T.C.
ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİNDE YER ALAN ÜST-ORTA GELİRLİ ÜLKELERİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah AĞIRBAŞ

ULUSLARARASI TİCARET VE FİNANS ANABİLİM DALI

ANKARA, 2025

T.C.
ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİNDE YER ALAN ÜST-ORTA GELİRLİ ÜLKELERİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah AĞIRBAŞ

ULUSLARARASI TİCARET VE FİNANS ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Serap Pelin TÜRKOĞLU

ANKARA, 2025

ONAY SAYFASI

Emrah AĞIRBAŞ tarafından hazırlanan "Küresel İnovasyon Endeksinde Yer Alan Üst-Orta Gelirli Ülkelerin Endüstri 4.0 Düzeylerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Değerlendirilmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Uluslararası Ticaret ve Finans Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesi	**Kabul / Red**	**Kurumu**	**İmza**
Doç. Dr. Serap Pelin TÜRKOĞLU	KABUL	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	
Doç. Dr. Burhan GÜNAY	KABUL	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	
Doç. Dr. Arda ÖZKAN	KABUL	Ankara Üniversitesi	

Tez Savunma Tarihi: 19.06.2025

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Uluslararası Ticaret ve Finans Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olması için şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. MUHAMMET ENES KALA
Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda patent ve telif haklarını ihlal edici etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tezde kullanılmış olan tüm bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim. (20/06/2025)

İmza
Emrah AĞIRBAŞ

İTHAF

Aileme…

TEŞEKKÜRLER

Bu teze başlarken beni her anlamda özgür bırakan, bilimsel düşünceyi yaşam biçimi olarak algılamamı sağlayan lisansüstü eğitimime başlangıcımdan itibaren her zaman beni destekleyen ve takdir eden bir öğrencisi olarak değil meslektaşı olarak gören bana hep güvenen sayın hocam Doç. Dr. Serap Pelin TÜRKOĞLU'na sonsuz teşekkürler.

Sevgili eşim Öznur AĞIRBAŞ'a yaşamımın ve tezimin her adımında beni motive etmesi, desteği ve en önemlisi beni hiç yalnız bırakmadığı için sonsuz teşekkürler. Çocuklarım Zeynep Saliha, Reşat Said ve Ayça Feyza'ya daima yaşamıma huzur kattıkları için sonsuz teşekkürler.

Yaşamım boyunca beni her zaman destekleyen ve bana inanan sevgili annem Melek AĞIRBAŞ ve hayallerimin peşinde koşarken bana cesaret veren sevgili babam Reşat AĞIRBAŞ'a minnetlerimi sunuyorum. Hem bir dost hem de kardeş olan ablalarım Göksel ÖZEL ve Yasemin İZGİ'ye, erkek kardeşim Oktay AĞIRBAŞ'a sosyal ve akademik yaşamımda bana hep destek oldukları için sonsuz teşekkürler.

Hayatım boyunca hep örnek aldığım, her zaman onun gibi olmak istediğim, yaşamımın geri kalanında da izinden hiç çıkmayacağım en değerli insan Hz. Muhammed (S.A.V.) 'i en derin duygularımla selamlıyorum.

ÖZET

Küresel İnovasyon Endeksinde Yer Alan Üst-Orta Gelirli Ülkelerin Endüstri 4.0 Düzeylerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Değerlendirilmesi

Bu çalışma, 2024 yılı Küresel İnovasyon Endeksi'nde gelişim düzeyine uygun performans gösteren üst-orta gelirli ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini değerlendirmeyi ve sıralamayı amaçlamaktadır. Çalışmada, Endüstri 4.0'ın temel unsurları esas alınarak belirlenen dokuz kriter çerçevesinde ülkelerin Endüstri 4.0 seviyeleri, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, WIPO'nun 2024 Küresel İnovasyon Endeksi'nde 'Gelişim Düzeyiyle Uyumlu Performans' grubunda yer alan üst-orta gelirli ülkelerin Endüstri 4.0 seviyeleri belirlenmiş ve bu ülkeler sıralanmıştır.

Çalışmanın metodolojik yaklaşımında, kriter ağırlıklarının belirlenmesi için CRITIC ve Entropi yöntemleri kullanılmış, ülkelerin sıralaması ise RAWEC yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlılığını test etmek amacıyla, EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS ve SAW yöntemleri ile ek analizler yapılmış ve bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki korelasyon seviyeleri ölçülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre, Malezya, Türkiye ve Bulgaristan isimli ülkeler, Endüstri 4.0 düzeyi açısından en yüksek performans gösteren ülkeler olarak öne çıkmıştır. Bu ülkeler, dijital altyapı, AR-GE yatırımları ve inovasyon kapasiteleri ile diğer ülkelere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilemiştir. Öte yandan, El Salvador, Bosna Hersek, Kuzey Makedonya isimli ülkeler Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde daha düşük performans göstermiştir. Bu ülkelerin, dijital dönüşüm ve inovasyon alanlarında politika reformlarına ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın bulguları, ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini artırmak için dijital altyapı yatırımlarının, AR-GE teşviklerinin ve eğitim programlarının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, farklı ÇKKV yöntemleri ile elde edilen sonuçların yüksek korelasyon göstermesi, analizlerin tutarlı ve güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, üst-orta gelirli ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini değerlendirmek için kapsamlı bir metodolojik çerçeve sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici olmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Küresel İnovasyon Endeksi, Çok Kriterli Karar Verme, Entropi, CRITIC, RAWEC, EDAS, MAUT, ARAS, CRADIS, SAW.

ABSTRACT

Evaluation Of Industry 4.0 Levels Of Upper-Middle Income Countries In The Global Innovation Index With Multi-Criteria Decision Making Methods

This study aims to evaluate and rank the Industry 4.0 levels of upper-middle-income countries that demonstrate performance in line with their development level in the 2024 Global Innovation Index. In the study, the Industry 4.0 levels of countries were analyzed using multi-criteria decision making (MCDM) methods within the framework of nine criteria determined based on the basic elements of Industry 4.0. As a result of the analysis, the Industry 4.0 levels of upper-middle-income countries included in the 'Performance in Line with Development Level' group in WIPO's 2024 Global Innovation Index were determined and these countries were ranked.

In the methodological approach of the study, CRITIC and ENTROPY methods were used to determine the criteria weights, and the ranking of the countries was carried out with the RAWEC method. In order to test the consistency of the results obtained, additional analyzes were made with EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS and SAW methods, and the correlation levels between the results obtained from these methods were measured.

According to the analysis results, Malaysia, Turkey and Bulgaria stood out as the countries with the highest performance in terms of Industry 4.0 level. These countries have demonstrated a significant superiority over other countries with their digital infrastructure, R&D investments and innovation capacities. On the other hand, El Salvador, Bosnia and Herzegovina and North Macedonia have shown lower performance in the transition to Industry 4.0. It has been determined that these countries need policy reforms in the areas of digital transformation and innovation.

The findings of the study emphasize the importance of digital infrastructure investments, R&D incentives and training programs to increase the Industry 4.0 levels of countries. In addition, the high correlation of the results obtained with different MCDM methods reveals that the analyses are consistent and reliable. This study provides a comprehensive methodological framework to evaluate the Industry 4.0 levels of upper-middle income countries and aims to guide future research.

Keywords: Industry 4.0, Global Innovation Index, Multi-Criteria Decision Making, ENTROPY, CRITIC, RAWEC, EDAS, MAUT, ARAS, CRADIS, SAW.

İÇİNDEKİLER

ONAY SAYFASI i
BEYAN ii
İTHAF iii
TEŞEKKÜRLER iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
TABLOLAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. ENDÜSTRİ TARİHİ VE GELİŞİMİ 3
2.1. Endüstri 1.0: Mekanizasyon Çağı (1760-1840) 3
2.2. Endüstri 2.0: Elektrik ve Kitlesel Üretim (1870-1970) 4
2.3. Endüstri 3.0: Dijital Devrim (1970-2010) 5
2.4. Endüstri 4.0: Siber-Fiziksel Sistemler Çağı (2011-) 6
3. ENDÜSTRİ 4.0 BİLEŞENLERİ 8
3.1. Akıllı Robotlar 8
3.2. Büyük Veri ve Analitik 10
3.3. Zenginleştirilmiş Gerçeklik (Arttırılmış Gerçeklik) 11
3.4. Eklemeli Üretim (Katmanlı Üretim) 13
3.5. Bulut Teknolojisi (Bulut İletişim) 14
3.6. Siber Güvenlik 16
3.7. Simülasyon 18
3.8. Yazılım Entegrasyonları (Yatay ve Dikey Entegrasyon) 19

3.8.1. Yatay Entegrasyon 20
3.8.2. Dikey Entegrasyon 20
3.9. Nesnelerin İnterneti 21
4. KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİ 23
4.1. Küresel İnovasyon Endeksi Yapısı ve Bileşenleri 23
4.1.1. İnovasyon Girdi Alt Endeksi 23
4.1.2. İnovasyon Çıktı Alt Endeksi 25
4.2. KİE'nin Metodolojisi ve Ağırlıklandırma 25
4.3. KİE'nin Küresel ve Bölgesel Analizleri 26
4.4. KİE'nin Politika ve Stratejiye Katkıları 26
5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ 27
5.1. Çok Kriterli Karar Verme 27
5.2. Çalışmada Kullanılan Yöntemler 27
5.2.1. CRITIC Metodu 27
5.2.2. Entropi Metodu 29
5.2.3. RAWEC Metodu 31
5.2.4. EDAS Metodu 33
5.2.5. MAUT Metodu 35
5.2.6. CRADIS Metodu 37
5.2.7. ARAS Metodu 40
5.2.8. SAW Metodu 42
5.3. Literatür İncelemesi 44
6. KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİNDE YER ALAN ÜST-ORTA GELİRLİ ÜLKELERİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ 50
6.1. Amaç ve Yöntem 50
6.2. Alternatiflerin Seçimi 50
6.3. Kullanılan Kriterler 52

6.3.1. Bilgi İletişim Teknolojileri (ICT) Gelişme Endeksi 56
6.3.2. Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi 56
6.3.3. Küresel İnovasyon Endeksi 57
6.3.4. Küreselleşme Endeksi 58
6.3.5. Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi 59
6.3.6. Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi 60
6.3.7. Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi 61
6.3.8. Küresel Siber Güvenlik Endeksi 62
6.3.9. Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla 63
6.4. Bulgular 65
6.4.1. CRITIC Yöntemi ile Ağırlıklandırma 66
6.4.2. CRITIC Ağırlıklı RAWEC Yöntemi ile Sıralama 71
6.4.3. CRITIC Ağırlıklı EDAS Yöntemi ile Sıralama 76
6.4.4. CRITIC Ağırlıklı MAUT Yöntemi ile Sıralama 82
6.4.5. CRITIC Ağırlıklı CRADIS Yöntemi ile Sıralama 85
6.4.6. CRITIC Ağırlıklı ARAS Yöntemi ile Sıralama 92
6.4.7. CRITIC Ağırlıklı SAW Yöntemi ile Sıralama 96
6.4.8. Entropi Yöntemi ile Ağırlıklandırma 99
6.4.9. Entropi Ağırlıklı RAWEC Yöntemi ile Sıralama 104
6.4.10. Entropi Ağırlıklı EDAS Yöntemi ile Sıralama 110
6.4.11. Entropi Ağırlıklı MAUT Yöntemi ile Sıralama 115
6.4.12. Entropi Ağırlıklı CRADIS Yöntemi ile Sıralama 118
6.4.13. Entropi Ağırlıklı ARAS Yöntemi ile Sıralama 125
6.4.14. Entropi Ağırlıklı SAW Yöntemi ile Sıralama 129
6.4.15. Spearman Korelasyon Analizi 132
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 136
8. KAYNAKLAR 154

ÖZGEÇMİŞ 167

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
BİTGE	: Bilgi ve İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi
BİT	: Bilgi ve İletişim Teknolojileri
INSEAD	: Avrupa İşletme Yönetimi Enstitüsü
WIPO	: Dünya Fikri Mülkiyet Örgütü
IoT	: Nesnelerin İnterneti
AI	: Yapay Zekâ
KEİ	: Küresel İnovasyon Endeksi
AR-GE	: Araştırma ve Geliştirme
ENIAC	: Elektronik Sayısal Entegratör ve Bilgisayar
CAD/CAM	: Bilgisayar Destekli Tasarım / Bilgisayar Destekli Üretim
ERP	: Kurumsal Kaynak Planlama
AGV	: Otomatik Kılavuzlu Araçlar
AMR	: Otonom Mobil Robot
AR	: Arttırılmış Gerçeklik
FDM	: Erimiş Biriktirme Modellemesi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
WAAM	: Tel Ark Eklemeli İmalat
CPS	: Siber-Fiziksel Sistem
VR	: Sanal Gerçeklik
MES	: Üretim Yürütme Sistemi
RFID	: Radyo Frekansı Tanımlama
DTÖ	: Dünya Ticaret Örgütü
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
SAGP	: Satın Alma Gücü Paritesi
PLC	: Programlanabilir Mantık Denetleyicisi
NRI	: Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1 - Farklı Gelir Düzeylerinde İnovasyon Performansı, (WIPO, 2024) 52
Tablo 2 - Endüstri 4.0 Bileşenleri ile Kriterler Arası İlişki ve Kaynaklandırılmış Uyum Matrisi Tablosu..... 55
Tablo 3 - Kişi başına GSYİH, Satın Alma Gücü Paritesi temel bileşenleri 64
Tablo 4 - GSYİH- Endüstri 4.0 Adaptasyon İlişkisi..... 64
Tablo 5 - Kriterlere Ait Kod ve Fayda - Maliyet Tablosu 65
Tablo 6 - Alternatif KOD Tablosu..... 66
Tablo 7 - CRITIC Yöntemi / Karar Matrisi Tablosu 67
Tablo 8 - CRITIC Yöntemi / Normalize Edilmiş Karar Matrisi Tablosu..... 68
Tablo 9 - CRITIC Yöntemi / İlişki Katsayı Matrisi Tablosu (ρjk)..... 69
Tablo 10 - CRITIC Yöntemi / İlişki Katsayı Matrisi Tablosu (1- ρjk)..... 69
Tablo 11 - CRITIC Yöntemi / Kriterlere Ait Normalize Matris Standart Sapma Tablosu 70
Tablo 12 - CRITIC Yöntemi / Kriterlerinde Yer Alan Karşıtlık Yoğunluğu ve Paradokslardan Elde Edilen Bilgi Miktarı Değerinin Hesaplanması Tablosu (Cij) 70
Tablo 13 - CRITIC Yöntemi / Kriterlere Ait Ağırlık Tablosu (wj) 71
Tablo 14 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Fayda Kriteri Tablosu (nij)..... 71
Tablo 15 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Maliyet Kriteri Tablosu ($n'ij$).. 72
Tablo 16 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu ($1 - nij$)..... 73
Tablo 17 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu ($1 - n'ij$)..... 73
Tablo 18 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (vij) 74
Tablo 19 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu ($v'ij$) 75
Tablo 20 - RAWEC Yöntemi/ Sonuç ve Sıralama Tablosu 76
Tablo 21 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Pozitif Uzaklık Tablosu ($PDAij$) 77
Tablo 22 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Negatif Uzaklık Tablosu ($NDAij$) 78
Tablo 23 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin PDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (SPi) 79

Tablo 24 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin NDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (NPi) 80
Tablo 25 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatiflerin SP ve SN Değerlerinin Normalleştirilmesi Tablosu ($NSPi, NSNi$) 81
Tablo 26 - EDAS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı (ASi) ve Sıralaması Tablosu 82
Tablo 27 - MAUT Yöntemi / Karar Matrisinin Normalize Tablosu (ui) 83
Tablo 28 - MAUT Yöntemi /Fayda Değeri Tablosu (Ux) 84
Tablo 29 - MAUT Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu . 85
Tablo 30 - CRADIS Yöntemi / Karar Matrisi Normalize Tablosu(nij) 86
Tablo 31 - CRADIS Yöntemi / Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırma Tablosu (vij) 87
Tablo 32 - CRADIS Yöntemi / vij Maksimum ve Minimum Değerler Tablosu (ti, tai) .. 87
Tablo 33 - CRADIS Yöntemi / İdeal Çözümden Sapma Tablosu ($d+$) 88
Tablo 34 - CRADIS Yöntemi / Anti-İdeal Çözümden Sapma Tablosu($d-$) 89
Tablo 35 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin İdeal ve Anti-İdeal Çözümden Sapma Dereceleri Tablosu ($si+, si-$) 90
Tablo 36 - CRADIS Yöntemi / Optimum Alternatiften Sapmalara İlişkin Fayda Fonksiyonu Tablosu 91
Tablo 37 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu 92
Tablo 38 - ARAS Yöntemi / Normalize Karar Matris Tablosu (rij) 93
Tablo 39 - ARAS Yöntemi / Kriterlerin Ağırlıklandırılmış Normalize Değer Tablosu (vij) 94
Tablo 40 – ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Optimallik Fonksiyon Değerleri Tablosu (Si) 95
Tablo 41 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Fayda Değerleri (Ki) ve Sıralaması 96
Tablo 42 - SAW Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Tablosu (rij) 97
Tablo 43 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercih Tablosu (Vi) 98
Tablo 44 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercihi ve Sıralama Tablosu 99
Tablo 45 - Entropi Yöntemi / Karar Matrisi Tablosu 100
Tablo 46 - Entropi Yöntemi / Normalize Edilmiş Karar Matrisi Tablosu 100
Tablo 47 – Entropi Yöntemi / Normalize Edilmiş Değerlerin Logaritması $ln\ (rij)$ 101

Tablo 48 - Entropi Yöntemi / $rij * ln(rij)$ Tablosu..... 102
Tablo 49 - Entropi Yöntemi / Entropi Katsayısı Tablosu..... 102
Tablo 50 - Entropi Yöntemi / Kriterlere Ait Entropi Değeri Tablosu (ej)..... 103
Tablo 51 - Entropi Yöntemi / Kriterlerin Bilgi Miktarı Tablosu (dj)..... 103
Tablo 52 - Entropi Yöntemi / Kriterlere Ait Ağırlık Tablosu (wj)..... 104
Tablo 53 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Fayda Kriteri Tablosu (nij).... 105
Tablo 54 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Maliyet Kriteri Tablosu $(n'ij)$ 105
Tablo 55 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu $(1 - nij)$..... 106
Tablo 56 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu$(1 - n'ij)$..... 107
Tablo 57 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (vij)..... 108
Tablo 58 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu $(v'ij)$..... 108
Tablo 59 - RAWEC Yöntemi/ Sonuç ve Sıralama Tablosu..... 109
Tablo 60 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Pozitif Uzaklık Tablosu $(PDAij)$..... 110
Tablo 61 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Negatif Uzaklık Tablosu $(NDAij)$..... 111
Tablo 62 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin PDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (SPi)..... 112
Tablo 63 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin NDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (NPi)..... 113
Tablo 64 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatiflerin SP ve SN Değerlerinin Normalleştirilmesi Tablosu $(NSPi, NSNi)$..... 114
Tablo 65 - EDAS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı (ASi) ve Sıralaması Tablosu..... 115
Tablo 66 - MAUT Yöntemi / Karar Matrisinin Normalize Tablosu (ui)..... 116
Tablo 67 - MAUT Yöntemi /Fayda Değeri Tablosu (Ux)..... 117
Tablo 68 - MAUT Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu 118
Tablo 69 - CRADIS Yöntemi / Karar Matrisi Normalize Tablosu (nij)..... 119
Tablo 70 - CRADIS Yöntemi / Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırma Tablosu (vij) 120
Tablo 71 - CRADIS Yöntemi / vij Maksimum ve Minimum Değerler Tablosu (ti, tai) 121

