındaki küçük puan farklarının daha güvenilir ve kararlı bir şekilde ayrıştırılmasını sağlamıştır. Öte yandan, Vahdani vd. (2014) tarafından kullanılan IVF-COPRAS gibi yöntemler belirsizlik yönetimine odaklansa da bu çalışmada entegre edilen FUCOM yöntemi, minimum ikili karşılaştırma ile tam tutarlılık ($\chi = 0.00$) koşulunu sağlamıştır. Bu durum, karar verici yargılarındaki öznel hataları

matematiksel optimizasyonla dengeleyerek, hataya tahammülü olmayan otomotiv üretim hatları için kritik bir güvenlik katmanı oluşturmuştur.

Elde edilen sonuçların piyasa dinamiklerine ve değişen stratejik önceliklere karşı direncini ölçmek amacıyla gerçekleştirilen 90 senaryolu duyarlılık analizi, modelin yüksek kararlılığa sahip olduğunu kanıtlamıştır. Kriter ağırlıklarında yapılan %10 ila %30'luk değişimlere rağmen A9 alternatifinin liderliğini koruması, çözümün tesadüfi değil, sağlam bir temele dayandığını göstermektedir. Bununla birlikte, operasyonel hız (C6) ve servis hızı (C7) gibi kriterlerin aşırı baskın olduğu uç senaryolarda farklı alternatiflerin öne çıkması, modelin statik bir araç değil; işletmenin vizyonuna göre esneyebilen dinamik bir karar destek mekanizması olduğunu ortaya koymaktadır. Analiz sonucunda en yüksek ağırlığın Yatırım Maliyeti (C5 – 0.1448) kriterine verilmesi, otomotiv yan sanayisinde finansal sürdürülebilirliğin ana belirleyici olduğunu teyit etmektedir. Ancak hemen ardından gelen Dijitalleşme/Uyumluluk (C8) ve Çalışma Hızı (C6) kriterlerinin yüksek ağırlıkları, sektörün klasik üretim paradigmasından akıllı üretim ekosistemine geçişini nicel olarak belgelemektedir. Bu kapsamda birinci sırada yer alan A9 alternatifi; yalnızca teknik bir yeterlilik değil, aynı zamanda maliyet-etkinlik ve dijital entegrasyon kapasitesi arasında optimize edilmiş bir uzlaşık çözüm sunmaktadır.

Sektörel açıdan değerlendirildiğinde, otomotiv endüstrisindeki karar vericilerin robot yatırımlarında sadece ilk satın alma maliyetini değil; enerji tüketimi, bakım giderleri ve yedek parça maliyetlerini kapsayan 10-15 yıllık toplam sahip olma maliyeti projeksiyonlarını esas almaları önerilmektedir. Ayrıca teknolojik yatırımın verimliliği insan kaynağının yetkinliğiyle doğrudan ilişkili olduğundan, manuel operasyonlarda görevli personelin robot operatörlüğü yönünde eğitilmesi sistemin sürdürülebilirliği için elzemdir. Fiziksel kurulum öncesinde dijital ikiz teknolojilerinden yararlanılması ve seçilen robotik hücrelerin gelecekteki tasarım değişikliklerine uyum sağlayabilecek modüler yapıda olması, yatırımın teknolojik ömrünü uzatacaktır.

Gelecek araştırmalarda, karar verme süreçlerindeki belirsizliği daha hassas modellemek adına bulanık veya aralık değerli yaklaşımların modele dahil edilmesi ve karbon ayak izi gibi çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin eklenmesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır. Sonuç olarak bu çalışma, endüstriyel robot seçimini teknik bir satın alma kararı olmaktan çıkarıp, finansal rasyonalite ile dijital dönüşüm vizyonunu birleştiren stratejik bir yatırım problemine dönüştürerek, otomotiv sektörü için bilimsel ve uygulanabilir bir rehber ortaya koymuştur.

6. KAYNAKÇA

- Ada, M. (2022). TOPSIS ve AHP Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Personel Seçim Sürecine Uygulanması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 186-200. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1018279>
- Aguilar, M. J. R., Cardiel, I. A., & Somolinos, J. A. C. (2024). IIoT System for Intelligent Detection of Bottleneck in Manufacturing Lines. *Applied Sciences*, 14(1), 323. <https://doi.org/10.3390/app14010323>
- Alhassan, M., & Bashiru, Y. (2018). Analysis of Skills Needs in Repair Welding of Low-Alloy, High Tensile Steels Using the Manual Metal Arc Welding (MMAW) Process. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. https://asrjetsjournal.org/American_Scientific_Journal/article/view/4338
- Almacen, R. M., et al. (2023). Preparedness indicator system for Education 4.0 with FUCOM and rough sets. *Systems*, 11(6), 288. <https://doi.org/10.3390/systems11060288>
- Alrasheedi, A. F., Rani, P., Mishra, A. R., Alshamrani, A. M. & Cavallaro, F. (2024). Fermatean fuzzy distance and Sugeno–Weber operators-based SPC-MARCOS approach for sustainable supplier evaluation in the healthcare supply chain. *Scientific Reports*, 14(1), 27373. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78284-8>
- Anand, M. D., Janardhanan, K. A., & Kinslin, D. (2014). Selection of industrial robotic systems using fuzzy techniques. *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 50-55. <https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2014.6992928>
- Anzolin, G., Andreoni, A., & Zanfei, A. (2020). Robot adoption and FDI driven transformation in the automotive industry. *International journal of automotive technology and management*, 20(2), 215-237. <https://doi.org/10.1504/IJATM.2020.108586>
- Armbruster, H., Kirner, E., & Kinkel, S. (2006). Neue Kundengruppen für Industrieroboter: Wo liegen unausgeschöpfte Anwendungspotenziale für Roboter im deutschen Verarbeitenden Gewerbe? *Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung*, (38). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). [doi:10.24406/publica-fhg-292923](https://doi.org/10.24406/publica-fhg-292923)
- Ateeq, M., Liu, Q., Xin, X., Li, T., Ahmed, R., Rahman, Z. U., & Irfan, M. (2025). Scenario-Based Spatial Assessment of solar and wind energy potential in Pakistan using FUCOM–OWA Integration. *Energies*, 18(24), 6478. <https://doi.org/10.3390/en18246478>
- Baki, R. (2022). Evaluation of Barriers to Implementation of Environmental Education with Fuzzy FUCOM Technique. *International Journal of Social Sciences Perspectives*, 10(1), 17-25. <https://doi.org/10.33094/ijssp.v10i1.537>
- Bechchar, A., Soulhi, A., & Akourri, O. (2025). *Industry 4.0: Analyzing Return on Investment and Managing Technological Obsolescence*. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, 7(2). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.39972>

- Bilgin, T. T., Kunduraci, M. S., Metin, A., Payar, M., & Nayir, E. (2024). Application of Artificial Intelligence Techniques for Defect Prevention and Quality Control in Arc Welding Processes: A Comprehensive Review. *Middle East Journal of Science*, 10(2), 179-206. <https://doi.org/10.51477/mejs.1497277>
- Bucko, M., Schindlerova, V., & Sajdlerova, I. (2020). Application of Lean Manufacturing Methods to Streamline the Welding Line. *Manufacturing Technology*, 20(2), 1213-2489. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.032>
- Božanić, D., Milić, A., Tešić, D., Salabun, W., & Pamučar, D. (2021). D NUMBERS – FUCOM – FUZZY RAFSI Model For Selecting The Group Of Construction Machines For Enabling Mobility. *Facta Universitatis Series Mechanical Engineering*, 19(3), 447. <https://doi.org/10.22190/fume210318047b>
- Ceve, L. S. (2024). Análise de custo-benefício da implementação de robôs colaborativos (cobots) na indústria. *Revista DELOS*, 17(62), 1-16. <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n62-054>
- Chodha, V., Dubey, R., Kumar, R., Singh, S., & Kaur, S. (2022). Selection of industrial arc welding robot with TOPSIS and Entropy MCDM techniques. *Materials Today: Proceedings*, 50, 709-715. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.487>
- Choi, S., Eakins, W. J., & Fuhlbrigge, T. A. (2010). Trends and opportunities for robotic automation of trim & final assembly in the automotive industry. In *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1–6). [10.1109/COASE.2010.5584524](https://doi.org/10.1109/COASE.2010.5584524)
- Çakır, E & Can, M. (2019). Best-Worst Yöntemine Dayalı ARAS Yöntemi ile Dış Kaynak Kullanım Tercihinin Belirlenmesi: Turizm Sektöründe Bir Uygulama. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23 (3) , 1273-1300.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Das, P. (2023). Implementing advanced robotics to optimize manufacturing cycle times in automotive production lines. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, 4(2). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i01.25664>
- Demir, G., Chatterjee, P., & Pamucar, D. (2024). Sensitivity analysis in multi-criteria decision making: A state-of-the-art research perspective using bibliometric analysis. *Expert Systems with Applications*, 237, 121660. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121660>
- Durak, İ. (2024). Çok Kriterli Karar Verme: Temel Yöntemler, Süreçler ve Hibrit Yaklaşımı. *Bölüm 1*, 1-13. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub468.c1968>
- Durmić, E., Stević, Ž., Chatterjee, P., Vasiljević, M., & Tomašević, M. (2020). Sustainable supplier selection using combined FUCOM – Rough SAW model. *Reports in Mechanical Engineering*, 1(1), 34-43. <https://doi.org/10.31181/rme200101034c>
- Feizi, F., Karbalaeei-Ramezanali, A. A., & Farhadi, S. (2021). FUCOM-MOORA and FUCOM-MOOSRA: new MCDM-based knowledge-driven procedures for

- mineral potential mapping in greenfields. *SN Applied Sciences*, 3, 316. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04342-9>
- Ferreras-Higuero, E., Leal-Muñoz, E., De Jalón, J. G., Chacón, E., & Vizán, A. (2020). Robot-process precision modelling for the improvement of productivity in flexible manufacturing cells. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101966>
- Fishburn, P. C. (1967). Methods of estimating additive utilities. *Management Science*, 13(7), 435–453. <https://doi.org/10.1287/mnsc.13.7.435>
- Fuchs, D., Kuys, B., Eisenbart, B., & Gericke, K. (2025). *A systematic literature review on emerging technology risks in Industry 4.0/5.0: identification, clustering and developing mitigation strategies*. Proceedings of the Design Society, 5 (ICED25). <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10044>
- Gamal, A., & Mohamed, M. (2023). A hybrid MCDM approach for industrial robots selection for the automotive industry. *Neutrosophic Systems with Applications*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8197766>
- Gravel, D., & Maslar, F. (2008, Haziran). Toward robotizing powertrain assembly. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation* (s. 541-546). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2008.4592981>
- Gümbel, P., & Dröder, K. (2024). Precision optimized process design for highly repeatable handling with articulated industrial robots. *CIRP Annals*, 73(1), 25–28. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.03.008>
- Hamizaton, M. F., Haikal, S. A., & Nik Mohamed, N. M. Z. (2023). Ergonomic Embedded in Designing Welding Assembly Tool for Automotive Manufacturing Process. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology (JMMST)*, 7(2), 23-30. <https://doi.org/10.15282/jmmst.v7i2.9923>
- Hao, E. & Ma, J. (2024). Enhanced Managerial Decision Optimization in Financial Accounting Using the Picture Fuzzy MARCOS-Based MCGDM Approach. *IEEE Access* <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3507947>
- Höse, K., Amaral, A., Götze, U., & Peças, P. (2023, Haziran). *Manufacturing Flexibility through Industry 4.0 Technological Concepts—Impact and Assessment*. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 24(2), 271-289. <https://doi.org/10.1007/s40171-023-00339-y>
- Huskanović, E., Stević, Ž., & Simić, S. (2023). Objective-Subjective CRITIC-MARCOS Model for Selection Forklift in Internal Transport Technology Processes. *Mechatronics and Intelligent Transportation Systems*, 2(1), 20-31. <https://doi.org/10.56578/mits020103>
- Hwang, C., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making. *Lecture notes in economics and mathematical systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Imran, R., & Ullah, K. (2025). Circular Intuitionistic Fuzzy EDAS Approach: A New Paradigm for Decision-Making in the Automotive Industry Sector. *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, 3(1), 76-92. <https://doi.org/10.31181/sems312025371>