Tablo 72 - CRADIS Yöntemi / İdeal Çözümden Sapma Tablosu ($d+$) 121
Tablo 73 - CRADIS Yöntemi / Anti-İdeal Çözümden Sapma Tablosu ($d-$) 122
Tablo 74 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin İdeal ve Anti-İdeal Çözümden Sapma Dereceleri Tablosu ($si+, si-$) 123
Tablo 75 - CRADIS Yöntemi / Optimum Alternatiften Sapmalara İlişkin Fayda Fonksiyonu Tablosu 124
Tablo 76 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu 125
Tablo 77 - ARAS Yöntemi / Normalize Karar Matris Tablosu (rij) 126
Tablo 78 - ARAS Yöntemi / Kriterlerin Ağırlıklandırılmış Normalize Değer Tablosu (vij) 127
Tablo 79 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Optimallik Fonksiyon Değerleri Tablosu (Si) 128
Tablo 80 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Fayda Değerleri (Ki) ve Sıralaması 129
Tablo 81 - SAW Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Tablosu (rij) 130
Tablo 82 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercih Tablosu (Vi) 131
Tablo 83 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercihi ve Sıralama Tablosu 131
Tablo 84 - CRITIC ve Entropi Yöntemlerine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Kendi İçinde Korelasyon Tablosu 133
Tablo 85 - CRITIC Yöntemine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Birbirleriyle Olan Korelasyon Tablosu 133
Tablo 86 - Entropi Yöntemine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Birbirleriyle Olan Korelasyon Tablosu 134

1. GİRİŞ

Dördüncü Sanayi Devrimi olarak da adlandırılan Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde sayısallaşma, otomasyon, akıllı cihaz ağları, makine öğrenimi, veri bilimi ve siber-fiziksel sistemler gibi ileri teknolojilerin bir arada uygulanmasını ifade etmektedir (Kagermann ve diğer., 2013). Bu devrim, sadece üretim sektörünü değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve politik yapıları da kökten değiştirme potansiyeline sahiptir (Schwab, 2016). Endüstri 4.0, ülkelerin küresel rekabet gücünü artırmakta, verimliliği yükseltmekte ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmalarını kolaylaştırmaktadır (Xu ve diğer., 2018). Ancak, bu dönüşüm süreci, özellikle üst-orta gelirli ülkeler için hem büyük fırsatlar hem de önemli zorluklar barındırmaktadır (Lee ve diğer., 2015).

Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), ülkelerin inovasyon performanslarını ölçen ve karşılaştıran kapsamlı bir araçtır (Dutta ve diğer., 2022). Endeks, inovasyon girdi ve çıktılarını değerlendirerek ülkelerin teknolojik gelişmişlik düzeylerini ortaya koymaktadır. Endüstri 4.0'ın temel unsurları olan dijital altyapı, AR-GE yatırımları, yüksek teknoloji ürünleri ve inovasyon kapasitesi, KİE'nin önemli bileşenlerini oluşturmaktadır (Cornell University ve diğer., 2023). Bu nedenle, KİE'de yer alan ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerinin değerlendirilmesi, inovasyon ve teknolojik gelişme arasındaki ilişkiyi anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Üst-orta gelirli ülkeler, ekonomik kalkınma süreçlerinde önemli bir geçiş aşamasında bulunmaktadır. Bu ülkeler, hem gelişmiş ülkelerin teknolojik üstünlüğüyle rekabet etmek hem de düşük gelirli ülkelerle olan farklarını korumak zorundadır (World Bank, 2023). Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın benimsenmesi, üst-orta gelirli ülkeler için stratejik bir öncelik haline gelmiştir (Götz ve Jankowska, 2017). Ancak, bu ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini değerlendirmek, çok boyutlu bir analiz gerektirmektedir. Bu analiz hem teknolojik altyapıyı hem de inovasyon kapasitesini kapsayan çok kriterli bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır (Zavadskas ve diğer., 2014).

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, karmaşık karar problemlerinin çözümünde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır (Mardani ve diğer., 2015). Bu yöntemler, birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesine olanak tanıyarak, karar vericilere tutarlı

ve objektif sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışmada, ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini değerlendirmek için kullanılan kriterler ÇKKV yöntemlerinden CRITIC ve Entropi yöntemleri ile ağırlıklandırılımış alternatif ülkelerin sıralanması RAWEC, EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS ve SAW yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana sıralama yöntemi RAWEC yöntemi olarak belirlenmiştir. Sonuçların tutarlılığını test etmek amacıyla diğer yöntemler ile de sıralamalar yapılmıştır. Bu yöntemler, kriter ağırlıklarının belirlenmesi, alternatiflerin sıralanması ve sonuçların tutarlılığının test edilmesi açısından bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Keshavarz Ghorabaee ve diğer., 2015; Zavadskas ve diğer., 2016).

Bu çalışmanın temel amacı, Küresel İnovasyon Endeksi'nde yer alan üst-orta gelirli ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini çok kriterli karar verme yöntemleriyle değerlendirmek ve bu ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini sıralamaktır. Bu çalışma, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinde kritik rol oynayan faktörleri analiz ederek, ülkelerin ve hükümetlerin bu faktörlere dayalı politikalar geliştirip Endüstri 4.0 seviyelerini artırmalarını sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, farklı ÇKKV yöntemlerinin uygulanmasıyla elde edilen sonuçların korelasyon analizi, çalışmanın metodolojik tutarlılığını güçlendirmektedir.

Bu tez çalışması, Endüstri 4.0'ın üst-orta gelirli ülkeler açısından önemini vurgulayarak, literatüre hem teorik hem de metodolojik katkılar sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın bulguları, politika yapıcılar ve karar vericiler için dijital dönüşüm süreçlerini hızlandıracak stratejik öneriler içermektedir. Ayrıca, bu çalışma, gelecekte benzer konularda yapılacak araştırmalar için bir referans noktası oluşturmayı hedeflemektedir.

2. ENDÜSTRİ TARİHİ VE GELİŞİMİ

Sanayi devrimleri, insanlık tarihinin üretim süreçlerindeki en köklü dönüşümleri olarak kabul edilmektedir. Her sanayi devrimi, yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve kültürel yapıları da etkileyen kapsamlı değişimlere yol açmıştır. 21. yüzyılda, dijitalleşme ve bağlantılı teknolojilerin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle başlayan dördüncü sanayi devrimi, literatürde "Endüstri 4.0" (Industry 4.0) olarak adlandırılmaktadır (McKinsey ve Company, 2023).

2.1. Endüstri 1.0: Mekanizasyon Çağı (1760-1840)

Birinci sanayi devrimi, 18. yüzyılın sonları ile 19. yüzyılın başlarına kadar uzanır ve İngiltere'de başlar. Bu devrim, buharlı makinelerin icadı ve kullanımıyla mümkün olmuştur. Buhar gücünün keşfi, el işçiliğiyle yapılan üretimin yerine makineleşmiş üretim süreçlerini getirmiştir. Tekstil, demir ve kömür endüstrileri gibi sektörler, bu devrimin etkisiyle büyümüş, seri üretim yöntemleri hızla gelişmiştir. Ayrıca, bu devrim ulaşımda da büyük değişimlere yol açarak demiryolları ve buharlı gemiler gibi yeni ulaşım araçlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Birinci sanayi devrimi, özellikle Avrupa'da şehirleşmenin hızlanmasına, kırsal kesimden büyük şehirlere olan göçün artmasına yol açmıştır. Bu dönemde, iş gücü organizasyonları da değişmeye başlamış, fabrikalar iş gücünü daha organize bir şekilde çalıştırmaya başlamıştır. Buna paralel olarak, işçi sınıfının ortaya çıkışı, sosyal ve ekonomik değişimlerin de başlangıcını oluşturmuştur.

Öncü Gelişmeler:

- James Watt'ın buhar makinesindeki radikal iyileştirmeler (1776) ve Richard Arkwright'ın su çerçeveli dokuma tezgâhı (1769).
- Kömür enerjisinin sanayide yaygın olarak kullanılmaya başlanılması.

Dönüşümler:

- Üretim: El tezgâhlarından mekanize fabrika sistemine geçiş.
- Sosyal Etki: Kırsal nüfusun %15'ten %50'ye kentlere göçü (KFactory, 2023).

Örnek Vaka:

- İngiltere'de pamuklu dokuma üretiminin 1780-1840 arasında 20 kat artışı (Kılıç, 2023).

2.2. Endüstri 2.0: Elektrik ve Kitlesel Üretim (1870-1970)

19. yüzyılın sonlarına doğru yaşanan ikinci sanayi devrimi, elektrik gücünün ve içten yanmalı motorların kullanımına dayanmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimde kullanılmaya başlanması, makinelerin daha verimli çalışmasını sağlarken, aynı zamanda iletişim ve ulaşım alanlarında da önemli yeniliklere yol açmıştır. Elektrikli aydınlatma, telgraf ve telefon gibi buluşlar, ticaretin ve sosyal iletişimin hızlanmasına olanak tanımıştır.

Bu dönemde, Henry Ford'un otomobil üretimindeki montaj hattı tekniği, üretimin hızını ve verimliliğini büyük ölçüde artırmıştır. Aynı zamanda, kimya, çelik ve otomotiv endüstrilerinde de büyük gelişmeler yaşanmış ve dünya genelindeki ekonomik büyüme hızlanmıştır. Endüstri 2.0, toplumsal yapıyı da değiştirmiştir. Büyük fabrikalar ve endüstriyel tesisler, şehirlerin çevresinde yoğunlaşarak sanayileşmenin dünya genelinde yayılmasına olanak tanımıştır.

Temel Dinamikler:

- Elektriğin endüstriyel kullanımının başlaması (Sulzberger, 2024).
- Taylorizm[1] (1911) ve Fordizm[2] (1913) ile bilimsel üretim yönetiminin yaygınlaşması (McKinsey ve Company, 2023).

Kritik Yenilikler:

- Otomatik montaj hatlarının üretim süresini %80'lerinde üzerinde azalması,
- Standardizasyon ve yedek parça devrimi gerçekleşmiştir.

Makro Etkiler:

- Reel ücretlerde %300 artış gerçekleşmiştir (1870-1970).
- Tüketici toplumunun doğuşu ve süregelmesi bu dönemde başlamıştır.

[1] Taylorizm, Frederick Winslow Taylor tarafından geliştirilen ve iş gücü verimliliğini artırmayı amaçlayan bir yönetim teorisidir.
[2] Fordizm, Henry Ford'un öncülüğünü yaptığı, üretim bandının uygulamaya konmasını içeren üretim sistemidir.

2.3. Endüstri 3.0: Dijital Devrim (1970-2010)

20. yüzyılın ikinci yarısında yaşanan üçüncü sanayi devrimi, dijital teknolojilerin üretim süreçlerine entegre olmasıyla şekillenmiştir. Elektronik, bilgisayarlar, otomasyon ve robot teknolojilerinin yaygınlaşması, üretim alanında köklü değişikliklere yol açmıştır. Bu devrim, sanayinin daha esnek ve hızlı bir şekilde üretim yapmasını sağlamış, aynı zamanda verimliliği artırmıştır. Özellikle 1970'lerin sonlarına doğru bilgisayarların endüstriyel üretime girmesiyle birlikte, makineler programlanabilir hale gelmiş, üretim hatları daha fazla otomatikleştirilmiştir.

Bu dönemde, üretimin küresel çapta yayılması da hız kazanmış, gelişmiş ülkelerle birlikte gelişmekte olan ülkelerde de sanayi yatırımları artmıştır. Ayrıca, bu devrimle birlikte iş gücü yapısında da önemli değişiklikler yaşanmış, yeni beceri setlerine sahip çalışanlara olan talep artmıştır. Üçüncü sanayi devrimi, ayrıca küresel ekonominin daha entegre bir yapıya bürünmesini ve iş gücünün uluslararası hareketliliğini teşvik etmiştir.

Teknolojik Atılımlar:

- ENIAC[3] adlı bilgisayarın (1946) ve mikroişlemcilerin (1971) gelişimi gerçekleşmiştir.
- PLC sistemleri otomasyon endüstrisinde köklü bir dönüşüm yaratmıştır (1968).

Üretimde Paradigma Kayması:

- CAD/CAM yazılımları ile tek bir geliştirme aracı kullanarak prototipler, hazır ürünler ve ürün imalat süreçleri tasarlayıp üretilmiştir.
- ERP sistemlerinin tedarik zinciri optimizasyonu gerçekleşmiştir (Endüstri40-2, 2023).

Küresel Sonuçlar:

- Çin'in 2001'de DTÖ'ye katılımıyla küresel üretim ağlarının dönüşümü yaşanmıştır (CFR, 2025).
- İmalat istihdamının ABD'de %25'ten %8'e gerilemesi (Kılıç, 2023).

[3] ENIAC, elektrikle çalışan ve elektronik veri işleme kapasitesine sahip ilk bilgisayardır.

2.4. Endüstri 4.0: Siber-Fiziksel Sistemler Çağı (2011-)

Endüstri 4.0, çağımızda yaşanan sanayi devriminin adıdır ve dijitalleşme, otomasyon ve bağlantılı sistemlerin üretim süreçlerinde tam anlamıyla devreye girmesiyle şekillenmektedir. Bu devrim, geleneksel üretim süreçlerinin yerini akıllı üretim süreçlerine bırakması ve fiziksel ile dijital dünyaların birleşmesi ile tanımlanır. Endüstri 4.0'ın temel dinamiklerini, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği, yapay zekâ, robot teknolojileri, bulut bilişim ve siber fiziksel sistemler gibi teknolojiler oluşturmaktadır.

Almanya'nın 2011 yılında Hannover Fuarı'nda Endüstri 4.0 kavramını ortaya koymasıyla bu yeni devrim daha geniş bir kitleye ulaşmıştır. Bu dönemde, fabrikaların birbirleriyle ve tedarik zincirleriyle dijital ortamda bağlantılı hale gelmesi, üretim süreçlerinin daha esnek, verimli ve optimize edilmiş bir şekilde yürütülmesini mümkün kılmaktadır. Endüstri 4.0, sadece bir teknoloji devrimi değil, aynı zamanda iş gücü ve toplumsal yapıyı da değiştiren bir dönüşümü ifade eder.

Endüstri 4.0'ın en önemli özelliklerinden biri, veri toplama ve analitik kullanımıdır. Bu dönemde, makineler arasındaki iletişim sayesinde, üretim süreçleri gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve yönetilebilir hale gelir. Bu değişim, üretim hatlarında esneklik sağlayarak, talep değişikliklerine hızlı bir şekilde yanıt verebilme yeteneği kazandırır. Ayrıca, Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim tekniklerine de olanak tanımaktadır, çünkü dijital teknolojiler sayesinde daha az enerji tüketimi ve daha az atık üretimi mümkün hale gelmektedir.

Operasyonel Devrimler:

- Gerçek zamanlı veri analizi ile %30 enerji verimliliği artış gerçekleşmiştir (Endüstri40-2, 2023).
- Nesnelerin İnterneti (IoT) sayesinde makine ömrü tahmininde %99 doğruluk sağlanmaktadır.

Küresel Yayılım:

- Çin "Yapay Zekâ 2030" planı devreye sokmuştur (150 milyar $ yatırım) (Bayrak, 2025).
- AB'nin "Dijital Avrupa" programı hazırlaması örnek gösterilebilir (7,5 milyar € bütçe).

Üretimde Esneklik:

- Adidas'ın "Speedfactory"leri ile siparişe özel ayakkabı üretimi başlaması (48 saat teslimat).

Beceri Dönüşümü:

- 2025'te 97 milyon yeni dijital iş rolü öngörüsü örneklendirilebilir (Seyrek, 2025).

Endüstri 4.0'ın getirdiği yenilikler kadar, çeşitli risk ve belirsizlikleri de beraberinde getirdiği dile getirilmektedir. Literatürde en çok tartışılan konular arasında, iş gücü üzerindeki etkiler, dijital uçurum, veri güvenliği sorunları ve etik ikilemler yer almaktadır. Otomasyonun artmasıyla birlikte özellikle mavi yaka iş gücünün bazı sektörlerde işsiz kalma riski artarken, yeni meslek alanları da ortaya çıkmaktadır (McKinsey ve Company, 2023).

Diğer yandan, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında Endüstri 4.0 adaptasyon düzeyleri arasında farklar gözlemlenmektedir. Teknolojiye erişim, insan sermayesi niteliği, altyapı yeterliliği ve devlet politikaları bu adaptasyon sürecini doğrudan etkilemektedir.

Endüstri 4.0, sanayi devrimlerinin tarihsel sürecinde ulaşılan en son aşamayı temsil etmekte olup, dijital teknolojilerin üretim sistemlerine entegrasyonu yoluyla kapsamlı bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu devrim, yalnızca sanayi üretimini değil, sosyoekonomik yapıları ve insan yaşamını da derinden etkilemektedir. Önceki sanayi devrimlerinin bıraktığı miras üzerine inşa edilen Endüstri 4.0, veriye dayalı, esnek ve özelleştirilmiş üretim sistemleriyle geleceğin endüstriyel ekosistemini şekillendirmektedir. Ancak bu dönüşüm sürecinin başarılı bir şekilde yönetilmesi için teknolojik ilerlemenin yanı sıra eğitim, etik ve sosyal politikaların da entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

3. ENDÜSTRİ 4.0 BİLEŞENLERİ

Endüstri 4.0'ın başlıca unsurlarını dokuz ana başlıkta inceleyebiliriz. Bunlar: bulut teknolojisi, arttırılmış gerçeklik, büyük veri ve analitik, katmanlı üretim, siber güvenlik, nesnelerin interneti, yatay ve dikey entegrasyon, simülasyon ve otonom robotlar (Öz ve Tanç, 2024).

3.1. Akıllı Robotlar

Günümüz dijital çağında, Endüstri 4.0 devrimi bilişim teknolojileri, bulut bilişim ve büyük veri analitiğinin sağladığı olanaklarla hızla gelişmektedir. Bu dönüşüm sürecinde, otonom robot sistemleri üretim ekosisteminin en kritik bileşenleri arasında yer almaktadır (Tonga ve Tonga, 2022). Akıllı yazılımlarla donatılmış makinelerin birbiriyle uyumlu çalışması, modern üretim tesislerinde verimliliği önemli ölçüde artırmıştır (Koştı, 2020).