- Ivanov, V. (2015). A review of fuzzy methods in automotive engineering applications. *European Transport Research Review*, 7(29), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0179-z>
- Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2015). Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(4), 637-666. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>
- Kanth, N. R., Srinath, A., & Kumar, J. S. (2018). Selection of Industrial Robots for Automation Applications in Multiple Attribute Decision Making Environment using the Analytical Network Process. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.12), 392-402. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.12.16114>
- Karsak, E. E. (1998). A two-phase robot selection procedure. *Production Planning & Control*, 9(7), 675-684. <https://doi.org/10.1080/095372898233678>
- Karsak, E. E. (1999). DEA-based robot selection procedure incorporating fuzzy criteria values. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 1, pp. I-1073). <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1999.814023>
- Ketipi, M. K., Koulouriotis, D. E., & Karakasis, E. G. (2014). Robot evaluation and selection Part B: a comparative analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8), 1395-1417. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5526-4>
- Kochan, A. (2005). BMW uses even more robots for both flexibility and quality. *Industrial Robot: An International Journal*, 32(4), 318-320. <https://doi.org/10.1108/01439910510600173>
- Kostov, B., & Hristov, V. (2023, June). Optimizing cycle time of Industrial robot for loading molding machine: A comprehensive analysis and optimization approach. In *2023 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 01-05). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HORA58378.2023.10156771>
- Koulouriotis, D. E., & Ketipi, M. K. (2014). Robot evaluation and selection Part A: an integrated review and annotated taxonomy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8), 1371-1394. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5525-5>
- Phanindra Kshatra, D., Ratna Prasad, P., Kalamulla, M. D., & Sai Krishna, P. (2019). Analyze the production system of an body-in-white system through modelling and perform bottleneck, optimization using simulation software. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8, 685-690. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1137.0782S419>
- Landscheidt, S., & Kans, M. (2016). Method for assessing the total cost of ownership of industrial robots. *Procedia Cirp*, 57, 746-751. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.129>
- Laube, M., Sopidis, G., Anzengruber-Tanase, B., Ferscha, A., & Haslgrübler, M. (2023). Analyzing Arc Welding Techniques improves Skill Level Assessment in Industrial Manufacturing Processes. *PETRA '23 Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3594806.3594822>

- Lucatello, C., & Sornkarn, C. (2018). Traceability of Human Error Production Defects in Automotive Manufacturing: A Case Study on Quality Assurance Process Improvement for Error Logging. *Chalmers University of Technology*. <http://hdl.handle.net/2077/62448>
- Machaca, Y. X. C., & Rojas, A. J. B. (2026). Development of a Welding Defect Detection System in Metalworking Parts Using Digital Image Processing with Deep Learning. *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 12(7), 137-147. <https://doi.org/10.1007/s10845-026-02863-x>
- Medina, R. M., & Crispim, S. F. (2010). Fatores determinantes no processo de decisão de investimentos em robotização na indústria brasileira de autopeças. *Gestão & Produção*, 17(3), 567-578. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2010000300010>
- Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019). The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*, 87, 205-225. <https://www.doi.org/10.1016/j.omega.2019.01.009>
- Murali, N., Periyasamy, C., Prasanth, V., & Ramachandran, M. (2025). Industrial robot selection: Key considerations and best practices. *REST Journal on Data Analytics and Artificial Intelligence*, 4(2), 80–93. <https://doi.org/10.46632/jdaai/4/2/9>
- Nhieu, N. L., Nguyen, H. K., & Thinh, N. T. (2025). Industrial Palletizing Robots: A Distance-Based Objective Weighting Benchmarking. *Mathematics*, 13(20), 3313. <https://doi.org/10.3390/math13203313>
- Ocelíková, E., Zolotová, I., & Landryová, L. (2005). Multi-Criteria Decision Making Methods. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*, LI(1), 1-7. <http://hdl.handle.net/10084/56005>
- Olugbemi, G. I. T., Isi, L. R., Ogu, E., & Owulade, O. A. (2022). Inspection-Driven Quality Control Strategies for High-Tolerance Fabrication and Welding in Industrial Systems. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 3(1), 973-977. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2022.3.1.973-977>
- Ong, M. C., Leong, Y. T., Wan, Y. K., & Chew, I. M. L. (2021). Multi-objective Optimization of Integrated Water System by FUCOM-VIKOR Approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5, 43-62. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00146-3>
- Opricovic, S., & Tzeng, G. (2003). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00020-1)
- Pamučar, D., Stević, Ž., & Sremac, S. (2018). A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 10(9), 393. <https://doi.org/10.3390/sym10090393>
- Pamučar, D., Žižović, M., Biswas, S., & Božanić, D. (2021). A New Logarithm Methodology Of Additive Weights (Lmaw) For Multi-Criteria Decision-Making: Application In Logistics. *Facta Universitatis Series Mechanical Engineering*, 19(3), 361. <https://doi.org/10.22190/fume210214031p>

- Papakostas, N., Michalos, G., Makris, S., Zouzias, D., & Chryssolouris, G. (2011). Industrial applications with cooperating robots for the flexible assembly. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(7), 650–660. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.570790>
- Parameshwaran, R., Kumar, S. P., & Saravanakumar, K. (2015). An integrated fuzzy MCDM based approach for robot selection considering objective and subjective criteria. *Applied Soft Computing*, 26, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.09.025>
- Paulraj, C., & Raj, V. J. (2021). An Intelligent Model for Defect Prediction in Spot Welding. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(3), 3991-4002. <https://turcomat.org/index.php/turkbilmat/article/view/1689>
- Peker, B. N., & Görener, A. (2022). Tesis yeri seçiminde kriterlerin önem ağırlıklarının bulanık FUCOM yöntemiyle belirlenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(45), 1512-1536. <https://doi.org/10.46928/iticusbe.1212318>
- Pontororing, P. P., Gilbert, S., & Andika, A. (2018). Welding products defects analysis with fault tree analysis and failure modes and effects analysis. In *Innoscape 2018 Conference Proceedings* (pp. 35–48).
- Prayoga, N. D., Zarlis, M., & Efendi, S. (2022). Weighting comparison analysis ROC and Full consistency Method (FUCOM) on MOORA in decision making. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, 6(3). <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11643>
- Raffik, R., Kirubhanithi, V., & Mageshwaran, K. (2023). Role of Digital Twin Technology in Automotive Sectors: An Overview. *2023 IEEE ICAECA*. <https://doi.org/10.1109/ICAECA56562.2023.10200510>
- Rajani, P., & JawaharBabu, A. (2016). Implementation of Analytic Hierarchy Process (AHP) as a Decision support tool for selection of robot for spot welding operation. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 5. <https://ijret.org/volumes/2016v05/i28/IJRET20160528002.pdf>
- Ranjan, R., Rajak, S., & Chatterjee, P. (2023). Material selection for sintered pulley in automobile: An integrated CRITIC-MARCOS model. *Reports in Mechanical Engineering*, 4(1), 225-240. <https://doi.org/10.31181/rme040105102023r>
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. Retrieved from https://www.numdam.org/item/?id=RO_1968__2_1_57_0
- Rozina, A., & Rawashdeh, A. (2024). Decision-making model for robot selection application using neutrosophic sets. *International Journal of Advances in Applied Computational Intelligence (IJAACI)*, 6(1), 36-49. <https://doi.org/10.54216/IJAACI.060104>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i)
- Salvador, D. C. (2023). Welding Safety and Health: Occupational Hazards and Risk Mitigation. *International Journal of Advanced Research in Science*,

Communication and Technology (IJARSCT), 3(1).
<https://doi.org/10.48175/IJARSCT-11904>

Sayem, A., Biswas, P. K., Khan, M. M. A., Romoli, L., & Mura, M. D. (2022, 7 Kasım). *Critical Barriers to Industry 4.0 Adoption in Manufacturing Organizations and Their Mitigation Strategies*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(136). <https://doi.org/10.3390/jmmp6060136>

Seyhan, N. (2023). AB’de döngüsel ekonomi üretim ve tüketim göstergelerinin değerlendirilmesi: MEREC temelli MARCOS uygulaması. *Sosyal Mucit Academic Review*, 4(3), 364-391. <https://doi.org/10.54733/smar.1338423>

Shanmugasundar, G., Kalita, K., Čep, R., & Chohan, J. S. (2023). Decision Models for Selection of Industrial Robots—A Comprehensive Comparison of Multi-Criteria Decision Making. *Processes*, 11(6), 1681. <https://doi.org/10.3390/pr11061681>

Shi, J., & Menassa, R. (2010). Flexible robotic assembly in dynamic environments. In *Proceedings of the 10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop (PerMIS '10)* (pp. 230–237). ACM. <https://doi.org/10.1145/2377576.2377626>

Silva, A., Simões, A. C., & Blanc, R. (2022). Criteria to consider in a decision model for collaborative robot (cobot) adoption: A literature review. *2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/INDIN51773.2022.9976113>

Sivaji, C., Ramachandran, M., Murali, N., Sathiyamoorthy, P., Xu, P., Gao, Y. (2025). Identification of Evaluation Criteria in Industrial Robot Selection using GRA method. *Data Analytics and Artificial Intelligence*, 5(1, 2025), 137–147. <https://doi.org/10.46632/daai/5/1/19>

Sofuoğlu, M. A. (2020). Fuzzy applications of FUCOM method in manufacturing environment. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 189-195. <https://doi.org/10.2339/politeknik.586036>

Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2019). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>

Subroto, R. N., & Sunitiyoso, Y. (2025). Decision making for welding robot selection in Suzuki manufacturing plant with analytic hierarchy process method. *Jurnal Sosial dan Teknologi (SOSTECH)*, 5(1), 18–25. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v5i2.31833>

Şahin, M. (2020). A Hybrid Multicriteria Decision Approach for Industrial Robot Selection. *European Journal of Science and Technology*, (Special Issue), 1-9. <https://doi.org/10.31590/ejosat.818275>

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3, 77-87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>

- Tamrakar, S. (2014). Application of analytical hierarchy process in industries. *Academia.edu*.https://www.academia.edu/6839634/Application_of_Analytical_HIERARACHY_Process_in_Industries
- Tavana, M., Sorooshian, S., Rezaei, H., & Mina, H. (2024). A novel fuzzy scenario-based stochastic general best-worst method. *Expert Systems With Applications*, 252, 124246. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124246>
- Teli, S. N., Majali, V. S., Bhushi, U. M., Gaikwad, L. M., & Surange, V. G. (2013). Cost of Poor Quality Analysis for Automobile Industry: A Case Study. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 94(4), 373-384. <https://doi.org/10.1007/s40032-013-0091-Z>
- Tiburtino, E. B., Sagawa, J. K., Barbosa, G. F., & Longo, F. (2023). Barriers to Industry 4.0 in manufacturing companies: Identification, categorization and analysis of challenges. *SSRN Electronic Journal*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4519716>
- Tîtu, A. M., vd. (2024). Cost Calculation and Deployment Strategies for Collaborative Robots in Production Lines: An Innovative and Sustainable Perspective in Knowledge-Based Organizations. *Sustainability*, 16(13), 5292. <https://doi.org/10.3390/su16135292>
- Toptancı, Ş. (2023). An Integrated FUCOM-ARAS Model for Ergonomic Risk Assessment. *Physical Ergonomics and Human Factors*, 103, 15-23. <https://doi.org/10.54941/ahfe1003030>
- Tran, N. T., Trinh, V. L., Nguyen, T. S., & Tran, V. H. (2025). A hybrid triangular fuzzy MCDM model for evaluating and selecting the optimal industrial robot for manufacturing plants based on fuzzy AHP and fuzzy ARAS. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(4), 24270–24276. <https://doi.org/10.48084/etasr.11061>
- Tripathi, S. (2024). Engineering the future: Robotics in the automotive industry explained. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 8(10). <https://doi.org/10.55041/IJSREM38079>
- Umm-e-Habiba, & Asghar, S. (2009). A Survey on Multi-Criteria Decision Making Approaches. *2009 International Conference on Emerging Technologies*, 321-325. <https://doi.org/10.1109/ICET.2009.5353151>
- Vahdani, B., vd. (2014). Robot selection by a multiple criteria complex proportional assessment method under an interval-valued fuzzy environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 687-697. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5849-9>
- Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56-66. <https://studylib.net/doc/8889609>
- Wang, J. J., et al. (2018). Robot evaluation and selection with entropy-based combination weighting and cloud TODIM approach. *Entropy*, 20(5), 349. <https://doi.org/10.3390/e20050349>
- Wang, W., & Ullah, K. (2023). T-spherical uncertain linguistic MARCOS method based on generalized distance and Heronian mean. *Journal information incomplete*. <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00862-y>

Wrobel, G., Ebert, R.-E., & Scheffler, R. (2023). *Production planning for automotive body shop – model and optimization (Rough planning of robotic assembly line systems)*. WT Werkstattstechnik Online, 113(4), 140–145. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40>

Younis, M., Ashraf, S., Abdullah, S., Shahid, T., & Gokul, K. C. (2025). Strategic MARCOS Model for Optimizing Renewable Energy Investments Under Pythagorean Hesitant Fuzzy Assessments. *Advances in Fuzzy Systems*, 2025. <https://doi.org/10.1155/ads/6193403>

Zhi, H., & Nai-Yong, S. (2020, November). Cost-benefit analysis on remote maintenance for industrial robot. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1676, No. 1, p. 012210). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1676/1/012210>



7. EKLER

EK-1. Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri

Tablo Ek.1 Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri

KV2			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\phi_{j/(j+1)}$
1	C9	1	1,1
2	C7	1,1	1,227272727
3	C2	1,35	1,222222222
4	C5	1,65	1,212121212
5	C3	2	1,2
6	C1	2,4	1,208333333
7	C6	2,9	1,206896552
8	C8	3,5	1,114285714
9	C4	3,9	—
KV3			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\phi_{j/(j+1)}$
1	C6	1	1,15
2	C3	1,15	1,217391
3	C2	1,4	1,25
4	C1	1,75	1,2
5	C9	2,1	1,214286
6	C5	2,55	1,176471
7	C7	3	1,166667
8	C4	3,5	1,128571
9	C8	3,95	—
KV4			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\phi_{j/(j+1)}$
1	C8	1	1,12
2	C7	1,12	1,205357
3	C4	1,35	1,259259
4	C5	1,7	1,264706
5	C9	2,15	1,232558
6	C6	2,65	1,169811
7	C1	3,1	1,145161
8	C3	3,55	1,098592
9	C2	3,9	—