Otonom robotlar, programlanabilir yapıları sayesinde insan müdahalesi olmadan çeşitli görevleri yerine getirebilen mekatronik sistemler olarak tanımlanabilir. Bu sistemler, tam otonom çalışabilme özelliğinin yanı sıra uzaktan kontrol edilebilme esnekliğine de sahiptir (Milvus Robotics, 2023). Otomotiv, havacılık, denizcilik ve üretim sanayisi gibi pek çok sektörde kendini gösteren bu teknoloji, özellikle akıllı fabrikalarda birbirleriyle iletişim kurabilen robotik sistemler şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Otonom robot teknolojisinin kökenleri, 1980'li yıllarda fabrikalarda kullanılmaya başlanan otomatik yönlendirmeli araçlara (AGV) dayanmaktadır. Bu ilk nesil sistemler, ağır yük taşıma operasyonlarını gerçekleştirebilmekle birlikte, çalışabilmek için zemin işaretleri, manyetik bantlar veya raylar gibi fiziksel altyapı unsurlarına ihtiyaç duyuyordu (Pirobotik, 2021). Günümüzde ise Endüstri 4.0'ın sunduğu gelişmiş sensör teknolojileri ve yapay zekâ algoritmaları sayesinde, otonom mobil robotlar (AMR) herhangi bir fiziksel altyapı gereksinimi olmadan çalışabilmektedir.

Yeni nesil otonom robotlar, görev yaptıkları ortamı kendi sensörleriyle haritalandırarak, daha önceki sistemlerin ihtiyaç duyduğu altyapıya gerek duymadan çalışabilmektedirler. Bu sayede sabit hatlar olmaksızın en verimli güzergâhları dinamik şekilde belirleyebilmekte ve çevresel değişikliklere anlık olarak adapte olabilmektedirler.

Aynı zamanda bu robotlar, insanlarla aynı fiziksel ortamda güvenli biçimde çalışabilmekte, üretim sistemlerinden doğrudan iş emirleri alarak üretim süreçlerine aktif olarak entegre olabilmektedir (Milvus Robotics, 2023).

Fabrikalarda kullanılan bu akıllı robotlar, taşıma sistemleri veya robotik kollarla senkronize bir biçimde çalışarak malzeme yükleme ve boşaltma işlemlerini gerçekleştirebilir. Otonom robotların sunduğu avantajlar arasında yüksek taşıma hızı, üretim yoğunluğunu artırma, iş gücü maliyetlerini azaltma, bakım ve altyapı giderlerini düşürme ve iş sağlığı risklerini en aza indirme gibi faktörler bulunmaktadır (Milvus Robotics, 2023; Tonga ve Tonga, 2022).

Yapay zekâ teknolojilerinin bir alt disiplini olarak değerlendirilen otonom robotlar, çevresel faktörleri algılayarak bu bilgilere dayalı kararlar verebilen ve bu kararlar doğrultusunda eylem gerçekleştirebilen bir yapıya sahiptir. Bu sistemler; karar verme, konum belirleme, haritalandırma ve görev planlama gibi yetenekleri sayesinde akıllı üretim süreçlerinde etkin biçimde rol almaktadır (Bıçakçı, 2019).

Modern otonom robot sistemlerinin temel avantajları şunlardır:

- Dinamik ortam haritalama ve gerçek zamanlı yol planlama yeteneği,
- İnsanlarla güvenli bir şekilde aynı ortamı paylaşabilme,
- Üretim yönetim sistemleriyle entegre çalışabilme,
- Robot kollar ve diğer endüstriyel ekipmanlarla uyumlu çalışmadır.

Bu özellikler sayesinde otonom robotlar, malzeme taşıma süreçlerinde verimliliği artırırken, iş gücü maliyetlerini düşürmekte ve iş kazası risklerini minimize etmektedir (Bıçakçı, 2019). Ayrıca, bakım maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamakta ve depo yönetim sistemlerini optimize etmektedir.

Otonom robot teknolojisinin uygulama alanları giderek genişlemektedir. Başlangıçta sadece tehlikeli ve zorlu endüstriyel ortamlarda kullanılan bu sistemler, artık sağlık hizmetlerinden tarıma, lojistikten ev hizmetlerine kadar pek çok alanda karşımıza çıkmaktadır (Yazıcı, 2016). Cerrahi robotlar, hasta bakım asistanları, insansız hava araçları ve otonom temizlik robotları, bu teknolojinin yaygınlaşan uygulama örneklerindendir.

3.2. Büyük Veri ve Analitik

Günümüz dijital çağında, veri üretim hızı ve çeşitliliği benzeri görülmemiş seviyelere ulaşmıştır. Bu durum, geleneksel veri işleme yöntemlerinin yetersiz kalmasına ve yeni analitik yaklaşımların geliştirilmesine yol açmıştır (Chen ve diğer., 2021). Büyük veri kavramı, standart veri tabanı sistemlerinin işleyemeyeceği hacim, hız ve çeşitlilikteki veri kümelerini ifade etmektedir (Tonga ve Tonga, 2022).

Büyük veri; hacim, hız, çeşitlilik, doğruluk ve değer gibi temel niteliklere sahip olan; klasik bilgi sistemleriyle işlenmesi güç, yapılandırılmış ya da yapılandırılmamış veri kümelerini ifade eder (Ersöz, 2019). Geleneksel verilerin ötesinde olan bu yapılar, sosyal medya paylaşımlarından sensör verilerine kadar birçok farklı kaynaktan elde edilebilir. Bu verilerin işlenmesiyle kurumlar, daha etkili stratejik kararlar alabilir hâle gelmiştir (Yalçınkaya, 2019). Büyük verinin temel özellikleri literatürde genellikle "5V" modeli ile açıklanmaktadır:

- Hacim (Volume): Petabyte ve exabyte seviyelerindeki veri büyüklükleri,
- Hız (Velocity): Gerçek zamanlı veri akışı ve işleme gereksinimi,
- Çeşitlilik (Variety): Yapılandırılmış, yarı yapılandırılmış ve yapılandırılmamış veri türleri,
- Doğruluk (Veracity): Veri kalitesi ve güvenilirlik sorunları,
- Değer (Value): Ham veriden türetilen iş zekâsı ve stratejik içgörülerden oluşmaktadır.

Veri analitiği süreci; analiz edilecek soruların belirlenmesi, verilerin toplanması, işlenmesi ve anlamlandırılması aşamalarından oluşur. Bu süreç, veri madenciliği, makine öğrenmesi, doğal dil işleme gibi tekniklerle desteklenmektedir (Gtech, 2021). Amaç, verilerden anlamlı sonuçlar çıkararak kurumlara değer katacak içgörüler elde etmektir. Büyük veri analitiği, çeşitli disiplinlerden beslenen multidisipliner bir alandır. Başlıca analiz teknikleri şunlardır:

- Makine Öğrenmesi: Desen tanıma ve tahmine dayalı modelleme,
- Veri Madenciliği: Büyük veri kümelerinden anlamlı örüntülerin çıkarılması,
- Metin Madenciliği: Doğal dil işleme teknikleriyle yapılandırılmamış veri analizi,
- Gerçek Zamanlı Analitik: Akış verilerinin anlık işlenmesi,
- Görsel Analitik: Veri görselleştirme teknikleridir.

Büyük veri, birçok sektörde dönüşümsel etki yaratmaktadır. Eğitim alanında kişiselleştirilmiş içerikler geliştirilebilirken, sağlık sektöründe hasta verilerinin analizine dayalı daha hızlı teşhis ve tedavi mümkün olmaktadır. Finans sektöründe müşteri davranışları analiz edilerek hizmet kalitesi artırılmakta; kamu yönetiminde ise politika geliştirme ve hizmet süreçleri büyük veriyle desteklenmektedir. Ayrıca enerji yönetimi, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve spor performansı analizi gibi pek çok farklı alanda da kullanılmaktadır. Büyük veri analitiği, çeşitli sektörlerde dönüştürücü etkiler yaratmaktadır. Bunlar:

Üretim Sektörü:

- Tahmine dayalı bakım sistemleri,
- Tedarik zinciri optimizasyonu,
- Kalite kontrol süreçleri örnek gösterilebilir.

Sağlık Hizmetleri:

- Kişiselleştirilmiş tıp uygulamaları,
- Epidemiyolojik tahmin modelleri,
- Klinik karar destek sistemleri örnek gösterilebilir.

Finansal Hizmetler:

- Dolandırıcılık tespiti,
- Risk yönetimi,
- Müşteri davranışı analizi örnek gösterilebilir.

Akıllı Şehirler:

- Trafik yönetimi ve enerji verimliliği,
- Kamu hizmetlerinin optimizasyonu örnek gösterilebilir.

3.3. Zenginleştirilmiş Gerçeklik (Arttırılmış Gerçeklik)

Zenginleştirilmiş gerçeklik, gerçek dünya görüntülerinin dijital bilgilerle (ses, video, grafik veya GPS verileri) zenginleştirilmesidir. Arttırılmış Gerçeklik (AR), özellikle eğitim, bakım-onarım ve tasarım alanlarında kullanılır. Örneğin, bir tekniker, AR gözlükleri

kullanarak bir makinenin bakım talimatlarını gerçek zamanlı olarak görüntüleyebilir. Bu teknoloji, insan-makine etkileşimini artırarak hata oranlarını azaltır ve verimliliği artırır (Kagermann ve diğer., 2013).

Artırılmış gerçeklik (AR) sistemleri, temel olarak optik tabanlı ve video tabanlı olmak üzere iki farklı teknikle çalışmaktadır. Bu iki yaklaşım arasındaki en belirgin ayrım, gerçek ve sanal öğelerin entegrasyonunun kullanıcıya nasıl sunulduğudur (Tonga ve Tonga, 2022). Optik tabanlı sistemlerde, kullanıcılar özel olarak tasarlanmış gözlükler veya lensler yardımıyla gerçek dünya görüntüsünün üzerine bindirilmiş dijital içerikleri doğrudan görebilmektedir. Bu tür sistemler, Microsoft HoloLens ve Meta AR gözlükleri gibi cihazlarda kullanılmaktadır (NTT Data Solutions, 2023).

Video tabanlı AR sistemlerinde ise gerçek ortam görüntüleri bir kamera ile kaydedilerek yazılım aracılığıyla işlenmekte ve sanal nesnelerle birleştirilmektedir. Elde edilen karma görüntü, kullanıcıya akıllı telefon, tablet veya bilgisayar ekranları üzerinden aktarılmaktadır (Togay ve diğer., 2019).

Etkili bir artırılmış gerçeklik sistemi için gerekli altyapı şu unsurlardan oluşmaktadır:

- Donanım (işlemci, sensörler, kamera),
- Görüntüleme birimleri (HUD gözlükler, taşınabilir ekranlar),
- Yazılım ve algoritmalar (nesne tanıma, 3B modelleme),
- Ağ bağlantıları (bulut entegrasyonu),
- Uzaysal AR (SAR) teknolojileri şeklinde sıralanmaktadır.

Artırılmış Gerçekliğin Endüstriyel ve Ticari Uygulamaları: AR teknolojisi, çeşitli sektörlerde yenilikçi çözümler sunmaktadır:

- *Perakende ve E-Ticaret:* Mobilya ve dekorasyon ürünlerinin sanal olarak ev ortamında görüntülenmesine olanak tanıyan uygulamalar, tüketici deneyimini geliştirmektedir (NTT Data Solutions, 2023).
- *Endüstriyel Bakım:* Makine arızalarının simülasyonlar aracılığıyla tespit edilmesi ve teknik personelin AR destekli talimatlarla çalışması, bakım süreçlerini optimize etmektedir (Tonga ve Tonga, 2022).
- *Sağlık Sektörü:* Cerrahi prosedürlerde hastaya ait 3B anatomik modellerin gerçek zamanlı olarak görüntülenmesi, tanı ve tedavi süreçlerinde hekimlere yardımcı olmaktadır.
- *Eğitim:* Karma gerçeklik ortamlarında yapılan interaktif eğitimler, öğrenme verimliliğini artırmaktadır.

- *Mimari ve İnşaat:* Yapı tasarımlarının fiziksel ortamlarda sanal prototiplerinin oluşturulması, tasarım hatalarının önlenmesine katkı sağlamaktadır (Togay ve diğer., 2019)

Sonuç olarak, artırılmış gerçeklik teknolojileri, sunduğu esnek ve etkileşimli çözümlerle endüstriyel süreçlerden günlük yaşama kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu teknolojinin gelişimi, özellikle Endüstri 4.0 kapsamında dijital dönüşümün önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

3.4. Eklemeli Üretim (Katmanlı Üretim)

Sanayi devrimlerinin her aşamasında üretim tekniklerinde önemli dönüşümler yaşanmış; özellikle Endüstri 4.0 ile birlikte üretim süreçleri daha dijital, esnek ve kişiselleştirilebilir hale gelmiştir. Bu dönüşümün en çarpıcı örneklerinden biri olan eklemeli üretim (additive manufacturing), üretim paradigmasında köklü değişikliklere neden olmuş, geleneksel imalat yöntemlerinin sınırlarını genişletmiştir (Tonga ve Tonga, 2022).

Eklemeli üretim, bilgisayar destekli tasarımlara (CAD) dayalı olarak üç boyutlu nesnelerin katman katman malzeme eklenerek oluşturulmasını sağlayan bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, talaşlı imalat gibi çıkarımsal yöntemlerin aksine, yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda malzeme kullanarak ürün oluşturulmasını sağlar. Bu özelliği ile hem sürdürülebilirlik ilkelerine katkı sunmakta hem de karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretimini kolaylaştırmaktadır (Kromas, 2023).

Geleneksel üretim sistemlerinde, karmaşık yapıdaki parçaların üretimi genellikle zaman alıcı, maliyetli ve verimliliği düşük süreçler gerektirirken; eklemeli imalat teknolojileri sayesinde bu parçalar çok daha kısa sürede, daha düşük maliyetle ve yüksek hassasiyetle üretilebilmektedir. Özellikle prototipleme süreçlerinde sunduğu hız ve esneklik, Ar-Ge çalışmalarında bu yöntemin yaygınlaşmasını sağlamıştır (Gedik, 2023).

Eklemeli üretim süreci temel olarak şu aşamalardan oluşmaktadır:

- CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) verilerinin oluşturulması,
- Dijital modelin katmanlara ayrılması,
- Malzeme biriktirme yoluyla katmanlı imalat,
- Son işlem ve yüzey bitirme uygulamaları şeklindedir.

Eklemeli üretim teknolojileri, kullanılan malzeme ve enerji kaynağına göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır:

- *FDM (Fused Deposition Modeling):* Termoplastik filamentlerin ekstrüzyon yoluyla katmanlı olarak biriktirilmesi prensibine dayanır.
- *SLS (Selective Laser Sintering):* Toz halindeki malzemelerin lazerle sinterlenmesi yöntemidir.
- *SLM (Selective Laser Melting):* Metal tozlarının tam ergitilerek birleştirilmesini sağlayan yöntemdir.
- *WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing):* Metal tel ve ark kaynağı kullanılarak büyük ölçekli metal parçaların üretilmesini sağlayan sistemdir (Gedik, 2023).

Eklemeli Üretimin Avantajları: Eklemeli üretim teknolojileri, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır:

- Karmaşık geometrilerin tek parça halinde üretilebilmesi,
- Malzeme israfının minimize edilmesi (%70'e varan tasarruf),
- Üretim süreçlerinin hızlandırılması,
- Kişiselleştirilmiş üretim olanakları,
- Hafif ve optimize edilmiş tasarımların gerçekleştirilebilmesidir (Kromas, 2023).

Eklemeli üretimin Endüstri 4.0 bağlamındaki önemi, sadece teknik avantajlarıyla sınırlı değildir. Bu teknoloji aynı zamanda üretim süreçlerinin dijitalleşmesini desteklemekte, kişiselleştirilmiş üretime olanak tanımakta ve lojistik süreçlerdeki bağımlılığı azaltarak yerinde üretim olanağı sunmaktadır. Böylelikle hem stok maliyetleri düşmekte hem de tedarik zinciri daha esnek hale gelmektedir (Tonga ve Tonga, 2022).

Sonuç olarak, eklemeli üretim teknolojileri, geleneksel üretim anlayışına alternatif bir yaklaşım sunmakta ve Endüstri 4.0'ın hedeflediği dijital, esnek ve entegre üretim vizyonuna güçlü bir katkı sağlamaktadır. Gelecekte, bu teknolojinin daha da gelişerek üretim sektöründe standart bir uygulama haline gelmesi beklenmektedir.

3.5. Bulut Teknolojisi (Bulut İletişim)

Dijitalleşmenin ivme kazanmasıyla birlikte bireysel ve kurumsal düzeyde veri üretimi büyük bir artış göstermiştir. Bu doğrultuda, verilerin güvenli biçimde depolanması

ve istenilen anda erişilebilir olması, çağdaş bilgi teknolojilerinin temel hedeflerinden biri hâline gelmiştir. Artan veri ihtiyacını karşılamak amacıyla geliştirilen bulut bilişim teknolojisi, kullanıcıların yazılım, donanım ve işlem gücü gibi bilişim kaynaklarına internet üzerinden erişebilmesini mümkün kılan bir hizmet altyapısıdır (Tonga ve Tonga, 2022).

Bulut bilişim, fiziksel depolama alanlarına duyulan gereksinimi azaltarak, veriye cihazdan bağımsız biçimde erişme olanağı sunar. Bu teknoloji sayesinde kullanıcılar, düşük donanım kapasitesine sahip cihazlar üzerinden dahi uygulamalara ve verilere erişim sağlayabilmektedir. Bu yönüyle bulut bilişim hem bireyler hem de işletmeler için esnek, ölçeklenebilir ve maliyet avantajı sunan bir çözüm hâline gelmiştir.

Bulut tabanlı hizmetler, temelde üç farklı servis modeli çerçevesinde şekillenmektedir.: Altyapı hizmeti (IaaS), platform hizmeti (PaaS) ve yazılım hizmeti (SaaS). IaaS modeli, işletmelere sanal sunucular ve veri depolama hizmetleri sunarken; PaaS, geliştiricilerin uygulama geliştirme ve test etme süreçlerini destekleyen bir altyapı sağlar. SaaS ise kullanıcıların yazılım uygulamalarına doğrudan internet tarayıcıları aracılığıyla erişimini mümkün kılar.