EK-1. (Devam)**Tablo Ek.2** Karar Vericilerin FUCOM Önem Dereceleri ve Öncelik Değerleri

KV5			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\varphi_{j/(j+1)}$
1	C8	1	1,4
2	C5	1,4	1,357143
3	C2	1,9	1,315789
4	C3	2,5	1,24
5	C9	3,1	1,193548
6	C1	3,7	1,135135
7	C7	4,2	1,119048
8	C4	4,7	1,06383
9	C6	5	—

KV6			
Sıra	Kriter Sıralaması	$\tilde{w}(c_{jk})$	$\varphi_{j/(j+1)}$
1	C8	1	1,5
2	C3	1,5	1,333333
3	C1	2	1,25
4	C6	2,5	1,1
5	C5	2,75	1,090909
6	C2	3	1,166667
7	C4	3,5	1,071429
8	C9	3,75	1,066667
9	C7	4	—

EK-2. Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu**Tablo Ek.3 Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu**

KV-2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	8	9	7	6	4	1	2	3	5
C2	8	9	7	6	5	1	2	3	4
C3	9	7	8	6	2	4	3	1	5
C4	9	5	8	7	6	2	1	3	4
C5	2	3	1	4	5	7	6	9	8
C6	9	7	8	6	4	2	3	1	5
C7	6	8	5	9	4	7	3	1	2
C8	9	7	8	6	5	3	2	1	4
C9	2	9	1	8	3	7	6	5	4
KV-3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	6	9	8	7	5	3	2	4	1
C2	9	8	7	6	5	3	2	4	1
C3	9	8	6	7	5	4	3	1	2
C4	9	6	8	5	4	3	2	1	7
C5	2	1	3	5	6	7	8	9	4
C6	7	9	8	6	5	4	3	2	1
C7	9	6	5	8	4	3	7	2	1
C8	9	7	8	6	4	3	2	1	5
C9	7	9	6	8	5	4	3	2	1
KV-4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	4	9	8	7	6	2	1	3	5
C2	7	6	9	5	8	2	1	3	4
C3	9	8	7	6	3	2	1	4	5
C4	9	7	8	6	5	4	3	2	1
C5	2	3	1	4	5	8	9	7	6
C6	8	9	7	6	3	2	1	5	4
C7	8	9	6	7	4	2	1	3	5
C8	9	8	7	6	4	3	1	5	2
C9	4	7	3	6	2	8	9	5	1

EK-2. (Devam)**Tablo Ek.4** Karar Vericilerin MARCOS Karar Matrisleri Tablosu

KV-5	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	7	9	8	5	6	4	3	2	1
C2	9	6	8	7	5	4	3	2	1
C3	8	9	7	6	5	4	3	2	1
C4	9	7	8	6	5	4	3	2	1
C5	5	3	4	6	7	8	9	2	1
C6	7	9	6	8	4	5	3	2	1
C7	8	7	5	9	4	6	3	2	1
C8	9	8	7	6	5	4	3	2	1
C9	6	9	5	8	4	7	3	2	1

KV-6	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	7	9	8	6	5	3	4	2	1
C2	9	8	7	6	5	4	3	2	1
C3	8	9	7	6	5	4	3	2	1
C4	9	8	7	6	5	4	3	2	1
C5	4	3	5	6	7	8	9	2	1
C6	8	9	7	6	5	4	3	2	1
C7	8	9	7	6	5	4	3	2	1
C8	9	8	7	6	5	3	4	2	1
C9	6	9	7	8	5	4	3	2	1

EK-3. Duyarlılık Analizi Senaryoları

Tablo Ek.5 C2 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.632 (6.)	0.642 (5.)	0.658 (3.)	0.615 (8.)	0.601 (9.)	0.668 (2.)	0.658 (4.)	0.630 (7.)	0.695 (1.)
%20 (0.2)	0.661 (5.)	0.654 (6.)	0.676 (3.)	0.622 (8.)	0.574 (9.)	0.690 (2.)	0.674 (4.)	0.645 (7.)	0.716 (1.)
%30 (0.3)	0.691 (4.)	0.666 (6.)	0.695 (3.)	0.628 (8.)	0.546 (9.)	0.712 (2.)	0.690 (5.)	0.660 (7.)	0.737 (1.)
%40 (0.4)	0.721 (3.)	0.679 (6.)	0.713 (4.)	0.635 (8.)	0.518 (9.)	0.734 (2.)	0.707 (5.)	0.676 (7.)	0.758 (1.)
%50 (0.5)	0.752 (3.)	0.691 (7.)	0.732 (4.)	0.641 (8.)	0.489 (9.)	0.757 (2.)	0.724 (5.)	0.692 (6.)	0.780 (1.)
%60 (0.6)	0.783 (2.)	0.704 (7.)	0.751 (4.)	0.647 (8.)	0.459 (9.)	0.780 (3.)	0.741 (5.)	0.708 (6.)	0.802 (1.)
%70 (0.7)	0.814 (2.)	0.716 (7.)	0.770 (4.)	0.654 (8.)	0.429 (9.)	0.803 (3.)	0.758 (5.)	0.724 (6.)	0.824 (1.)
%80 (0.8)	0.845 (2.)	0.729 (7.)	0.789 (4.)	0.660 (8.)	0.399 (9.)	0.826 (3.)	0.775 (5.)	0.740 (6.)	0.846 (1.)
%90 (0.9)	0.877 (1.)	0.742 (7.)	0.808 (4.)	0.667 (8.)	0.368 (9.)	0.849 (3.)	0.792 (5.)	0.756 (6.)	0.868 (2.)
%100 (1.0)	0.909 (1.)	0.755 (7.)	0.827 (4.)	0.673 (8.)	0.336 (9.)	0.873 (3.)	0.809 (5.)	0.773 (6.)	0.891 (2.)