Bu hizmet modellerinin yanı sıra, bulut bilişim dört ana dağıtım yapısına sahiptir: genel, özel, topluluk ve melez bulutlar. Genel bulutlar, geniş kullanıcı kitlelerine açık sistemlerdir; özel bulutlar ise sadece belirli bir kurumun kullanımına yöneliktir. Topluluk bulutları, benzer güvenlik ve politika ihtiyaçlarına sahip kuruluşların ortak kullanımına sunulurken, melez bulut yapıları bu modellerin kombinasyonunu içerir ve farklı ihtiyaçlara esnek çözümler üretir.

Bulut bilişim teknolojisi, veri güvenliği, maliyet avantajı, sistem ölçeklenebilirliği ve yönetim kolaylığı gibi birçok avantajı beraberinde getirir. Fiziksel sunucu ve donanım yatırımlarına duyulan ihtiyacı azaltarak firmaların yalnızca kullandıkları kadar ödeme yapmalarını sağlar. Ayrıca, verilerin dünyanın farklı bölgelerinde yer alan güvenli veri merkezlerinde yedeklenmesi, siber güvenlik açısından önemli bir artı değer sunmaktadır.

Günümüzde Google Drive, Microsoft OneDrive, Amazon Web Services, iCloud ve Dropbox gibi birçok platform bu hizmetleri kullanıcılarla buluşturmaktadır. Türkiye'de de TTNET Bulut ve Turkcell Bulut gibi yerel servis sağlayıcılar bu alanda önemli adımlar atmaktadır. Bulut teknolojisinin Endüstri 4.0 ile olan entegrasyonu ise nesnelerin interneti ve büyük veri uygulamalarının etkinliğini artırarak dijital dönüşüm süreçlerine katkı sunmaktadır (Tonga ve Tonga, 2022).

3.6. Siber Güvenlik

Endüstri 4.0; dijitalleşme, nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ (AI), büyük veri (Big Data) ve siber-fiziksel sistemler (CPS) gibi teknolojilerin entegrasyonu ile üretim ve hizmet süreçlerinde devrimsel bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca fiziksel makinelerin dijitalleşmesini değil, aynı zamanda veri akışlarının, sistem entegrasyonlarının ve dijital ağlar üzerinden sağlanan iletişimin güvenliğini de zorunlu kılmaktadır (Tonga ve Tonga, 2022). Bu noktada, siber güvenlik Endüstri 4.0 ekosisteminin ayrılmaz bir parçası haline gelerek ön plana çıkmaktadır.

Endüstri 4.0'ın sunduğu bağlantılı yapılar ve otomasyon sistemleri, geleneksel güvenlik anlayışlarını yetersiz hale getirmiştir. Üretim hatlarında yer alan makinelerin internet aracılığıyla uzaktan izlenebilir ve yönetilebilir olması, siber saldırılara açık yeni alanlar yaratmaktadır (Ak ve Kağnıcıoğlu, 2021). Bu durum, üretim sistemlerinin güvenilirliğini, veri bütünlüğünü ve iş sürekliliğini doğrudan tehdit etmektedir.

Günümüzde fabrikalar, sadece fiziksel değil aynı zamanda dijital varlıkları da barındıran "akıllı fabrikalar" olarak tanımlanmaktadır. Bu yapılar, siber-fiziksel sistemler sayesinde birbirleriyle ve merkezi yönetim platformlarıyla sürekli iletişim halindedir. Ancak bu iletişim hatları, siber saldırganların hedefi haline gelmektedir. Örneğin, siber saldırılar sonucu üretim bantlarının durması, hatalı üretim yapılması veya müşteri verilerinin ele geçirilmesi gibi ciddi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir (Infosec, 2024).

Nitekim, Endüstri 4.0 kapsamında kullanılan teknolojilerin güvenlik açıkları hem ekonomik hem de stratejik kayıplara neden olabilecek düzeydedir. Bu nedenle organizasyonların, sadece teknolojik dönüşüme değil, aynı zamanda bu dönüşümle entegre bir şekilde ilerleyen siber güvenlik stratejilerine de yatırım yapmaları gerekmektedir (MTU Global Campus, 2024).

Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri olan IoT, bulut bilişim ve otonom sistemler, siber saldırılar için yeni zafiyet alanları oluşturmaktadır. Özellikle üretim hatlarında kullanılan akıllı cihazlar, yeterli güvenlik önlemi alınmadığında kritik sistemlere sızılmasına olanak tanımaktadır (Greenix, 2024). Akıllı üretim sistemlerine yönelik en ciddi siber risk faktörleri şu şekilde sıralanabilir:

- *Nesnelerin İnterneti (IoT) Güvenlik Açıkları:* Bağlantılı cihazların sayısının artması, saldırı yüzeyini genişletmekte ve zayıf şifreleme protokolleri nedeniyle cihazlar kolayca ele geçirilebilmektedir (Infosec, 2024).

- *Bulut Bilişimde Veri İhlalleri:* Bulut tabanlı sistemlerde depolanan hassas üretim verileri, yanlış yapılandırmalar veya yetkisiz erişimler nedeniyle sızıntıya uğrayabilmektedir.
- *Yapay Zekâ Tabanlı Saldırılar:* Kötü amaçlı yazılımlar, makine öğrenmesi modellerini manipüle ederek sistemlerin yanlış karar vermesine neden olabilmektedir (Michigan Technological University, 2025).
- *Operasyonel Teknoloji (OT) Sistemlerine Yönelik Tehditler:* Geleneksel IT güvenliğinden farklı olarak OT sistemleri, gerçek zamanlı çalıştığı için güvenlik güncellemelerinin uygulanması daha zordur (Endüstri 4.0 Siber, 2025).

Siber güvenlik çözümleri arasında; endüstriyel kontrol sistemlerine özel güvenlik protokollerinin geliştirilmesi, güvenli veri iletimi için şifreleme teknolojilerinin kullanılması, gerçek zamanlı tehdit algılama sistemlerinin entegrasyonu ve çalışanlara yönelik siber güvenlik eğitimlerinin verilmesi yer almaktadır (Greenix, 2024). Özellikle OT (Operational Technology) ve IT (Information Technology) altyapılarının entegrasyonu sırasında güvenlik önlemlerinin Kapsamlı ve çok boyutlu bir perspektifle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Endüstri 4.0'ın getirdiği riskleri azaltmak için birçok siber güvenlik stratejisi geliştirilmiştir. Bu stratejiler şu şekilde özetlenebilir:

- *Şifreleme ve Kimlik Doğrulama:* IoT cihazlarında güçlü şifreleme protokolleri (TLS, AES) ve çok faktörlü kimlik doğrulama (MFA) kullanımı, yetkisiz erişimi engellemede kritik rol oynamaktadır (Infosec, 2024).
- *Yapay Zekâ Destekli Güvenlik Sistemleri:* Anomali tespiti ve davranış analizi için makine öğrenmesi algoritmaları, olası saldırıları gerçek zamanlı tespit edebilmektedir (Greenix, 2024).
- *Sıfır Güven (Zero Trust) Mimarisi:* "Asla güvenme, her zaman doğrula" prensibiyle çalışan bu model, ağ içi ve dışı tüm erişimleri sürekli denetlemektedir (Michigan Technological University, 2025).
- *Operasyonel Teknoloji (OT) Güvenliği:* SCADA sistemleri için özel güvenlik duvarları ve izole ağ yapıları, kritik altyapıları korumada etkili olmaktadır (Endüstri 4.0 Siber, 2025).

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 sürecinde siber güvenlik, yalnızca bir teknik destek unsuru değil, stratejik bir yönetim aracı haline gelmiştir. Dijitalleşmenin getirdiği fırsatların

etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi, siber tehditlere karşı oluşturulacak güçlü savunma mekanizmaları ile mümkündür.

3.7. Simülasyon

Endüstri 4.0 devrimi, üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve daha esnek, verimli, sürdürülebilir yapılar haline dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Bu bağlamda, simülasyon teknolojileri, bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Simülasyon, üretim süreçlerinin, sistem davranışlarının veya karmaşık yapıların dijital ortamlarda modellenmesini ve analiz edilmesini sağlayarak hem karar destek sistemlerine katkı sunmakta hem de riskleri minimize etmeye yardımcı olmaktadır (Çelen, 2017).

Endüstri 4.0 kapsamında kullanılan simülasyonlar, fiziksel süreçlerin dijital ikizler (digital twin) aracılığıyla gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanır. Dijital ikizler, gerçek sistemlerin sanal yansımaları olarak işlev görür ve makine öğrenmesi, yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerle entegre şekilde çalışarak üretim hatalarının öngörülmesini sağlar (MTU Global Campus, 2024). Bu sayede, üretim süreçlerinde kesintisiz kalite kontrolü, bakım planlaması ve süreç iyileştirmeleri yapılabilir.

Benzetim (simülasyon) teknolojileri, akıllı üretim tesislerinde operasyonel verimliliği maksimize etmek ve kaynak dağılımını en uygun hale getirmek amacıyla kullanılan temel bir çözüm yöntemidir. Çelen (2017), simülasyonun üretim hatlarında prototip maliyetlerini düşürdüğünü ve ürün yaşam döngüsü yönetimini iyileştirdiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, dijital ikizler sayesinde fiziksel sistemlerin davranışları sanal ortamda test edilebilmekte, böylece gerçek dünyada oluşabilecek arızalar minimize edilebilmektedir (Tao ve diğer., 2018).

Endüstri 4.0'da simülasyonun sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- *Maliyet ve Zaman Tasarrufu:* Sanal test ortamları, fiziksel prototip üretimine gerek kalmadan tasarım iyileştirmelerine olanak tanır (Çelen, 2017).
- *Risk Yönetimi:* Olası sistem hataları simülasyonla öngörülerek önleyici bakım stratejileri geliştirilebilir (Kamble ve diğer., 2018).
- *Esnek Üretim:* Farklı senaryoların simüle edilmesiyle üretim hatları daha dinamik bir şekilde yönetilebilir.

Simülasyonların en yaygın kullanım alanları arasında üretim hatlarının optimize edilmesi, malzeme akışlarının modellenmesi, robotik sistemlerin test edilmesi, depo

yönetimi, tedarik zinciri senaryolarının değerlendirilmesi ve hatta iş gücü planlaması yer almaktadır. Özellikle "what-if" analizleriyle karar vericiler, olası senaryoları deneyimleyerek daha sağlıklı stratejik planlamalar yapabilmektedir (Çelen, 2017).

Günümüzde gelişmiş üretim tesislerinde, simülasyonlar sadece planlama aşamasında değil, üretim sürecinin her anında kullanılmaktadır. Bu dinamik yapı, simülasyonların statik birer analiz aracı olmasının ötesine geçtiğini ve artık Endüstri 4.0 vizyonunun aktif bir parçası haline geldiğini göstermektedir (Siemens, 2023). Özellikle artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) gibi teknolojilerle bütünleşen simülasyon çözümleri, çalışan eğitiminde ve operasyonel süreçlerde de etkin biçimde kullanılmaktadır.

Çelen (2017), çalışmasında simülasyonun sadece teknik bir araç değil, aynı zamanda stratejik bir karar destek sistemi olduğunu vurgulamaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte gelen yüksek veri hacmi, simülasyonların daha karmaşık sistemleri modelleyebilmesini mümkün kılarken, aynı zamanda daha hassas ve öngörücü analizlerin yapılabilmesini de sağlar. Böylece, kaynak kullanımında optimizasyon sağlanarak maliyetler düşürülürken verimlilik artırılabilir.

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 çerçevesinde simülasyon teknolojileri, sanayi işletmelerinin dijital dönüşümünü destekleyen kritik bir araç olarak değerlendirilmelidir. Simülasyonlar sayesinde sistem performansı artırılabilir, sürdürülebilirlik hedefleri desteklenebilir ve belirsizlikler daha iyi yönetilebilir hale gelir. Bu yönüyle simülasyon, yalnızca dijital üretim süreçlerinin değil, aynı zamanda dijital karar mekanizmalarının da temel bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

3.8. Yazılım Entegrasyonları (Yatay ve Dikey Entegrasyon)

Endüstri 4.0 devrimiyle birlikte üretim süreçlerinde sadece otomasyon değil, aynı zamanda tüm sistemlerin birbiriyle uyum içinde çalıştığı entegre dijital ağlar oluşturulması büyük önem kazanmıştır. Bu dönüşümde yazılım entegrasyonu hem yatay hem de dikey düzlemde gerçekleşerek, işletmelerin dijitalleşme seviyesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biri hâline gelmiştir (Mercan, 2024).

Sistem entegrasyonu, üretim zincirindeki farklı bilgi sistemlerinin ortak bir dijital altyapıda birleştirilmesini ifade eder. Bu yapı sayesinde veri, süreç ve donanım bileşenleri arasında kesintisiz bir iletişim kurulması sağlanır. Böylece operasyonel verimlilik, esneklik ve otomasyonun bütüncül bir yaklaşımla gerçekleştirilmesi mümkün olur (Mercan, 2024).

Endüstri 4.0 çerçevesinde bu entegrasyon; fiziksel üretim sistemleriyle bilgi teknolojileri arasındaki sınırları kaldırarak akıllı fabrikaların temelini oluşturur.

3.8.1. Yatay Entegrasyon

Yatay entegrasyon, bir işletmenin kendi içindeki tüm bölümleri ile tedarikçileri, iş ortakları ve müşterileri arasında dijital bir iş birliği ağı kurmasıdır. Bu yapı, tedarik zincirinden dağıtıma kadar olan tüm üretim evrelerinin birbirine entegre biçimde çalışmasını sağlar. Süreçler arası veri alışverişi sayesinde, operasyonlar daha şeffaf, hızlı ve esnek hâle gelir (Soylu, 2018).

Yatay entegrasyon aynı zamanda farklı işletmelerin üretim planlama ve yürütme süreçleri arasında anlık bilgi paylaşımı sağlayarak senkronize üretime olanak tanır. Bu durum, özellikle küresel tedarik zincirlerinde karar alma süresini kısaltmakta ve maliyet avantajı yaratmaktadır (Virtocommerce, 2023). Ayrıca üretim katmanında yer alan makineler, sensörler ve operatör arayüzleri; ortak bir yazılım platformu üzerinden iletişim kurarak otonom kararlar alabilir hâle gelir (Mercan, 2024).

Yatay entegrasyonun temel avantajları şunlardır:

- *Tedarik zinciri şeffaflığı:* Anlık envanter takibi ve talep tahmini yapabilmek (AB Market Otomasyon, 2024).
- *Dinamik üretim planlaması:* Müşteri taleplerine hızlı yanıt verebilmek (Endüstri40-1, 2023).
- *Kaynak optimizasyonu:* Üretim kaynaklarının etkin kullanımıdır (Sarı, 2020).

Özellikle otomotiv sektöründe, tedarikçilerle kurulan yatay entegrasyon sayesinde üretim hattındaki değişikliklere anında uyum sağlanabilmekte ve stok maliyetleri %30'a varan oranlarda azaltılabilmektedir (Kagermann ve diğer., 2013).

3.8.2. Dikey Entegrasyon

Dikey entegrasyon, işletme içerisindeki tüm yazılım ve donanım sistemlerinin üretim hattından yönetim kademesine kadar dikey bir şekilde birbirine entegre edilmesini kapsamaktadır. Bu tür bir yapı, üretimdeki fiziksel ekipmanlardan elde edilen verilerin, kurumsal kaynak planlama (ERP), üretim yönetim sistemleri (MES) ve karar destek sistemlerine gerçek zamanlı olarak iletilmesine olanak tanır (Endustri40-1, 2023).

Dikey entegrasyon, karar alma süreçlerinde veri odaklılığı artırarak stratejik ve taktiksel yönetim kararlarını daha etkili kılar. Örneğin bir sensörden gelen sıcaklık verisi, üretim kalitesine etki edecekse, sistem bunu analiz ederek ilgili yöneticilere ya da otomasyon sistemine müdahale yetkisi verebilir. Bu sayede üretim hataları minimize edilirken verimlilik artışı sağlanır (Akıllı Fabrika, 2024).

Dikey entegrasyonun sağladığı temel faydalar:

- *Anlık karar destek sistemleri:* Üretim verilerinin yönetim katmanlarına hızla ulaşmasıdır (Akıllı Fabrika, 2024)
- *Önleyici bakım:* Ekipman performans verilerinin analiz edilmesidir (Hermann ve diğer., 2016).
- *Operasyonel verimlilik:* Üretim hattı optimizasyonlarıdır (Virtocommerce, 2023).

Dikey entegrasyonun başarılı bir uygulama örneği olarak Siemens'in Digital Enterprise çözümü gösterilebilir. Bu sistem, fabrika katındaki sensör verilerinin ERP sistemleriyle entegrasyonunu sağlayarak üretim verimliliğinde %40'lık artışlar sağlamıştır (Siemens, 2021).

Yatay ve dikey entegrasyonun birlikte kullanımı, işletmelerin sadece dijitalleşmesini değil, aynı zamanda çevik ve sürdürülebilir üretim stratejilerine geçmesini de mümkün kılar. Bu bütüncül yaklaşım; özelleştirilmiş üretim, kaynakların daha etkin kullanımı ve değişen piyasa koşullarına anında uyum sağlama gibi avantajlar sunar (Asar ve Esen, 2021).

Ayrıca bu entegrasyon yapısı, kurum içi bilgi akışını optimize ederken, dış paydaşlarla da etkin veri paylaşımına olanak tanır. Böylece işletmeler, yenilikçi çözümler geliştirebilir, pazarda rekabet gücünü artırabilir ve müşteri odaklı hizmet sunabilir hâle gelir (AB Market Otomasyon, 2024).

3.9. Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) kavramı, ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından ortaya atılmış ve bir şirket sunumunda kullanılmıştır. Ashton, bu sunumunda, tedarik zinciri yönetimi süreçlerinde Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisinin kullanımının sağlayacağı operasyonel faydalara dikkat çekmiştir (Tonga ve Tonga, 2022). IoT kavramı, nesnelerin, verilerin ve insanların dijital ağlar aracılığıyla

birbirine bağlandığı, bu bağın da genellikle RFID altyapısı üzerine inşa edildiği akıllı sistemler olarak tanımlanmaktadır.

Bu bağlamda "nesne" terimi; çevresindeki olayları algılayabilen, bu algılar doğrultusunda diğer nesnelerle veya ağlarla etkileşim kurabilen, veri paylaşımı gerçekleştirebilen ve belirli görevleri insan müdahalesine gerek duymadan yerine getirebilen fiziksel varlıkları ifade etmektedir. Dolayısıyla, Nesnelerin İnterneti; fiziksel nesnelerin birbirleriyle veya merkezi sistemlerle haberleşmesini mümkün kılan bir iletişim ağı yapısı olarak değerlendirilmektedir (Tonga ve Tonga, 2022).

Farklı bir tanımda ise IoT, donanımsal özelliklere sahip olan cihazların internet protokolleri vasıtasıyla birbiriyle iletişim kurarak, uzaktan erişim ve kontrol imkânı sağlamasını ifade eder. Bu bağlamda IoT sistemleri; sensörler, yazılımlar ve iletişim altyapılarından oluşan, küçük ev eşyalarından akıllı şehir çözümlerine kadar uzanan çok geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Tonga ve Tonga, 2022).

Günümüzde birçok endüstriyel kuruluş, operasyonel verimliliği artırmak, müşteri ihtiyaçlarını daha iyi analiz edebilmek ve karar destek sistemlerini geliştirmek adına IoT teknolojilerinden yararlanmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde kurumlar, sadece üretim süreçlerini değil, aynı zamanda servis ve bakım hizmetlerini de dijitalleştirerek rekabet güçlerini artırma olanağı bulmaktadır.

IoT'nin günlük yaşamda en sık karşılaşılan örneklerinden biri, giyilebilir teknolojilerdir. Örneğin; akıllı saatler kullanıcıların attığı adımlar, kat edilen mesafe, kalp atış hızı gibi biyometrik verileri sensörler aracılığıyla toplar ve bu verileri mobil cihazlarla paylaşarak kullanıcılara sağlıklarına ilişkin analizler sunar. Bu cihazlar arasında gerçekleşen veri paylaşımı, IoT teknolojisinin temelini oluşturan özelliklerden biridir.

İnternete bağlı cihaz sayısının günümüzde 10 ila 11 milyar arasında olduğu tahmin edilmektedir. Cihaz sayısındaki bu hızlı artış, beraberinde büyük miktarda veri üretimini de getirmekte ve bu verilerin işlenmesi, analiz edilmesi ve güvenli biçimde saklanması giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle, büyük veri (big data) analitiği ile siber güvenlik uygulamaları, IoT altyapılarının vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır (Tonga ve Tonga, 2022).

4. KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİ

Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), Dünya Fikri Mülkiyet Örgütü (WIPO), Cornell Üniversitesi ve INSEAD iş birliğiyle her yıl yayınlanan kapsamlı bir rapordur. İlk kez 2007 yılında yayınlanan KİE, ülkelerin inovasyon performanslarını ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla geliştirilmiştir (Dutta ve diğer., 2022). Endeks, inovasyonun ulusal refah artışı ve sürdürülebilir büyüme üzerindeki kritik rolünü vurgulayarak, politika yapıcılar, iş liderleri ve araştırmacılar için önemli bir referans kaynağı haline gelmiştir.

KİE, ülkelerin inovasyon performanslarını değerlendirirken hem inovasyon girdilerini hem de inovasyon çıktılarını dikkate alır. Bu çift yönlü yaklaşım, inovasyon sürecinin bütüncül bir şekilde anlaşılmasını sağlar (Cornell University ve diğer, 2023). Endeks, 80'den fazla göstergeyi kullanarak ülkelerin inovasyon ekosistemlerini analiz eder ve bu göstergeler, kurumlar, insan sermayesi ve araştırma, altyapı, pazar gelişmişliği, iş gelişmişliği, bilgi ve teknoloji çıktıları ile yaratıcı çıktılar gibi temel bileşenlere ayrılır.

4.1. Küresel İnovasyon Endeksi Yapısı ve Bileşenleri

Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), ülkelerin inovasyon performanslarını ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla geliştirilmiş kapsamlı bir araçtır. Endeks, iki ana bileşenden oluşur: İnovasyon Girdi Alt Endeksi ve İnovasyon Çıktı Alt Endeksi. Bu bileşenler, beşer alt bileşenle desteklenmekte ve her bir alt bileşen, çeşitli göstergelerle ölçülmektedir (Dutta ve diğer., 2022). Aşağıda, bu bileşenler ve alt bileşenler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

4.1.1. İnovasyon Girdi Alt Endeksi

İnovasyon Girdi Alt Endeksi, bir ülkenin inovasyon kapasitesini destekleyen faktörleri ölçer. Bu alt endeks, beş ana bileşenden oluşur:

a. *Kurumlar:* Bu bileşen, bir ülkenin politik, hukuki ve iş ortamının inovasyon üzerindeki etkisini değerlendirir. Göstergeleri şunlardır:
   i. Politik İstikrar: Ülkedeki siyasi istikrar düzeyini içerir.

ii. Hukukun Üstünlüğü: Hukuk sisteminin etkinliği ve adalet dağıtımını içerir.
iii. Düzenleyici Kalite: İş yapma kolaylığı ve düzenlemelerin kalitesini içerir.
iv. Yolsuzluk Kontrolü: Yolsuzlukla mücadele mekanizmalarının etkinliğini içerir.

b. *İnsan Sermayesi ve Araştırma:* Bu bileşen, bir ülkenin insan kaynaklarının ve araştırma kapasitesinin inovasyon üzerindeki etkisini ölçer. Göstergeleri şunlardır:
i. Eğitim Harcamaları: GSYİH'nin yüzdesi olarak eğitim harcamalarıdır.
ii. Okullaşma Oranları: İlköğretim, ortaöğretim ve yükseköğretimde okullaşma oranlarıdır.
iii. AR-GE Harcamaları: GSYİH'nin yüzdesi olarak AR-GE harcamalarıdır.
iv. Araştırmacı Sayısı: Her bir milyon kişi başına düşen araştırmacı sayısıdır.

c. *Altyapı:* Altyapı bileşeni, bir ülkenin fiziksel ve dijital altyapısının inovasyon üzerindeki etkisini değerlendirir. Göstergeleri şunlardır:
i. Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT): İnternet penetrasyonu, mobil abonelik oranları ve dijital altyapı kalitesidir.
ii. Enerji Altyapısı: Elektrik üretimi ve yenilenebilir enerji kullanımıdır.
iii. Lojistik Performansı: Lojistik altyapısının kalitesi ve etkinliğidir.

d. *Pazar Gelişmişliği:* Bu bileşen, bir ülkenin pazar yapısının inovasyon üzerindeki etkisini ölçer. Göstergeleri şunlardır:
i. Ticaret ve Rekabet: İhracat ve ithalatın GSYİH'ye oranı, piyasa rekabet düzeyidir.
ii. Piyasa Büyüklüğü: GSYİH ve kişi başına düşen gelir düzeyidir.
iii. Yatırım Ortamı: Doğrudan yabancı yatırımlar (FDI) ve sermaye piyasalarının gelişmişliğidir.

e. *İş Gelişmişliği:* İş gelişmişliği bileşeni, bir ülkenin iş ortamının inovasyon üzerindeki etkisini değerlendirir. Göstergeleri şunlardır:
i. İş Ortamı: İş kurma kolaylığı ve iş yapma maliyetlerini içerir.
ii. Bilgi Emilimi: Yabancı teknoloji transferi ve yerel kapasite geliştirmeyi içerir.
iii. İnovasyon Bağlantıları: Üniversite-sanayi iş birlikleri ve kümeleşme etkisidir.

4.1.2. İnovasyon Çıktı Alt Endeksi

İnovasyon Çıktı Alt Endeksi, bir ülkenin inovasyon faaliyetlerinin sonuçlarını ölçer. Bu alt endeks, iki ana bileşenden oluşur:

a. Bilgi ve Teknoloji Çıktıları: Bu bileşen, bir ülkenin bilimsel ve teknolojik üretim kapasitesini ölçer. Göstergeleri şunlardır:

i. Patent Başvuruları: Ulusal ve uluslararası patent başvuru sayılarıdır.

ii. Bilimsel Yayınlar: Bilimsel dergilerde yayınlanan makale sayısıdır.

iii. Yüksek Teknoloji Üretimi: Yüksek teknoloji ürünlerinin toplam üretim içindeki payını gösterir.

iv. Yazılım Harcamaları: Bilgisayar yazılımlarına yapılan yatırımlardır.

b. Yaratıcı Çıktılar: Yaratıcı çıktılar bileşeni, bir ülkenin kültürel ve yaratıcı endüstrilerinin inovasyon üzerindeki etkisini değerlendirir. Göstergeleri şunlardır:

i. Marka Değeri: Küresel marka değeri endeksindeki sıralamasını gösterir.

ii. Kültürel ve Yaratıcı Endüstriler: Film, müzik, tasarım ve diğer yaratıcı endüstrilerin ekonomik katkısını gösterir.

iii. Yaratıcı İhracat: Yaratıcı ürünlerin ihracatındaki performansını gösterir.

4.2. KİE'nin Metodolojisi ve Ağırlıklandırma

KİE, her bir göstergeyi 0 ile 100 arasında bir ölçekte normalize eder ve ağırlıklandırır. Ağırlıklar, her bir bileşenin inovasyon sürecindeki göreceli önemini yansıtır. Örneğin, İnsan Sermayesi ve Araştırma bileşeni, inovasyon girdilerinin yaklaşık %25'ini oluştururken, Bilgi ve Teknoloji Çıktıları bileşeni, inovasyon çıktılarının %50'sini oluşturur (Cornell University ve diğer., 2023).

KİE'nin metodolojisi, her yıl güncellenerek inovasyon ekosistemlerindeki değişimleri yakalamayı hedefler. Örneğin, son yıllarda dijitalleşme, yapay zekâ ve sürdürülebilirlik gibi konular, endeksin kapsamına dahil edilmiştir (Dutta ve diğer., 2022).

4.3. KİE'nin Küresel ve Bölgesel Analizleri

KİE, ülkelerin inovasyon performanslarını küresel ve bölgesel düzeyde karşılaştırmak için kullanılır. Endeks, ülkeleri gelir gruplarına (düşük, orta, yüksek) ve coğrafi bölgelere göre sınıflandırarak, inovasyon performansındaki eşitsizlikleri ve fırsatları ortaya koyar (Dutta ve diğer., 2022). Örneğin, 2023 yılı raporunda, İsviçre, İsveç ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkeler, inovasyon performansı açısından en üst sıralarda yer alırken, Afrika ve Güney Asya ülkeleri genellikle daha alt sıralarda yer almaktadır.

KİE ayrıca, ülkelerin gelişim düzeylerine uygun inovasyon performanslarını değerlendirir. Bu analiz, ülkelerin mevcut ekonomik koşullarına göre inovasyon kapasitelerini ölçerek, politika yapıcılar için yol gösterici olmayı amaçlar (WIPO, 2023).

4.4. KİE'nin Politika ve Stratejiye Katkıları

KİE, politika yapıcılar ve iş liderleri için inovasyon stratejileri geliştirmede önemli bir araçtır. Endeks, ülkelerin inovasyon ekosistemlerindeki güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak, politika reformları ve yatırım kararları için rehberlik sağlar (Cornell University ve diğer., 2023). Örneğin, bir ülkenin AR-GE harcamalarının düşük olması, bu alanda teşviklerin artırılması gerektiğini gösterebilir.

Ayrıca, KİE, inovasyonun sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile olan bağlantısını vurgular. Endeks, özellikle eğitim, sağlık, enerji ve altyapı gibi alanlarda inovasyonun kritik rolünü ortaya koymaktadır (Dutta ve diğer., 2022).

Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), ülkelerin inovasyon performanslarını ölçmek ve karşılaştırmak için kapsamlı ve güvenilir bir araçtır. Endeks, inovasyonun ekonomik kalkınma ve sürdürülebilir büyüme üzerindeki etkisini vurgulayarak, politika yapıcılar ve iş liderleri için stratejik bir rehber görevi görmektedir. KİE'nin yapısı ve bileşenleri, inovasyon ekosistemlerinin bütüncül bir şekilde anlaşılmasını sağlar ve ileride yapılacak bilimsel çalışmalar için temel bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

5.1. Çok Kriterli Karar Verme

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, karmaşık karar problemlerinin çözümünde kullanılan sistematik ve analitik yaklaşımlardır. Bu yöntemler, birbiriyle çelişebilen birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesine olanak tanıyarak optimal çözümün belirlenmesini sağlar. Günümüzün dinamik ve rekabetçi iş ortamlarında, stratejik karar alma süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

ÇKKV tekniklerinde, öncelikle karar problemini oluşturan kriterler ve alternatifler tanımlanır. Ardından, her bir alternatifin kriterler bazındaki performansı nicel ve nitel ölçütlerle değerlendirilir. Bu değerlendirme, alternatiflerin göreceli üstünlüklerinin ve zayıf yönlerinin objektif bir şekilde ortaya konulmasını mümkün kılar. Ayrıca, karar sürecinin sağlamlığını (robustness) test etmek için duyarlılık analizleri yapılır ve tutarlılık kontrolü gerçekleştirilir. Böylece, belirsizliklerin ve öznelliklerin etkisi minimize edilerek daha güvenilir sonuçlara ulaşılır (Durak, 2024).

5.2. Çalışmada Kullanılan Yöntemler

5.2.1. CRITIC Metodu

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi, Diakoulaki ve ark. (1995) tarafından geliştirilen objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden biridir. Temel olarak kriterlerin içsel istatistiksel özelliklerini analiz ederek ağırlık belirler. Bu yöntem özellikle kriterler arasındaki ilişkilerin önemli olduğu durumlarda tercih edilmektedir.

CRITIC yöntemi, beş temel adımdan oluşur ve bu yönteme ilişkin aşamalar aşağıda sıralanmıştır (Eşiyok, 2022):

1) Adım: Başlangıç karar matrisini oluşturulması:

Bu adım, diğer tüm ÇKKV yöntemlerindeki ilk adımı temsil eder. Bu adımda, alternatifler belirlenen kriterler kullanılarak değerlendirilir ve bir başlangıç karar matrisi Eşitlik (1)'de belirtildiği üzere oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m*n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \; iken \; j = 1, \dots \; , n \tag{1}$$

burada 'i' alternatifleri, 'j' ise kriterleri belirtmektedir.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Kriterlerin ortak ölçekte değerlendirilebilmesi için karar matrisi normalizasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Bu normalizasyon süreci; fayda kriterlerinde (maksimizasyon) Eşitlik (2)'nin, maliyet kriterlerinde (minimizasyon) ise Eşitlik (3)'ün uygulanmasıyla yürütülmektedir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} \; - \; x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad i = 1, \dots\dots, m \; iken \; j = 1, \dots\dots, n \tag{2}$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{max} \; - \; x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad i = 1, \dots\dots, m \; iken \; j = 1, \dots\dots, n \tag{3}$$

3) Adım: İlişki katsayı matrisini oluşturulması:

Normalize edilmiş kriterler arasındaki ilişki düzeyinin belirlenmesi amacıyla, önceki aşamada elde edilen normalizasyon sonuçları kullanılarak korelasyon katsayıları (ρ_{jk}) Eşitlik (4)'te erilen matematiksel model aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (x_{ij} - \overline{x}_j)(x_{ik} - \overline{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (x_{ij} - \overline{x}_j)^2 \; \sum_{i=1}^{m} (x_{ik} - \overline{x}_j)^2}} \tag{4}$$

4) Adım: C_{ij}değerlerinin hesaplanması:

Her bir değerlendirme kriterleri için yer alan karşıtlık yoğunluğu ve paradokslardan elde edilen bilgi miktarı (C_{ij}) hesaplanmaktadır. Bu iki parametrenin entegrasyonu ve toplam bilginin elde edilmesi sürecinde Eşitlik (5) kullanılmakta olup söz konusu eşitlikte yer alan standart sapma (σ_j) değeri ise Eşitlik (6) aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$C_{ij} = \sigma_j \sum_{k=1}^{n} (1 - \rho_{jk}) \quad j = 1, \dots, n \tag{5}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij} - \overline{r}_j)^2}{m-1}} \quad (6)$$

5) Adım: Kriter ağırlıklarının hesaplanması:

Metodolojinin final adımında Eşitlik (7)'de öngörülen şekilde, her kriterin bilgi değerinin (C_{ij}), sistemdeki toplam bilgiye normalize edilmesi sonucu ağırlık katsayıları (w_j) hesaplanmaktadır.

$$w_j = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} C_{ij}} \quad j = 1, \ldots\ldots, n \quad (7)$$

Bu formülden elde edilen en yüksek w_i ağırlık değerine sahip olan kriterin diğerlerine göre öncelikli kriter olduğu sonucuna varılır.

5.2.2. Entropi Metodu

Entropi kavramı, ilk olarak fizikçi Rudolph Clausius tarafından 1865 yılında ortaya konulmuş ve bir sistemdeki düzensizliğin veya belirsizliğin ölçüsü olarak tanımlanmıştır (Zhang ve diğer., 2011). Bu kavram, daha sonra Shannon (1948) tarafından bilgi kuramına uyarlanmış ve özellikle haberleşme sistemlerinde bilgi miktarını ve belirsizliği ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Günümüzde Entropi, fizik ve matematikten mühendislik ve bilgi sistemlerine kadar birçok bilim dalında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri arasında yer alan Entropi Yöntemi, karar sürecinde yer alan kriterlerin nesnel ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan istatistik temelli bir tekniktir. Bu yöntemde, kriterlerin karar sürecine katkısı, içerdiği bilgi miktarına bağlı olarak değerlendirilir. Yani, bir kriterin farklı alternatifler üzerindeki değerleri ne kadar çeşitlilik gösteriyorsa, bu kriterin karar sürecine sağladığı bilgi ve ayırt edicilik o derece fazla olur (Wu, 2011). Bu doğrultuda, söz konusu kriter daha yüksek bir ağırlıkla değerlendirilir.

Entropi yöntemi, karar verici yargısından bağımsız çalıştığı için tamamen objektif bir değerlendirme yaklaşımı sunar. Bu yönüyle, öznel değerlendirmelerin azaltılmasının hedeflendiği karar problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Karami ve Johansson, 2014; Wang ve Lee, 2009). Ayrıca Entropi yöntemi, farklı ölçek ve düzeylerdeki verilerle

çalışabilme yeteneği sayesinde, şehircilik ve mimarlık gibi alanlarda da yapı formlarının değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir (Bostancı ve Ocakçı, 2009).

Entropi yöntemi genel olarak aşağıdaki beş temel adımdan oluşmaktadır (Gök-Kısa, Perçin, 2018):

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Karar vericiler tarafından belirlenen alternatifler ve kriterler doğrultusunda m*n boyutlarında Eşitlik (8)'de gösterildiği şekliye bir karar matrisi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m*n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \; iken \; j = 1, \dots \; , n \tag{8}$$

2) Adım: Normalizasyon işlemi:

Her bir kriterin farklı bir ölçekte değerlendirilebileceği göz önüne alındığında, karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla karar matrisi normalize edilir. Normalize değerler Eşitlik (9)'daki formül ile elde edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}} \tag{9}$$

3) Adım: Entropi değerinin hesaplanması:

Her bir kriter için Entropi değeri e_j Eşitlik (10) ile gösterilen formül ile hesaplanır.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^{m} r_{ij} \ln (r_{ij}) \, , burada \; k = \frac{1}{\ln(m)} \tag{10}$$

4) Adım: Ayırt edicilik derecesinin hesaplanması

Her bir kriterin taşıdığı bilgi miktarı (belirsizlikten sapma) Eşitlik (11) formülü ile bulunur.

$$d_j = 1 - e_j \tag{11}$$

burada d_j, j. kriterin bilgi faydasını ifade eder.