C2 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, %10–%80 ağırlık aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, ağırlığın %90 ve %100 seviyelerine yükselmesiyle birlikte A1 alternatifi ilk sıraya yükselmiş ve A9 alternatifi ikinci sıraya gerilemiştir. C2 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A1 alternatifinin sıralamada yükselmesine neden olduğunu ve alternatif sıralamaları üzerinde etkili bir kriter olduğunu göstermektedir.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.6 C3 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.633 (6.)	0.642 (5.)	0.659 (4.)	0.614 (8.)	0.600 (9.)	0.669 (2.)	0.659 (3.)	0.630 (7.)	0.698 (1.)
%20 (0.2)	0.657 (6.)	0.664 (4.)	0.672 (3.)	0.642 (8.)	0.580 (9.)	0.684 (1.)	0.659 (5.)	0.651 (7.)	0.680 (2.)
%30 (0.3)	0.680 (4.)	0.687 (2.)	0.685 (3.)	0.669 (6.)	0.560 (9.)	0.699 (1.)	0.659 (8.)	0.672 (5.)	0.663 (7.)
%40 (0.4)	0.704 (3.)	0.710 (2.)	0.699 (4.)	0.697 (5.)	0.540 (9.)	0.714 (1.)	0.659 (7.)	0.693 (6.)	0.645 (8.)
%50 (0.5)	0.728 (3.)	0.732 (1.)	0.712 (6.)	0.725 (4.)	0.519 (9.)	0.729 (2.)	0.659 (7.)	0.714 (5.)	0.627 (8.)
%60 (0.6)	0.752 (3.)	0.755 (1.)	0.725 (6.)	0.753 (2.)	0.499 (9.)	0.744 (4.)	0.658 (7.)	0.736 (5.)	0.609 (8.)
%70 (0.7)	0.776 (3.)	0.778 (2.)	0.738 (6.)	0.781 (1.)	0.478 (9.)	0.759 (4.)	0.658 (7.)	0.757 (5.)	0.591 (8.)
%80 (0.8)	0.800 (3.)	0.802 (2.)	0.752 (6.)	0.809 (1.)	0.457 (9.)	0.774 (5.)	0.658 (7.)	0.779 (4.)	0.573 (8.)
%90 (0.9)	0.824 (3.)	0.825 (2.)	0.765 (6.)	0.837 (1.)	0.436 (9.)	0.789 (5.)	0.658 (7.)	0.800 (4.)	0.555 (8.)
%100 (1.0)	0.848 (2.)	0.848 (3.)	0.779 (6.)	0.865 (1.)	0.415 (9.)	0.805 (5.)	0.658 (7.)	0.822 (4.)	0.537 (8.)

C3 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10 iken A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %20–%40 aralığında A6 alternatifinin ilk sıraya yükseldiği görülmektedir. Ağırlığın %50 ve %60 seviyelerinde A2 alternatifi, %70–%100 aralığında ise A4 alternatifi ilk sırada yer almıştır. C3 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A4 ve A2 alternatiflerinin sıralamada yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık A9 ve A6 alternatiflerinin sıralamada gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C3 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.7 C4 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.636 (6.)	0.643 (5.)	0.660 (4.)	0.617 (8.)	0.598 (9.)	0.670 (2.)	0.661 (3.)	0.631 (7.)	0.698 (1.)
%20 (0.2)	0.642 (6.)	0.646 (5.)	0.664 (4.)	0.622 (8.)	0.592 (9.)	0.674 (3.)	0.675 (2.)	0.635 (7.)	0.706 (1.)
%30 (0.3)	0.648 (6.)	0.648 (5.)	0.667 (4.)	0.628 (8.)	0.586 (9.)	0.678 (3.)	0.689 (2.)	0.639 (7.)	0.714 (1.)
%40 (0.4)	0.653 (5.)	0.650 (6.)	0.669 (4.)	0.633 (8.)	0.580 (9.)	0.681 (3.)	0.703 (2.)	0.642 (7.)	0.721 (1.)
%50 (0.5)	0.659 (5.)	0.652 (6.)	0.672 (4.)	0.638 (8.)	0.574 (9.)	0.685 (3.)	0.716 (2.)	0.646 (7.)	0.728 (1.)
%60 (0.6)	0.664 (5.)	0.654 (6.)	0.675 (4.)	0.643 (8.)	0.567 (9.)	0.688 (3.)	0.729 (2.)	0.649 (7.)	0.735 (1.)
%70 (0.7)	0.669 (5.)	0.656 (6.)	0.677 (4.)	0.647 (8.)	0.561 (9.)	0.691 (3.)	0.741 (2.)	0.652 (7.)	0.742 (1.)
%80 (0.8)	0.674 (5.)	0.657 (6.)	0.679 (4.)	0.652 (8.)	0.555 (9.)	0.694 (3.)	0.753 (1.)	0.655 (7.)	0.748 (2.)
%90 (0.9)	0.679 (5.)	0.659 (6.)	0.681 (4.)	0.656 (8.)	0.549 (9.)	0.696 (3.)	0.765 (1.)	0.657 (7.)	0.755 (2.)
%100 (1.0)	0.683 (4.)	0.660 (6.)	0.683 (5.)	0.660 (7.)	0.543 (9.)	0.699 (3.)	0.776 (1.)	0.660 (8.)	0.761 (2.)

C4 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10–%70 aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %80–%100 aralığında A7 alternatifi ilk sıraya yükselmiştir. C4 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A7 alternatifinin sıralamada yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık başlangıçta ilk sırada yer alan A9 alternatifinin ikinci sıraya gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C4 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.8 C5 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.637 (6.)	0.648 (5.)	0.657 (3.)	0.616 (8.)	0.600 (9.)	0.667 (2.)	0.656 (4.)	0.629 (7.)	0.692 (1.)
%20 (0.2)	0.632 (7.)	0.637 (5.)	0.664 (3.)	0.616 (8.)	0.598 (9.)	0.673 (2.)	0.663 (4.)	0.634 (6.)	0.702 (1.)
%30 (0.3)	0.628 (6.)	0.625 (7.)	0.671 (3.)	0.617 (8.)	0.596 (9.)	0.679 (2.)	0.670 (4.)	0.638 (5.)	0.712 (1.)
%40 (0.4)	0.623 (6.)	0.614 (8.)	0.677 (3.)	0.618 (7.)	0.594 (9.)	0.684 (2.)	0.677 (4.)	0.643 (5.)	0.722 (1.)
%50 (0.5)	0.618 (6.)	0.603 (8.)	0.683 (3.)	0.618 (7.)	0.591 (9.)	0.689 (2.)	0.683 (4.)	0.647 (5.)	0.731 (1.)
%60 (0.6)	0.614 (7.)	0.591 (8.)	0.689 (3.)	0.618 (6.)	0.589 (9.)	0.694 (2.)	0.689 (4.)	0.651 (5.)	0.740 (1.)
%70 (0.7)	0.609 (7.)	0.580 (9.)	0.695 (3.)	0.618 (6.)	0.587 (8.)	0.698 (2.)	0.695 (4.)	0.654 (5.)	0.749 (1.)
%80 (0.8)	0.604 (7.)	0.570 (9.)	0.700 (3.)	0.618 (6.)	0.584 (8.)	0.703 (2.)	0.700 (4.)	0.658 (5.)	0.757 (1.)
%90 (0.9)	0.599 (7.)	0.559 (9.)	0.706 (3.)	0.618 (6.)	0.582 (8.)	0.707 (2.)	0.706 (4.)	0.661 (5.)	0.765 (1.)
%100 (1.0)	0.595 (7.)	0.548 (9.)	0.711 (2.)	0.618 (6.)	0.579 (8.)	0.711 (3.)	0.711 (4.)	0.664 (5.)	0.772 (1.)