5) Adım: Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Son adımda, her bir kriterin ağırlığı w_jEşitlik (12)'deki formül ile elde edilir.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} dj} \tag{12}$$

Böylece, bilgi içeriği yüksek olan kriterlerin daha yüksek ağırlıklara sahip olması sağlanır.

5.2.3. RAWEC Metodu

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, karar vericilerin birden fazla ve genellikle çelişkili kriter altında en uygun seçeneği belirlemelerine yardımcı olan analitik araçlardır. Bu yöntemler, özellikle karmaşık sistemlerin değerlendirilmesinde ve alternatiflerin sıralanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda geliştirilen ve literatürde yenilikçi bir yaklaşım olarak kabul edilen RAWEC (Ranking Alternatives by a Weighting-Adjusted and Enhanced Criterion) yöntemi, alternatiflerin ağırlıklandırılmış kriterlere göre sıralanmasını esas alır (Yılmaz ve Kabak, 2020).

RAWEC yöntemi hem objektif hem de sübjektif ağırlıkların etkisini dengeleyen, karar matrisindeki verilerin normalizasyonuna dayalı olarak alternatiflerin nihai puanlarını belirleyen bir sıralama tekniğidir. Yöntem, karar vericilere esneklik sağlarken aynı zamanda kriterlerin ağırlıklarının etkisini daha duyarlı bir biçimde yansıtır. Özellikle endüstri 4.0, sürdürülebilirlik, inovasyon ve dijital dönüşüm gibi çok boyutlu karar alanlarında RAWEC'in uygulanabilirliği öne çıkmaktadır (Doğan ve Şengül, 2023).

RAWEC yöntemi alternatifleri sıralamak için dört basit adım kullanır (Puška ve diğer., 2024):

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması

Bu adımda, alternatifler belirlenen kriterler kullanılarak değerlendirilir ve bir başlangıç karar matrisi Eşitlik (13)'de belirtildiği gibi oluşturulur.

$$X = \begin{matrix} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_\mathrm{m} \end{matrix} \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & . & C_\mathrm{n} \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1\mathrm{n}} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2\mathrm{n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{\mathrm{m}1} & x_{\mathrm{m}2} & \cdots & x_{\mathrm{mn}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

2) Adım: Karar matrisinin normalizasyonu:

Başlangıç karar matrisini normalleştirirken, aşağıdaki ifadeler kullanılarak çift normalizasyon kullanılır.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\,max}}\,, ve\; n'_{ij} = \frac{x_{j\,min}}{x_{ij}} \qquad fayda\; kriterleri\; için\; ve \tag{14}$$

$n'_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\,max}}$, $ve\ n_{ij} = \frac{x_{j\,min}}{x_{ij}}$ $\qquad\qquad$ $maliyet\ kriterleri\ için.$ (15)

Burada "$x_{j\,min}$" belirli kriterlere göre alternatiflerin minimum değerini, "$x_{j\,max}$" ise belirli kriterlere göre alternatiflerin maksimum değerini temsil eder.

Çift normalizasyon kullanılarak, başlangıç karar matrisi iki şekilde normalleştirilir.

İlk normalizasyonu (n_{ij}) uygulayarak, tüm kriterler fayda kriterine dönüştürülür; burada, bireysel kriterler için en yüksek değerler maksimum değeri, yani bir (1) değerini alır.

İkinci normalizasyonu (n'_{ij}) uygulayarak, tüm kriterler maliyet kriterine dönüştürülür.

Bu normalizasyonla, belirli kriterler için alternatiflerin en düşük değerleri maksimum değeri, yani bir (1) değerini alır.

3) Adım: Kriter ağırlığından sapmanın hesaplanması:

Normalize edilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılması ve kriterlerin ağırlığından sapmanın hesaplanması bu adımda birleştirilir. Bu, Eşitlik (16) ve Eşitlik (17) kullanılarak gerçekleştirilir.

$v_{ij} = \sum_{i=1}^{n} w_j \cdot (1 - n_{ij})$ (16)

$v'_{ij} = \sum_{i=1}^{n} w_j \cdot \left(1 - n'_{ij}\right)$ (17)

burada "w_j" kriter ağırlığını temsil eder.

Bu adım, normalize edilmiş verilerin 1 sayısıyla temsil edilen maksimum değerlerden sapmalarını hesaplayarak başlar. Sonra, sapmayı kriter ağırlığıyla çarparak kriter ağırlığından toplam sapmanın hesaplanması gerçekleştirilir. İlk değer (v_{ij}) için sapmanın olabildiğince küçük, ikinci değer (v'_{ij}) için sapmanın olabildiğince büyük olması istenir. Bu sapmalara dayanarak, alternatiflerin nihai değeri hesaplanır.

4) Adım: RAWEC yönteminin değerinin hesaplanması. Bu, Eşitlik (18)'deki ifadeye göre hesaplanır:

$$Q_i = \frac{v'_{ij} - v_{ij}}{v'_{ij} + v_{ij}} \qquad (18)$$

RAWEC yöntemi -1 ile 1 arasında değişebilen bir değer alır. Bir alternatifin üstünlüğü, yöntemin o alternatife ilişkin değerinin ne kadar yüksek olduğuna göre belirlenir. En yüksek değere sahip alternatif, ideal seçimi temsil eder.

Elde edilen puanlara göre alternatifler en yüksekten en düşüğe doğru sıralanır. Bu sıralama, karar vericilere hangi alternatifin daha uygun olduğunu gösterir.

RAWEC yöntemi, karar vericilere hem matematiksel sağlamlık hem de uygulama kolaylığı sağlar. Ayrıca, diğer sıralama yöntemlerine kıyasla kriter ağırlıklarının etkisini daha doğru biçimde yansıtması bakımından avantajlıdır (Kaya ve Gündoğdu, 2022).

5.2.4. EDAS Metodu

EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) yöntemi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerinin çözümünde kullanılan yenilikçi ve etkili bir değerlendirme tekniğidir. Yöntemin temel prensibi, her bir alternatifin performansını ortalama çözüme olan uzaklığına göre değerlendirmek üzerine kuruludur. Bu yaklaşım sayesinde ideal ve anti-ideal çözümlerin belirlenmesine gerek duyulmadan alternatifler objektif bir biçimde analiz edilebilmektedir (Keshavarz Ghorabaee ve diğer., 2015).

EDAS yöntemi kapsamında, her alternatifin değerlendirilmesinde iki temel ölçüt dikkate alınmaktadır: Pozitif Uzaklık Ölçütü (PDA – Positive Distance from Average) ve Negatif Uzaklık Ölçütü (NDA – Negative Distance from Average). PDA değeri, bir alternatifin ortalama performansın üzerinde olduğu durumları ifade ederken; NDA değeri, ortalamanın altında kalan performans düzeylerini göstermektedir. Karar vericiler, daha yüksek PDA ve daha düşük NDA değerlerine sahip alternatifleri daha uygun çözümler olarak değerlendirmektedir. Bu yönüyle EDAS yöntemi, çelişkili kriterlerin bulunduğu durumlarda dengeli ve uygulanabilir kararlar alınmasına olanak tanır.

EDAS yöntemi; karar matrisinin oluşturulması, kriter değerlerinin normalize edilmesi, pozitif ve negatif uzaklıkların hesaplanması, bu uzaklıkların kriter ağırlıklarıyla çarpılarak toplam puanların elde edilmesi ve sonuçların sıralanması gibi aşamaları içerir. Bu sistematik yapı, yöntemin hem uygulama kolaylığını artırmakta hem de farklı alanlarda güvenilir bir karar destek aracı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Keshavarz Ghorabaee ve diğer., 2015).

EDAS yöntemi, yedi temel adımdan oluşur ve bu yönteme ilişkin aşamalar aşağıda sıralanmıştır (Bektaş, 2022; Keshavarz Ghorabaee ve diğer., 2015):

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Bu adımda, alternatifler belirlenen kriterler kullanılarak değerlendirilir ve bir başlangıç karar matrisi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{nmx} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

burada x_{ij}", "$j.$" kriterinde "$i.$" alternatifinin performans değerini gösterir.

2) Adım: Tüm kriterler için ortalama çözümün belirlenmesi:

Eşitlik (20) ve (21)'deki işlemler aracılığıyla, tüm kriterler temel alınarak ortalama çözüm değeri elde edilmektedir.

$$AV_j = [AV_j]_{1xm,} \quad (20)$$

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}}{n} \quad (21)$$

3) Adım: Ortalamadan pozitif uzaklığı (PDA) ve ortalama matrislerden negatif uzaklığı (NDA) ölçüt türüne (fayda ve maliyet) göre hesaplanması:

Kriterin türüne bağlı olarak, ortalama değerden pozitif ve negatif sapmalar hesaplanmaktadır.

$$PDA_{ij} = [PDA_{ij}]_{nmx,} \quad (22)$$

$$NDA_{ij} = [NDA_{ij}]_{nmx,} \quad (23)$$

Eğer j. fayda kriteri ise,

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (24)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max\left(0, (AV_j - X_{ij})\right)}{AV_j} \quad (25)$$

ve eğer j. maliyet kriteri ise,

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (26)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (27)$$

Burada PDA_{ij} ve NDA_{ij}, sırasıyla $j.$ kriter açısından $i.$ alternatifin ortalama çözümden pozitif ve negatif uzaklığını gösterir.

4) Adım: Tüm alternatifler için PDA ve NDA'nın ağırlıklı toplamlarının belirlenmesi:

$$SP_i = \sum_{j=1}^{m} W_j PAD_{ij} \quad (28)$$

$$NP_i = \sum_{j=1}^{m} W_j NAD_{ij} \quad (29)$$

burada W_j, j. kriterinin ağırlığıdır.

5) Adım: Tüm alternatifler için SP ve SN değerlerini normalleştirilmesi:

SP_i ve NP_i değerleri, Eşitlik (30) ve (31) esas alınarak tüm kriterler için normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{max_i(SP_i)} \quad (30)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{NP_i}{max_i(NP_i)} \quad (31)$$

6) Adım: Tüm alternatifler için değerlendirme puanının (AS) hesaplanması:

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (32)$$

Burada $0 \leq AS_i \leq 1$.

7) Adım: Alternatifleri değerlendirme puanının (AS) azalan değerlerine göre sıralanması. En yüksek AS'ye sahip alternatif, aday alternatiflerin arasında en iyi seçimdir.

5.2.5. MAUT Metodu

Çok Nitelikli Fayda Teorisi (Multi-Attribute Utility Theory - MAUT), ilk olarak 1960'lı yılların sonlarında Fishburn tarafından ortaya atılmış ve Keeney (1974) tarafından teorik çerçevesi genişletilerek uygulama alanı bulmuştur. Yöntem, alternatiflerin çok boyutlu karar uzayında nicel ve nitel ölçütler bazında değerlendirilmesine olanak tanıyan sistematik bir yaklaşım sunmaktadır (Turan, 2015). MAUT'un temel amacı, karar vericilere objektif ve tutarlı bir değerlendirme mekanizması sağlamaktır.

Loken (2007) tarafından yapılan çalışmalarla metodolojik açıdan geliştirilen bu yöntem, özellikle karmaşık karar problemlerinde alternatiflerin performansını ölçmek için matematiksel bir temel oluşturur. MAUT'un temel varsayımı, karar probleminin çözümünde

en yüksek faydayı sağlayacak olan U fayda fonksiyonunu maksimize etmektir. Bu bağlamda yöntem, karar sürecindeki belirsizlikleri minimize ederek tutarlı ve rasyonel sonuçlar üretmeyi hedefler (Konuşkan ve Uygun, 2014).

MAUT, çok kriterli karar analizinde kullanılan diğer yöntemlerden farklı olarak hem nitel hem de nicel verilerin aynı analitik çerçevede değerlendirilmesine imkân tanır. Yöntemin en önemli avantajı, karar vericilere sistematik bir yaklaşım sunarak subjektif yargıların etkisini azaltmasıdır. Bu özelliği ile özellikle mühendislik, yönetim ve politika analizi gibi disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

MAUT yönteminde izlenecek adımlar şu şekildedir (Konuşkan ve Uygun, 2014):

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Karara etki eden kriterler ve alternatifler belirlenerek karar matrisi Eşitlik (33)'e göre oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (33)$$

x_{ij}: i alternatif j.kriter için verilen değerleri (i=1,2,3,…,m) ve (j=1,2,3,…,n).

2) Adım: Alternatiflerin değerlendirilebilmesi için kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmesi:

Kriter ağırlıkları (w_i) değerlerinin toplamı 1'eşit olmalıdır.

$$(\sum_{1}^{m} w_i = 1) \quad (34)$$

3) Adım: Karar matrisi normalize edilmesi:

Her bir kriter açısından alternatiflerin en yüksek ve en düşük değerleri belirlendikten sonra, karar matrisi Eşitlik (35) aracılığıyla normalize edilir.

$$u_i(x_i) = \frac{x - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (35)$$

x_i^+= Nitelik için en iyi değer

x_i^-= Nitelik için en kötü değer

x = Hesaplanan satırdaki mevcut fayda değeri

4) Adım: Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri bulunması:

Eşitlik (36)'da $u_i(x_i)$, her bir alternatifin fayda her bir kriterin önem ağırlık değerini göstermek üzere fayda fonksiyonu formülü aşağıda gösterilmiştir.

5) Adım: Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri toplamı alınarak toplam fayda değerleri hesaplanması:

Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri toplamı alınarak toplam fayda değerleri Eşitlik (36)'ya göre hesaplanır:

$$U_x = \sum_1^m u_i(x_i) * w_i \qquad (36)$$

U_x= Alternatifin fayda değeri

$u_i(x_i)$= Her kriter ve her alternatif için normalize fayda değerleri

w_i= Ağırlık değerleri

Alternatifler, toplam fayda değerlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanmakta olup, en yüksek fayda skorunu elde eden alternatif optimal çözüm olarak seçilmektedir.

5.2.6. CRADIS Metodu

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları arasında yer alan CRADIS (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution) yöntemi, karar vericilere rasyonel, dengeli ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunan uzlaşmacı bir sıralama tekniğidir. Yöntem, her bir alternatifin hem pozitif (ideal) hem de negatif (anti-ideal) çözüme olan uzaklıklarına göre değerlendirilmesine dayanmaktadır. CRADIS'in temel varsayımı, en iyi alternatifin ideal çözüme en yakın ve aynı zamanda anti-ideal çözüme en uzak olan seçenek olduğu yönündedir (Kahreman, 2024; Keleş, 2023).

CRADIS yöntemi, normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulmasıyla başlar ve ardından ideal ile anti-ideal çözümler belirlenir. Her bir alternatifin bu çözümlere olan uzaklıkları hesaplandıktan sonra, alternatifler göreli olarak değerlendirilir ve bir uzlaşmacı sıralama skoru elde edilir. Bu skorlar sayesinde karar vericiler, farklı kriterler altında alternatifler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapabilirler (Taşcı, 2023). Ayrıca CRADIS yöntemi, çeşitli ağırlıklandırma teknikleriyle (örneğin MEREC, LOPCOW) entegre edilerek çok boyutlu analizlerde etkin biçimde kullanılmaktadır (Asker, 2024).

Yöntem, belirsizlik, çok boyutluluk ve kriterler arası çelişkilerin bulunduğu durumlarda karar vericiye tutarlı ve uygulanabilir çözümler sunması bakımından

avantajlıdır. Son yıllarda sürdürülebilir kalkınma performansları (Kahreman, 2024), şehirlerin yaşanabilirlik düzeyleri (Keleş, 2023), sigorta sektörü (Taşcı, 2023) ve finansal sistem analizleri (Asker, 2024) gibi farklı alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Bu durum, CRADIS yönteminin esnekliğini ve geniş uygulama alanını ortaya koymaktadır.

Puska ve diğer. (2022) tarafından geliştirilen CRADIS yöntemi, alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerden uzaklık ölçümlerini değerlendirmek üzere tasarlanmıştır. Yöntem, TOPSIS, MARCOS ve ARAS gibi Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinin metodolojik unsurlarının entegrasyonuyla oluşturulmuştur.

CRADIS yöntemi uygulama adımları aşağıdaki gibidir (Puska ve diğer., 2022):

1) Adım: Karar matrisi oluşturulması:

Karar matrisinin elemanları sıfırdan büyük olmalıdır. Negatif bir değer olması durumunda uygun bir teknikle pozitif değerlere dönüştürülmelidir. Eşitli (37)'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_m & \cdots & X_{mj} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (37)$$

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Kriterlerin ölçü birimlerini karşılaştırılabilir hâle getirmek için normalize işlemi gerçekleştirilir. Normalize edilmiş değerler, kriter türüne göre fayda kriteri için Eşitlik (38), maliyet kriterleri için ise Eşitlik (39) kullanılır.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmaks}} \quad (38)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}} \quad (39)$$

3) Adım: Normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması:

Normalize edilmiş karar matrisindeki değerlerin, Eşitlik (40)'ta belirtilen ilgili ağırlık katsayıları ile çarpımı sonucunda ağırlıklı karar matrisi elde edilmektedir.

$$v_{ij} = n_{ij}.w_j \quad (40)$$

4) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümün belirlenmesi:

Ağırlıklandırılmış karar matrisinde her bir kriter için en yüksek değeri v_{ij} ideal çözümü, en düşük v_{ij} değeri ise ideal olmayan çözümü temsil etmektedir. Eşitlik (41) ve (42) formüller ile bulunur.

$$t_i = maksv_{ij} \quad (41)$$

$$t_{ai} = minv_{ij} \quad (42)$$

5) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmaların hesaplanması:

$$d^+ = t_i - v_{ij} \quad (43)$$

$$d^- = v_{ij} - t_{ai} \quad (44)$$

İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmalar sırasıyla ideal çözüm için Eşitlik (43) ve Eşitlik (45), anti ideal çözüm için Eşitlik (44) ve Eşitlik (46) formülleri kullanılarak hesaplanır.

6) Adım: Her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma dereceleri sırasıyla hesaplanması:

Her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma dereceleri sırasıyla Eşitlik (45) ve Eşitlik (46) kullanılarak hesaplanır:

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^{n} d^+ \quad (45)$$

$$s_i^- = \sum_{j=1}^{n} d^- \quad (46)$$

7) Adım: Optimum alternatiflerden sapmalara ilişkin olarak her bir alternatif için fayda fonksiyonunun hesaplanması:

$$K_i^+ = \frac{s_0^+}{s_i^+} \quad (47)$$

$$K_i^- = \frac{s_i^-}{s_0^-} \quad (48)$$

s_0^+= ideal çözümden en küçük mesafeye sahip olan optimal alternatif,

s_0^-= ideal olmayan çözümden en büyük mesafeye sahip olan optimal alternatif.

8) Adım: Alternatiflerin fayda derecelerinden ortalama sapmaları hesaplanarak alternatiflerin sıralanması.

$$Q_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{2} \quad (49)$$

En yüksek Qi değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak kabul edilir.