C5 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığının tüm seviyelerinde (%10–%100) A9 alternatifi ilk sırada yer almıştır. Ağırlık artışına rağmen alternatif sıralamasında ilk sırada herhangi bir değişim görülmemiştir. C5 kriter ağırlığındaki artışın genel sıralamayı önemli ölçüde değiştirmediğini ve A9 alternatifinin bu kriter açısından diğer alternatiflere kıyasla daha avantajlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.9 C6 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.638 (6.)	0.646 (5.)	0.662 (3.)	0.618 (8.)	0.595 (9.)	0.672 (2.)	0.660 (4.)	0.634 (7.)	0.695 (1.)
%20 (0.2)	0.616 (8.)	0.626 (5.)	0.649 (4.)	0.605 (9.)	0.623 (6.)	0.656 (2.)	0.655 (3.)	0.616 (7.)	0.705 (1.)
%30 (0.3)	0.593 (8.)	0.605 (6.)	0.636 (5.)	0.593 (9.)	0.652 (2.)	0.640 (4.)	0.650 (3.)	0.599 (7.)	0.715 (1.)
%40 (0.4)	0.571 (9.)	0.584 (6.)	0.623 (5.)	0.580 (8.)	0.681 (2.)	0.625 (4.)	0.645 (3.)	0.582 (7.)	0.725 (1.)
%50 (0.5)	0.548 (9.)	0.564 (8.)	0.610 (4.)	0.567 (6.)	0.709 (2.)	0.609 (5.)	0.640 (3.)	0.564 (7.)	0.735 (1.)
%60 (0.6)	0.526 (9.)	0.543 (8.)	0.598 (4.)	0.554 (6.)	0.738 (2.)	0.593 (5.)	0.635 (3.)	0.547 (7.)	0.745 (1.)
%70 (0.7)	0.503 (9.)	0.523 (8.)	0.585 (4.)	0.542 (6.)	0.767 (1.)	0.577 (5.)	0.630 (3.)	0.530 (7.)	0.755 (2.)
%80 (0.8)	0.480 (9.)	0.502 (8.)	0.572 (4.)	0.529 (6.)	0.795 (1.)	0.561 (5.)	0.624 (3.)	0.513 (7.)	0.765 (2.)
%90 (0.9)	0.458 (9.)	0.481 (8.)	0.559 (4.)	0.516 (6.)	0.824 (1.)	0.545 (5.)	0.619 (3.)	0.495 (7.)	0.775 (2.)
%100 (1.0)	0.435 (9.)	0.461 (8.)	0.546 (4.)	0.503 (6.)	0.853 (1.)	0.529 (5.)	0.614 (3.)	0.478 (7.)	0.785 (2.)

C6 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10–%60 aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %70–%100 aralığında A5 alternatifi ilk sıraya yükselmiştir. C6 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A5 alternatifinin sıralamada önemli ölçüde yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık başlangıçta ilk sırada yer alan A9 alternatifinin ikinci sıraya gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C6 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.10 C7 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.636 (6.)	0.644 (5.)	0.661 (3.)	0.617 (8.)	0.598 (9.)	0.671 (2.)	0.660 (4.)	0.632 (7.)	0.697 (1.)
%20 (0.2)	0.609 (7.)	0.614 (6.)	0.633 (4.)	0.590 (9.)	0.630 (5.)	0.642 (2.)	0.638 (3.)	0.604 (8.)	0.685 (1.)
%30 (0.3)	0.581 (7.)	0.584 (6.)	0.605 (5.)	0.563 (9.)	0.662 (2.)	0.613 (4.)	0.616 (3.)	0.574 (8.)	0.673 (1.)
%40 (0.4)	0.553 (6.)	0.553 (7.)	0.576 (5.)	0.535 (9.)	0.694 (1.)	0.583 (4.)	0.593 (3.)	0.545 (8.)	0.661 (2.)
%50 (0.5)	0.525 (6.)	0.522 (7.)	0.547 (5.)	0.506 (9.)	0.727 (1.)	0.553 (4.)	0.570 (3.)	0.515 (8.)	0.649 (2.)
%60 (0.6)	0.496 (6.)	0.490 (7.)	0.517 (5.)	0.478 (9.)	0.761 (1.)	0.522 (4.)	0.546 (3.)	0.485 (8.)	0.636 (2.)
%70 (0.7)	0.467 (6.)	0.458 (7.)	0.487 (5.)	0.449 (9.)	0.795 (1.)	0.491 (4.)	0.522 (3.)	0.454 (8.)	0.623 (2.)
%80 (0.8)	0.437 (6.)	0.426 (7.)	0.457 (5.)	0.419 (9.)	0.829 (1.)	0.459 (4.)	0.498 (3.)	0.423 (8.)	0.610 (2.)
%90 (0.9)	0.407 (6.)	0.392 (7.)	0.426 (5.)	0.389 (9.)	0.863 (1.)	0.427 (4.)	0.474 (3.)	0.391 (8.)	0.597 (2.)
%100 (1.0)	0.377 (6.)	0.359 (7.)	0.395 (4.)	0.359 (8.)	0.897 (1.)	0.395 (5.)	0.449 (3.)	0.359 (9.)	0.583 (2.)