5.2.7. ARAS Metodu

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri arasında önemli bir yere sahip olan Toplamsal Oran Değerlendirme (ARAS) yöntemi, Zavadskas ve Turskis (2010) tarafından geliştirilmiş ve literatürde yaygın kabul görmüş bir analitik yaklaşımdır. Bu yöntem, temel olarak alternatiflerin performans değerlerini optimal bir referans noktasıyla karşılaştırmaya dayalı sistematik bir değerlendirme mekanizması sunmaktadır (Salman ve Peker, 2021).

ARAS yönteminin metodolojik temelini, karar matrisine eklenen optimal alternatif ile diğer alternatiflerin oransal benzerliklerinin hesaplanması oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, alternatiflerin ideal çözüme göreceli yakınlıklarını ölçmekte ve karar vericilere nicel bir karşılaştırma imkânı sağlamaktadır (Cerrahoğlu, 2022). Yöntemin ayırt edici özelliği, diğer ÇKKV tekniklerinden farklı olarak optimal çözüm referans alınarak yapılan oransal analizlerin karar sürecine nesnellik katmasıdır.

ARAS yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Hesaplama sürecinin matematiksel açıdan şeffaf ve tutarlı olması,
- Hem nicel hem de nitel kriterlerin entegre değerlendirilmesine imkân tanıması,
- Uygulama kolaylığı ve hesaplama süresinin kısalığı,
- Optimal çözüm referans alınarak yapılan analizlerin sonuçların güvenilirliğini artırması şeklinde sıralayabiliriz.

Yöntemin uygulama alanları oldukça geniştir. Cerrahoğlu (2022) tarafından tatil pazarlaması alanında, Salman ve Peker (2021) tarafından ise savunma sanayi Ar-Ge merkezlerinin performans değerlendirmesinde başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmalar, ARAS yönteminin farklı sektörlerdeki karmaşık karar problemlerinin çözümünde etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

ARAS (Additive Ratio Assessment) yönteminin uygulama adımları, Zavadskas ve Turskis (2010) tarafından geliştirilen metodolojiye uygun olarak aşağıda sistematik bir şekilde sunulmaktadır:

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

İlk olarak karar vericinin değerlendireceği alternatifler ve bu alternatiflerin performans göstereceği kriterler belirlenir. Her bir alternatifin kriterlere ilişkin değerlerini içeren karar matrisi Eşitlik (50)'deki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m*n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \; iken \; j = 1, \dots \; , n \qquad (50)$$

2) Adım: Her kriter için optimal performansın belirlenmesi:

Her bir kriter için optimal performans değeri, Eşitlik (51) kullanılarak tespit edilmektedir. Karar probleminde kriterin optimal değeri önceden belirlenmemişse, kriterin fayda (maksimizasyon) veya maliyet (minimizasyon) özelliği taşıması durumuna göre optimal değer aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\begin{cases} Eğer\ \max_i x_{ij}\ ise\ x_{0j} = \max_i x_{ij} & fayda\ kriteri\ için \\ Eğer\ \min_i x_{ij}^*\ ise\ x_{0j} = \min_i x_{ij}^* & maliyet\ kriteri\ için \end{cases} \quad (51)$$

3) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Farklı boyutlarda olan kriterler eşitlik (52) ve eşitlik (53) yardımıyla normalize edilerek normalize karar matrisi elde edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} x_{ij}} \qquad fayda\ kriteri\ için \qquad (52)$$

$$x_{ij}^* = {}^1/_{x_{ij}} \ , \ r_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=0}^{m} x_{ij}^*} \qquad maliyet\ kriteri\ için \qquad (53)$$

r_{ij} : i.alternatifin j.kriterinin normalize edilmiş değeri.

4) Adım: Ağırlıklı normalize karar matrisinin oluşturulması:

Karar matrisinde yer alan her bir kriterin göreceli önem derecesini temsil eden w_j ağırlık katsayıları hesaplanmaktadır. Ağırlıklı normalize karar matrisi $V = [v_{ij}]$, eşitlik (54) yardımıyla oluşturulur.

$$v_{ij} = w_{ij} * r_{ij} \qquad (54)$$

v_{ij}: i.alternatifin j.kriterinin ağırlıklandırılmış normalize değeri

5) Adım: Performans skorlarının hesaplanması:

Her bir alternatif için ağırlıklı normalize edilmiş değerlerin toplamı alınarak performans skoru S_i Eşitlik (55) yardımıyla hesaplanır. S_i, değeri büyük olan alternatif daha etkin bir alternatiftir.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} V_{ij} \qquad (i = 1,2,3, \dots, m) \qquad (55)$$

S_i: i. alternatifin optimal fonksiyon değeri.

6) Adım: En uygun alternatifin belirlenmesi:

Fayda derecesi, bir alternatifin optimal fonksiyon değeri ile en iyi alternatifin optimal fonksiyon değerinin kıyaslanması ile bulunur. Eşitlik (56) kullanılarak alternatiflere ait S_i optimal fonksiyon değerleri S_0 en iyi optimal fonksiyon değerlerine oranlanarak K_i fayda değerleri hesaplanmaktadır.

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} \quad (i = 1,2,3, \dots, m) \tag{56}$$

Elde edilen K_i fayda değerleri büyüten küçüğe doğru sıralanarak alternatiflerin değerlendirilmesi yapılmaktadır.

5.2.8. SAW Metodu

Çok kriterli karar verme teknikleri arasında önemli bir yere sahip olan Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (Simple Additive Weighting - SAW) yöntemi, ilk olarak Churchman ve Ackoff (1954) tarafından portföy seçim problemlerine yönelik olarak geliştirilmiştir. Literatürde "Ağırlıklı Toplam Model" olarak da bilinen bu yöntem, matematiksel basitliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle çeşitli karar problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ömürbek ve diğer., 2016).

SAW yönteminin temel işleyiş mantığı, alternatiflerin her bir kriter açısından gösterdiği performans değerlerinin ağırlıklı toplamını hesaplamaya dayanmaktadır. Yöntemin uygulanması sırasında, fayda kriterleri için alternatiflerin aldığı değerlerin maksimum değere oranlanması, maliyet kriterleri için ise minimum değerin alternatif değerlerine oranlanması prensibi benimsenmektedir (Cerrahoğlu, 2022). Bu normalizasyon işleminin ardından, her alternatifin kriter değerleri ilgili kriter ağırlıklarıyla çarpılarak toplam performans puanı elde edilmektedir.

Ömürbek ve diğer. (2016) tarafından otomotiv firmalarının performans değerlemesinde, Cerrahoğlu (2022) tarafından ise seyahat acentelerinin sosyal medya tercihlerinin analizinde başarıyla uygulanan SAW yöntemi, çeşitli disiplinlerdeki karar problemlerinin çözümünde etkin bir araç olarak kabul görmektedir.

SAW yönteminin adımları aşağıdaki gibidir (Cerrahoğlu, 2022; Khairul ve Siahaan, 2016):

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Değerlendirmeye tabi tutulan m adet alternatif ve n adet kriter belirlenir. Bu kriterler doğrultusunda, her alternatifin her bir kriter için elde ettiği performans değerlerinden oluşan karar matrisi Eşitlik (57)'deki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m*n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m \; iken \; j = 1, \dots \; , n \tag{57}$$

burada 'i' alternatifleri, 'j' ise kriterleri belirtmektedir.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Farklı ölçeklerdeki kriterlerin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi için normalizasyon işlemi uygulanır. Normalize işlemi, kriterin türüne (fayda veya maliyet) göre Eşitlik (58) ve Eşitlik (59) yardımıyla yapılır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmaks}} \qquad (i = 1,2,3,\dots,m) \; ve \; (j = 1,2,3,\dots,n) \tag{58}$$

$$r_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}} \qquad (i = 1,2,3,\dots,m) \; ve \; (j = 1,2,3,\dots,n) \tag{59}$$

Normalizasyon işleminde fayda kriteri için eşitlik (58), maliyet kriteri için eşitlik (59) kullanılmaktadır.

3) Adım: Karar matrisindeki bütün kriter değerlerinin pozitif olması zorunludur. Negatif değerlerin varlığı halinde, Eşitlik (60)'te belirtilen dönüşüm formülü ile pozitif değerlere dönüştürülür:

$$r_{ij} = r_{ij} + \left|\min r_{ij}\right| + 1 \tag{60}$$

4) Adım: Ağırlıklandırılmış normalize matrisin oluşturulması ve toplam skorların hesaplanması:

Karar matrisinde yer alan her bir kriterin göreceli önemini temsil eden w_j ağırlık katsayıları hesaplanır. Normalize edilmiş karar matrisindeki kriter değerleri ile ağırlıklarının çarpılması sonucunda elde edilen sonuç her bir alternatifin toplam tercih değerleridir. Alternatiflerin toplam tercih değerleri eşitlik (61) ile hesaplanır ve bulunan V_i değerleri büyükten küçüğe sıralanır.

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \, r_{ij} \qquad (j = 1,2,3, \dots \; , n) \tag{61}$$

Sıfır ile bir aralığında olan V_i değeri ne kadar büyük olursa ilgili alternatif daha fazla tercih edilmiş demektir.

5.3. Literatür İncelemesi

Yapılan araştırmada, “Endüstri 4.0 ve Çok Kriterli Karar Verme” anahtar kelimeleri ile literatür taraması yapılmıştır ve şu çalışmalara rastlanmıştır.

Kökümer (2018), yaptığı araştırma kapsamında işletmelerin dijital transformasyon yetkinliklerini ölçmeye yönelik kapsamlı bir değerlendirme modeli tasarlanmıştır. Çalışmada, 4 temel bileşen ve 23 detay ölçüt içeren anket formu, beyaz eşya üretimi yapan 7 farklı firma ile gerçekleştirilmiş ve bu ölçütler temelinde performans analizi yapılmıştır. Araştırmanın devamında, firmaların dijital uyum seviyelerinin tespiti ve teknoloji entegrasyon becerilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla MACBETH ve TOPSIS analiz teknikleri kullanılmıştır.

Eğilmez ve Koca (2018), çalışmada lojistik yönetiminde sürdürülebilirliği geliştirmek adına Endüstri 4.0 uygulamalarından kaynaklanan 18 temel engel belirlenmiştir. Söz konusu engeller, LinkedIn üzerinden Endüstri 4.0 alanında yönetici konumunda görev yapan 150 uzmana yöneltilen anket vasıtasıyla incelenmiştir. Anket verileri, Keşfedici Faktör Analizi (KFA) yöntemiyle değerlendirilmiş ve Endüstri 4.0’la ilgili zorluklar dört temel kategoride gruplandırılmıştır. Ardından, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) tekniği kullanılarak bu zorluklar ve alt başlıkları önem seviyelerine göre karşılaştırılıp sıralanmıştır.

Gürsoy ve diğer. (2019), çalışmalarında Endüstri 4.0'ın uygulanma sürecinde öne çıkan kritik faktörlerin belirlenmesi amacıyla iki farklı karar verme tekniğinin entegre kullanımını incelemektedir. Çalışmada, Yönetim Bilişim Sistemleri alanında eğitim gören öğrencilerden toplanan veriler ışığında, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve DEMATEL yöntemleri birlikte uygulanmıştır. Araştırma metodolojisi iki temel aşamadan oluşmaktadır: İlk olarak AHP yöntemi kullanılarak Endüstri 4.0 bileşenlerinin ağırlıklandırması yapılmış, ardından DEMATEL tekniği ile bu bileşenler arasındaki nedensel ilişkiler ağı ortaya konulmuştur. Bu çift yönlü analiz yaklaşımı, dijital dönüşüm sürecindeki önceliklerin ve bileşenler arası etkileşimlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

Özkaya, Gür ve Eren (2019), yaptığı çalışmanın amacı Endüstri 4.0’a geçiş aşamasında ortaya çıkan temel sorunların sistematik bir şekilde tespit edilmesidir. Kapsamlı literatür taraması ve alanında uzman kişilerin değerlendirmeleri sonucunda dört ana faktör ve bunlara bağlı yirmi alt faktör belirlenmiştir. Söz konusu faktörlerin ve alt faktörlerin göreceli önem derecelerinin ortaya konulabilmesi amacıyla Analitik Ağ Süreci (AAS) yöntemi uygulanmıştır.

Şahin (2019), çalışmasında dördüncü sanayi devriminin tarihsel gelişim sürecini ve temel bileşenlerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Araştırmada öncelikle, endüstriyel evrimin geçmişten günümüze olan aşamaları karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve Endüstri 4.0'ın karakteristik özellikleri sistematik biçimde ortaya konmuştur. G-20 ülkelerinin dijital dönüşüm seviyelerini belirlemek üzere çok boyutlu bir değerlendirme yapmaktır. Bu doğrultuda, çok kriterli analiz tekniklerinden yararlanılarak ülkelerin olgunluk düzeyleri ölçülmüştür. Araştırma metodolojisinde, Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları, COPRAS (Karmaşık Oransal Değerlendirme) tekniği ile entegre edilerek kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Saçak, Gür ve Eren (2019), çalışmalarında Endüstri 4.0'ın temel teknolojilerinden nesnelerin interneti (IoT) sistemlerinin kurumsal ortamlarda verimli şekilde uygulanmasını etkileyen kritik başarı faktörlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, IoT entegrasyon sürecindeki belirleyici unsurlar, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve DEMATEL gibi çok ölçütlü karar verme teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, IoT sistemlerinin işletmelerde başarıyla uygulanabilmesinde en kritik öneme sahip faktörün veri güvenliği olduğunu ve bu unsurun uygulama başarısı üzerinde en belirleyici etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Uslu, Gür ve Eren (2019), çalışmasının Endüstri 4.0 sürecine entegrasyon planlayan bir işletmenin öncelik vermesi gereken faktörler ve uygulayacağı stratejileri ağırlıklandırmak ve sıralamak için AAS ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada ilk aşamada, AAS yöntemi kullanılarak Endüstri 4.0 kriterlerinin önem dereceleri hesaplanmıştır. Ardından, belirlenen bu ağırlıklar TOPSIS analizine dahil edilerek, söz konusu firmanın hangi adımları ne şekilde uygulaması gerektiği sıralı bir şekilde ortaya konmuştur.

Terzi, Gür ve Eren (2020), çalışmalarında dijital dönüşümün lojistik operasyonlar ve tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışma özelinde, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin Endüstri 4.0 bağlamında sürdürülebilir tedarik ağlarına sağlayabileceği çevresel ve ekonomik faydalar detaylı şekilde irdelenmiştir. Sürdürülebilir tedarik zincirlerinde Endüstri 4.0'ın etkilerini değerlendirmek için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Analitik Ağ Modeli (AAM) yöntemlerinin entegre kullanımına yer verilmiştir.

Yalçıner ve Çaylak (2020), çalışmasında Türkiye'nin Endüstri 4.0 geçiş sürecinde hangi sektörlerin önceliklendirilmesi gerektiğine yönelik bir analiz sunmayı amaçlamıştır. Araştırma kapsamında, ülkenin altı ana sanayi dalı; istihdam potansiyeli, üretkenlik artışı ve ihracat-ithalat dengesi gibi belirleyici parametreler dikkate alınarak AHP yöntemiyle

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çok Kriterli Karar Verme tekniklerinden TOPSIS yaklaşımıyla analiz edilerek sektörel öncelikler belirlenmiştir.

Ömürgönülen, Çekiç ve Ar (2020) çalışmalarında lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin dijital dönüşüm sürecinde dikkate almaları gereken kritik parametreleri incelemeyi hedeflemektedir. Araştırmanın temel amacı, Endüstri 4.0 teknolojilerinin lojistik operasyonlar üzerindeki etkisini belirleyen faktörlerin karşılıklı ilişkilerini ortaya koymak ve bu faktörlerin göreceli önem derecelerini tespit etmektir. Kapsamlı literatür incelemesi sonucunda tanımlanan bu parametreler, belirsizlik durumlarını da dikkate alan Bulanık DEMATEL analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir.

Balkan (2020), çalışmasında enerji üretim ve dağıtım sistemlerinde optimal verimliliğin sağlanabileceği en uygun lokasyonun belirlenmesi problemine odaklanmaktadır. Çalışmada, kamu kurumlarındaki uzman görüşlerinden yararlanılarak yer seçim sürecini etkileyen kritik parametreler tanımlanmış ve bu parametrelerin göreceli önem dereceleri ikili lojistik regresyon analizi ile ölçülmüştür. Türkiye bağlamında literatüre ilk kez kazandırılan bu kriterler, önem sıralamasına göre analiz edilerek kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. ELECTRE çok kriterli karar verme tekniği kullanılarak aday bölgeler değerlendirilmiş, her bir alternatif için yedi temel performans göstergesi baz alınarak uyumluluk, uyumsuzluk ve eşik değer matrisleri oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda, enerji üretim tesisi kurulumu için en uygun beş potansiyel lokasyon belirlenerek önerilmiştir.

Karakoç, Eren ve Özcan (2020), yaptıkları bu çalışmada Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi sırasında yaşanan güçlüklerin sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi perspektifinden analiz edilmesini hedeflemişlerdir. Araştırmada, kriterler arasındaki karşılıklı etkileşimleri dikkate alan Analitik Ağ Süreci (AAS) tekniği uygulanmış olup, bu sayede dijital transformasyon sürecinde ortaya çıkan engelleyici unsurlar detaylı şekilde irdelenmiş ve her bir kriterin ağırlık katsayısı hesaplanmıştır.

Marşap ve Kablan (2020), çalışmalarında Borsa İstanbul'da işlem gören otomotiv şirketlerinin performansını iki farklı açıdan incelemektedir. Birinci aşamada, söz konusu firmaların 2014-2020 dönemine ait faaliyet raporları, Endüstri 4.0 geçiş süreçleri ve pandemi etkileri bağlamında nitel araştırma teknikleriyle analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise aynı döneme ait mali veriler, ÇKKV tekniklerinden COPRAS (Karmaşık Oransal Değerlendirme) yaklaşımıyla nicel olarak değerlendirilmiştir.

Oktay (2021), çalışmasında Türk Savunma Sanayii'nde önemli bir konuma sahip firmalarda çalışan personelin görüşleri doğrultusunda belirlenen faktörler, sektör uzmanlarının değerlendirmeleriyle geçerlik analizine tabi tutmuştur. Çalışma kapsamında

ilk olarak MACBETH tekniği yardımıyla belirlenen kriterlerin göreceli önem dereceleri tespit edilmiştir. Sonraki aşamada ise bu ağırlıklandırmalar TOPSIS metodolojisine entegre edilerek sektöre özgü bir olgunluk değerlendirme modeli geliştirilmiştir.