C7 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10–%30 aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %40–%100 aralığında A5 alternatifi ilk sıraya yükselmiştir. C7 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A5 alternatifinin sıralamada belirgin şekilde yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık başlangıçta ilk sırada yer alan A9 alternatifinin ikinci sıraya gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C7 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.11 C8 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.637 (6.)	0.645 (5.)	0.665 (3.)	0.620 (8.)	0.593 (9.)	0.674 (2.)	0.664 (4.)	0.635 (7.)	0.700 (1.)
%20 (0.2)	0.626 (6.)	0.633 (5.)	0.640 (3.)	0.599 (9.)	0.623 (7.)	0.654 (2.)	0.638 (4.)	0.614 (8.)	0.684 (1.)
%30 (0.3)	0.614 (6.)	0.621 (4.)	0.615 (5.)	0.577 (9.)	0.652 (2.)	0.634 (3.)	0.611 (7.)	0.592 (8.)	0.669 (1.)
%40 (0.4)	0.603 (5.)	0.609 (4.)	0.590 (6.)	0.555 (9.)	0.682 (1.)	0.613 (3.)	0.584 (7.)	0.571 (8.)	0.654 (2.)
%50 (0.5)	0.592 (5.)	0.596 (3.)	0.565 (6.)	0.533 (9.)	0.711 (1.)	0.593 (4.)	0.558 (7.)	0.549 (8.)	0.638 (2.)
%60 (0.6)	0.580 (4.)	0.584 (3.)	0.540 (6.)	0.511 (9.)	0.741 (1.)	0.573 (5.)	0.531 (7.)	0.527 (8.)	0.623 (2.)
%70 (0.7)	0.569 (4.)	0.572 (3.)	0.515 (6.)	0.489 (9.)	0.771 (1.)	0.552 (5.)	0.504 (8.)	0.505 (7.)	0.607 (2.)
%80 (0.8)	0.557 (4.)	0.559 (3.)	0.490 (6.)	0.467 (9.)	0.801 (1.)	0.532 (5.)	0.477 (8.)	0.483 (7.)	0.591 (2.)
%90 (0.9)	0.546 (4.)	0.547 (3.)	0.465 (6.)	0.444 (9.)	0.831 (1.)	0.512 (5.)	0.449 (8.)	0.461 (7.)	0.576 (2.)
%100 (1.0)	0.534 (3.)	0.534 (4.)	0.439 (6.)	0.422 (8.)	0.861 (1.)	0.491 (5.)	0.422 (9.)	0.439 (7.)	0.560 (2.)

C8 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10–%30 aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %40–%100 aralığında A5 alternatifi ilk sıraya yükselmiştir. C8 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A5 alternatifinin sıralamada belirgin şekilde yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık başlangıçta ilk sırada yer alan A9 alternatifinin ikinci sıraya gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C8 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ek-3. (Devam)**Tablo Ek.12 C9 Kriteri İçin Duyarlılık Analizi Senaryoları**

Senaryo (Ağırlık)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
%10 (0.1)	0.634 (6.)	0.640 (5.)	0.659 (3.)	0.616 (8.)	0.601 (9.)	0.669 (2.)	0.659 (4.)	0.631 (7.)	0.695 (1.)
%20 (0.2)	0.642 (6.)	0.663 (5.)	0.664 (3.)	0.613 (8.)	0.585 (9.)	0.677 (2.)	0.664 (4.)	0.629 (7.)	0.706 (1.)
%30 (0.3)	0.649 (6.)	0.685 (3.)	0.669 (4.)	0.610 (8.)	0.569 (9.)	0.686 (2.)	0.669 (5.)	0.627 (7.)	0.716 (1.)
%40 (0.4)	0.657 (6.)	0.707 (2.)	0.674 (4.)	0.606 (8.)	0.554 (9.)	0.694 (3.)	0.674 (5.)	0.624 (7.)	0.726 (1.)
%50 (0.5)	0.665 (6.)	0.728 (2.)	0.679 (4.)	0.603 (8.)	0.538 (9.)	0.703 (3.)	0.679 (5.)	0.622 (7.)	0.736 (1.)
%60 (0.6)	0.672 (6.)	0.750 (1.)	0.684 (4.)	0.599 (8.)	0.522 (9.)	0.711 (3.)	0.683 (5.)	0.620 (7.)	0.746 (2.)
%70 (0.7)	0.680 (6.)	0.772 (1.)	0.689 (4.)	0.596 (8.)	0.507 (9.)	0.720 (3.)	0.688 (5.)	0.618 (7.)	0.757 (2.)
%80 (0.8)	0.688 (6.)	0.794 (1.)	0.693 (4.)	0.593 (8.)	0.491 (9.)	0.728 (3.)	0.693 (5.)	0.615 (7.)	0.767 (2.)
%90 (0.9)	0.695 (6.)	0.815 (1.)	0.698 (4.)	0.589 (8.)	0.476 (9.)	0.736 (3.)	0.698 (5.)	0.613 (7.)	0.777 (2.)
%100 (1.0)	0.703 (4.)	0.837 (1.)	0.703 (5.)	0.586 (8.)	0.460 (9.)	0.745 (3.)	0.703 (6.)	0.611 (7.)	0.787 (2.)

C9 kriterine ilişkin duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, kriter ağırlığı %10–%50 aralığında A9 alternatifi ilk sırada yer alırken, %60–%100 aralığında A2 alternatifi ilk sıraya yükselmiştir. C9 kriter ağırlığındaki artışın özellikle A2 alternatifinin sıralamada yükselmesine neden olduğunu, buna karşılık başlangıçta ilk sırada yer alan A9 alternatifinin ikinci sıraya gerilediğini göstermektedir. Bu durum, C9 kriterinin alternatif sıralamaları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

EK-4. Etik Kurul Raporu

Evrak Tarih ve Sayısı: 26.02.2026-301974

T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ

Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurul Kararı

TOPLANTI SAYISI	KARAR SAYISI	KARAR TARİHİ
01	01	13.02.2026

Karar Numarası: 2026/01

Dr. Öğr. Üyesi Melih CAN'ın Danışmanlığını yaptığı Diğer Araştırmacılar Üniversitemiz Yüksek Lisans Öğrencisi İhsan TURHAN'ın Araştırmanın Yürütücüsü olduğu 03.02.2026 tarihli ve 11252 E. No'lu **“Otomotiv Üretim Süreçlerinde Çok Kriterli Karar Verme Modelleri ile Optimal Robot Yatırım Kararlarının Belirlenmesi”** başlıklı yüksek lisans tez çalışmasına ait etik kurul başvurusunun görüşülmesi istemi.

Dr. Öğr. Üyesi Melih CAN'ın Danışmanlığını yaptığı Diğer Araştırmacılar Üniversitemiz Yüksek Lisans Öğrencisi İhsan TURHAN'ın Araştırmanın Yürütücüsü olduğu 03.02.2026 tarihli ve 11252 E. No'lu **“Otomotiv Üretim Süreçlerinde Çok Kriterli Karar Verme Modelleri ile Optimal Robot Yatırım Kararlarının Belirlenmesi”** başlıklı yüksek lisans tez çalışmasına ait etik kurul başvurusunun fikri, hukuki ve telif hakları bakımından metot ve ölçөгüne ilişkin sorumluluğun başvuruçuya ait olmak üzere araştırma süresince uygulanmasının **etik olarak uygun olduğuna** oybirliği ile karar verildi. **13.02.2026**

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : İhsan TURHAN

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2026, Dim Yapı Denetim A.Ş., Elektrik Kontrol Mühendisi
- 2024, Mert Mühendislik, Elektrik Proje Yöneticisi
- 2022, KNET Mekatronik Savunma Sistemleri, Devreye Alma ve Elektrik Elektronik Mühendisi
- 2020, Giza Enerji, GES EPC Mühendisi
- 2020, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- 2014, Hasan Çolak Anadolu Lisesi

Yabancı Dil Bilgisi:

- İngilizce