Deringöz, Danışan ve Eren (2021), çalışmalarında Endüstri 4.0 sürecinde sanayi uygulamalarında kullanılan akıllı gözlük teknolojilerinin seçimine yönelik bir karar modeli sunmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında, piyasadaki önde gelen yedi farklı akıllı gözlük modeli, beş temel değerlendirme kriteri (fiyat performansı, batarya dayanıklılığı, kullanıcı dostu tasarım, depolama kapasitesi ve görsel alan genişliği) ekseninde analiz edilmiştir. Belirlenen kriterler doğrultusunda, çok ölçütlü karar analizi teknikleri uygulanmıştır. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile kriter ağırlıkları hesaplanmış, ardından bu sonuçlar TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleriyle entegre edilerek değerlendirme yapılmıştır. İlginç bir şekilde, farklı metodolojilerin uygulanması sonucunda optimum seçeneklerin değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Ilgın, Urkan ve Kurtul (2021), çalışmalarında Türkiye imalat sanayisinde Endüstri 4.0 benimsenme sürecini geciktiren bariyerlerin kapsamlı analizini gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Araştırma metodolojisinde, kapsamlı literatür incelemesi ve saha araştırması yoluyla dijital dönüşümün önündeki temel engelleyici unsurlar tespit edilmiştir. Belirlenen bu kritik faktörlerin göreceli önem dereceleri ve aralarındaki nedensel ilişkiler, Analitik Ağ Süreci (AAS) ve DEMATEL gibi çok ölçütlü karar verme teknikleri kullanılarak niceliksel olarak değerlendirilmiştir.

Aygün ve Satı (2021), bu bilimsel çalışma, KOBİ'lerin Endüstri 4.0 adaptasyon sürecindeki mevcut kapasitelerini ölçmek ve dijital olgunluk düzeylerini belirlemek amacıyla, Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemlerinin kullanım etkinliğine dayanan kapsamlı bir değerlendirme modeli tasarlamıştır. Model geliştirme aşamasında, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve DEMATEL gibi çok ölçütlü karar analizi teknikleri uygulanarak, belirlenen kriterler arasındaki hiyerarşik bağlantılar incelenmiş ve faktörlerin önem dereceleri sistematik olarak sıralanmıştır.

Taşkın ve diğer. (2022), çalışmalarında tedarik zinciri operasyonlarının temel bileşenlerinden depo ve lojistik yönetim sistemlerinde optimal RFID (Radyo Frekanslı Tanımlama) teknolojisi seçim problemine odaklanmaktadır. Çalışmada, dijital dönüşüm sürecini henüz tamamlamamış işletmelerin karşılaştığı yatırım maliyetleri ve sektörel özellikler dikkate alınmıştır. Araştırma kapsamında altı farklı RFID çözümü, yedi temel performans kriteri baz alınarak kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Çalışmanın metodolojik katkısı olarak, Ağ Prosesi (ANP), PROMETHEE ve Çok Ölçütlü Fayda Teorisi (MAUT)

yöntemlerinin entegre bir şekilde uygulanmasıyla sektörel ihtiyaçlara uygun bir karar destek modeli geliştirilmiştir. Bu hibrit yaklaşım, literatüre yenilikçi bir metodolojik perspektif kazandırmaktadır.

Durmaz ve Aksakal (2023), bu çalışmada dijital çağın gereklilikleri doğrultusunda e-ticaret platformlarında tüketici davranışlarını etkileyen kritik parametreleri tespit etmeyi hedeflemektedir. Araştırma kapsamında; ürün portföyü çeşitliliği, bilgiye ulaşım kolaylığı, lojistik süreçlerin güvenilirliği, arayüz tasarımının ergonomik yapısı, kişisel verilerin korunması ve kullanıcı deneyimi memnuniyeti gibi temel değişkenler ele alınmıştır. Söz konusu faktörlerin karşılıklı nedensellik ilişkileri ve göreceli etki düzeyleri, DEMATEL analiz tekniği kullanılarak sistematik şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, dijital perakende sektöründeki rekabet dinamiklerini açıklamakta ve platform işletmecileri için operasyonel iyileştirme önerileri sunmaktadır.

Erdem ve Koska (2023), çalışmalarında üretim tesislerinde operasyonel performansı optimize edecek endüstriyel robot seçimi problemine çözüm getirmeyi amaçlamaktadır. Değerlendirme kriterleri arasında üretim kapasitesi, proses hızı ve kalite standartları gibi parametreler öncelikli olarak ele alınırken, robotların fiziksel boyutları ve ağırlık özellikleri gibi teknik nitelikler ikincil öneme sahiptir. Çalışmada, SWARA yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiş ve bulanık TOPSIS tekniği ile robot alternatiflerinin performans sıralaması gerçekleştirilmiştir. Bu metodolojik yaklaşım, imalat sektöründe robotik sistem seçim kararlarında çok boyutlu değerlendirme yapabilmek için kapsamlı bir analitik çerçeve sunmaktadır.

Erden ve Yılmaz (2023), çalışmalarında tedarik zinciri süreçlerinde dijitalleşmenin yarattığı performans artışlarının sistematik olarak tanımlanmasını ve bu gelişmeler arasındaki nedensel bağlantıların incelenmesini hedeflemektedir. Çalışmada uygulanan metodolojik yaklaşım olarak, Çok Kriterli Karar Verme tekniklerinden DEMATEL analiz yöntemi tercih edilmiştir. Araştırma kapsamında, tedarik zinciri performansını etkileyen 10 temel kriter belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, faktörler arası etkileşimlerde en belirleyici unsurların ortak çalışma mekanizmaları ve veri paylaşım sistemleri olduğunu ortaya koyarken; en çok etkilenen parametrelerin operasyonel giderler ve JIT (Just-in-Time) üretim süreçleri olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, kriterler arasındaki en güçlü bağlantıların sistem şeffaflığı ve bilgi akış kanalları boyutlarında gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Sağbaş ve Dermenci (2023), çalışmasında beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin Endüstri 4.0 kapsamındaki teknolojik olgunluk düzeyini değerlendirmeye

yönelik özgün bir dijital olgunluk değerlendirme matrisi tasarlanmıştır. Matrisin oluşturulması sürecinde, karar verme sürecinin sistematik ve tutarlı bir şekilde yürütülmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve TOPSIS yöntemlerinden yararlanılmıştır. AHS yöntemi, modelde yer alan ana ve alt kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılmış olup, bu aşamada firmanın alanında yetkin uzmanlarının görüşleri esas alınmıştır. Oluşturulan değerlendirme modeli kapsamında; Akıllı Fabrika, Akıllı Lojistik, Akıllı Yönetim ve Akıllı Operatör olmak üzere dört temel bileşenin teknolojik yeterlilik seviyeleri, TOPSIS yöntemi ile analiz edilerek firmanın dijital dönüşüm sürecindeki mevcut durumu kapsamlı biçimde ortaya konmuştur.

Aka (2024), çalışmasında Türkiye'deki KOBİ'lerin dijital transformasyon süreçlerine yönelik algı ve yaklaşımlarını incelemeyi ve bu süreçteki bilgi birikimlerinin gelişim dinamiklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Araştırma metodolojisi olarak, beş yıl arayla aynı katılımcılarla gerçekleştirilen yarı yapılandırılmış derinlemesine görüşmelerin karşılaştırmalı analizi benimsenmiştir. Bulgular, işletme yöneticilerinin Endüstri 4.0 konusundaki teknik bilgi düzeylerinin ve farkındalıklarının 2017 yılına göre önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında, alan uzmanlarının değerlendirmeleri doğrultusunda SWARA yöntemi uygulanarak dijital dönüşüm fırsatlarının önceliklendirilmesi sağlanmıştır.

Demirel ve diğer. (2024), çalışmalarında Türkiye savunma sanayii sektöründeki işletmelerin dijital adaptasyon kapasitelerinin analizine odaklanmaktadır. Araştırmada dijital olgunluk; kurumların akıllı üretim teknolojilerini operasyonel süreçlerine entegre etme becerileri ve bu entegrasyonun verimlilik üzerindeki etkisi temelinde değerlendirilmiştir. Çalışma metodolojisinde, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenen kriter ağırlıkları, TOPSIS ve PROMETHEE çok kriterli karar verme teknikleriyle desteklenerek firmaların performans sıralaması gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma, savunma sanayii aktörlerinin dijital dönüşüm yol haritalarını şekillendirmelerine yönelik stratejik bir çerçeve sunmaktadır.

Nebati (2024), çalışmasında tekstil endüstrisinde dijital dönüşüm süreçlerinin analizine yönelik bir karar verme çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, Endüstri 4.0 bileşenlerinin değerlendirilmesi için En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) kullanılmış, teknoloji uygulamalarının sınıflandırılmasında ise ARAS ve OCRA teknikleri birlikte uygulanarak sonuçların tutarlılığı test edilmiştir. Analiz bulguları, teknolojik entegrasyonun en kritik faktör olduğunu ortaya koyarken, dijital uygulamalar arasında anlık performans analizlerinin en yüksek uygulama önceliğine sahip olduğunu göstermektedir.

6. KÜRESEL İNOVASYON ENDEKSİNDE YER ALAN ÜST-ORTA GELİRLİ ÜLKELERİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİYLE ANALİZİ

6.1. Amaç ve Yöntem

Bu çalışma, Küresel İnovasyon Endeksi'nde yer alan 2024 yılında gelişim seviyesine uygun performans gösteren üst-orta gelirli ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini sıralamayı amaçlamaktadır.

Endüstri 4.0 konusunda literatürde hali hazırda birçok çalışmaya rastlanmıştır. Ancak çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak ülkelerin sıralanmasına dair çalışmalar kısıtlıdır. Küresel İnovasyon Endeksinden herhangi bir ülke grubunu alternatif olarak seçip bunun üzerinde çalışma gerçekleştiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu da çalışmanın özgünlüğünü yansıtmaktadır.

Bu araştırmada belirlenen kriterler, çok kriterli karar verme yöntemlerinden CRITIC ve Entropi yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı ağırlıklandırılmıştır. Ardından, CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları esas alınarak, çok kriterli karar verme yöntemlerinden RAWEC, EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS ve SAW ile ülkelerin performans sıralamaları yapılmıştır. Aynı süreç, Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak da tekrarlanmıştır. Elde edilen sıralama sonuçları öncelikle her bir ağırlıklandırma yöntemi kendi içinde korelasyon analizine tabi tutulmuştur. Daha sonra, sıralama yöntemleri arasında ağırlıklandırma yöntemlerinden kaynaklanan farklılıkların belirlenebilmesi amacıyla, her bir sıralama yöntemi özelinde çapraz korelasyon analizleri gerçekleştirilerek yöntemler arası ilişkiler test edilmiştir.

6.2. Alternatiflerin Seçimi

Bu çalışmada analiz edilen ülkeler (Arnavutluk, Ermenistan, Bosna Hersek, Bulgaristan, Kolombiya, El Salvador, Gürcistan, Malezya, Mauritius, Meksika, Kuzey Makedonya, Peru, Sırbistan ve Türkiye), Dünya Bankası sınıflandırmasına göre üst-orta gelir grubunda yer almaktadır. Bu ülkelerin seçilmesinin temel nedenleri:

Ekonomik Benzerlik: Üst-orta gelir grubundaki ülkeler, benzer makroekonomik zorluklar (örn. teknoloji yatırımlarının finansmanı, AR-GE kapasitesi) ve fırsatlarla (örn. dijital dönüşüm potansiyeli) karşılaşmaktadır.

Karşılaştırılabilirlik: G-20 veya OECD ülkeleri gibi yüksek gelirli ülkelerle kıyaslandığında, bu gruptaki ülkelerin Endüstri 4.0 adaptasyon süreçleri daha gerçekçi ve öğretici bir karşılaştırma sunmaktadır.

WIPO'nun 2024 Küresel İnovasyon Endeksi'nde bu ülkelerin "Performance in line with level of development" (Gelişim Düzeyiyle Uyumlu Performans) grubunda yer alması, çalışmada yapılan ülke seçimlerinin bir diğer kritik dayanağını oluşturmaktadır. Tablo 1'de, WIPO tarafından yayınlanan ve farklı gelir düzeylerinde yer alan ülkelerin inovasyon performanslarını gösteren tabloya yer verilmiştir. Bu tablo, ülkelerin gelir düzeylerine göre dört sütun ve inovasyon düzeylerine göre üç satır olmak üzere on iki gruba ayrıldığını göstermektedir.

Bu kategorinin analize katkıları:

Sürdürülebilir İnovasyon Dinamikleri: Bu gruptaki ülkeler, mevcut ekonomik kapasitelerine kıyasla beklenen inovasyon performansını gösterir. "Gelişim düzeyine uyumlu" olarak etiketlenmeleri, politika etkinliği ve altyapı yatırımlarının doğru yönlendirildiğine işaret eder.

Endüstri 4.0 için Öngörülebilir Model: Bu ülkeler, yüksek gelirli ülkelerin aksine kaynak kısıtları altında inovasyon stratejileri geliştirmek zorundadır. Dolayısıyla, başarılı örneklere bakılarak benzer ekonomilere yol gösterici olabilecekleri düşünülebilir.

Eleme Kriterleri: Neden Diğer Ülkeler Dahil Edilmedi?

- Yüksek gelirli ülkeler: Endüstri 4.0'da çok ileri seviyede oldukları için, üst-orta gelirli ülkelerle doğrudan kıyaslama yapılamaz.
- Düşük gelirli ülkeler: Temel dijital altyapı eksiklikleri nedeniyle veri tutarlılığı sorunu oluşturmaktadır.
- "Underperformers" (Gelişim düzeyinin altında kalanlar): Bu ülkelerde politik istikrarsızlık veri güvenilirliğini azaltmaktadır.

Tablo 1 - Farklı Gelir Düzeylerinde İnovasyon Performansı, (WIPO, 2024)

	Yüksek Gelir Grubu		**Üst Orta Gelir Grubu**		**Alt Orta Gelir Grubu**		**Düşük Gelir Grubu**
Performans Beklentilerin Üzerinde Gelişim Seviyesi	İsviçre İsveç ABD Singapur Güney Kore Finlandiya Hollanda	Almanya Danimarka Fransa Japonya Kanada İsrail Estonya	Çin Tayland Brezilya Endonezya Moldova Güney Afrika Jamaika		Hindistan Vietnam Filipinler Ukrayna Fas	Moğolistan Ürdün Özbekistan Pakistan Senegal	Ruanda Madagaskar Burundi
Gelişim Seviyesine Uygun Performans	Avusturya Hong Kong, Çin Norveç İzlanda Avustralya Belçika Yeni Zelanda İtalya Kıbrıs	İspanya Malta Çek Cumhuriyeti Portekiz Slovenya Litvanya Macaristan Letonya Yunanistan Şili Barbados	Malezya Türkiye Bulgaristan Sırbistan Mauritius Meksika Kuzey Makedonya	Kolombiya Ermenistan Peru Bosna Hersek Arnavutluk El Salvador Gürcistan	İran Tunus Mısır Sri Lanka Yeşil Burun Adaları Lübnan Kenya Kırgızistan Bolivya	Gana Kamboçya Bangladeş Tacikistan Nepal Nijerya Zambiya Zimbabve Birleşik Tanzanya	Togo Uganda Mozambik
Diğer Tüm Ekonomiler	İrlanda Lüksemburg BAE Polonya Hırvatistan Slovakya Suudi Arabistan Romanya	Katar Uruguay Kuveyt Bahreyn Umman Panama Brunei Trinidad ve Tobago	Rusya Federasyonu Karadağ Kosta Rika Arjantin Kazakistan Belarus	Botsvana Paraguay Azerbaycan Dominik Namibya Ekvador Guatemala	Lao Fildişi Sahili Honduras Cezayir Benin	Kamerun Nikaragua Myanmar Moritanya Angola	Burkina Faso Etiyopya Mali Nijer

6.3. Kullanılan Kriterler

Endüstri 4.0'ın ülke düzeyinde ölçülmesine yönelik yapılan çalışmalar, farklı metodolojiler ve kriter setleri sunmaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında kullanılan kriterlerin seçiminde aşağıdaki üç temel çalışmadan yararlanılmıştır:

a. *"Ülkelerin Endüstri 4.0 Düzeylerinin COPRAS Yöntemi ile Analizi: G-20 Ülkeleri ve Türkiye" (Şahin, 2023)*

Bu çalışma, COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi ile G-20 ülkelerinin Endüstri 4.0 performanslarını değerlendirmiştir. Çalışmadan tez kriteri olarak

dâhil edilen kriterler; Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Birleşmiş Miletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi ve Küreselleşme Endeksi şeklindedir. Çalışmanın öne çıkan katkısı, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinin Endüstri 4.0 değerlendirmesine uygulanabilirliğini göstermesidir.

b. *"OECD Ülkelerinin Endüstri 4.0 Düzeylerinin CRITIC ve CODAS Yöntemleri ile Değerlendirilmesi" (Eşiyok ve Demircioğlu, 2022)*

Bu araştırma, CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) ve CODAS (Combinative Distance-based Assessment) tekniklerini kullanarak OECD ülkelerinin dijital dönüşüm kapasitelerini analiz etmiştir. Çalışmadan tez kriteri olarak dahil edilen kriterler; Kişi Başına GSYİH (SAGP), Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi ve Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi şeklindedir. Çalışma, kriter ağırlıklandırma ve sıralama yöntemlerinin Endüstri 4.0 ölçümündeki etkinliğini vurgulamaktadır.

c. *"Sanayi 4.0 ve Başarılı Ülke Örnekleri" (Agazade, 2022)*

Bu tez çalışması, Almanya, Güney Kore ve Çin gibi öncü ülkelerin Endüstri 4.0 stratejilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmadan tez kriteri olarak dahil edilen kriterler; Küresel Siber Güvenlik Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi politik ve ekonomik göstergeleri analiz etmiştir. Çalışma, ülkelerin teknoloji adaptasyonundaki kurumsal ve ekonomik faktörlerin rolünü ortaya koymaktadır.

Tez çalışmasında kriterlerin seçilmesinin temel nedenleri şunlardır:

1) *Veri Erişilebilirliği ve Güncellik*

Literatürde Endüstri 4.0'ı ölçmek için önerilen birçok kriter bulunmaktadır. Ancak, bu verilerin birçok ülke için güncel olmaması veya resmi istatistik kurumlarında yayınlanmaması nedeniyle analiz dışı bırakılmıştır. Seçilen endeksler Dünya Bankası, ITU, WIPO ve BM gibi güvenilir kuruluşlar tarafından düzenli olarak güncellenmekte ve seçilen ülkeler için mevcuttur.

2) *Bütüncül Bir Değerlendirme Sağlaması*

Endüstri 4.0, yalnızca teknolojik altyapıyla değil, ekonomik, kurumsal ve sosyal faktörlerle de ilişkilidir. Bu nedenle, seçilen kriterler:

- Teknolojik hazırlık (Bilgi İletişim Teknolojileri Endeksi),
- Yenilikçilik kapasitesi (Küresel İnovasyon Endeksi),
- Dijital altyapı (Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi),

- Siber güvenlik (Küresel Siber Güvenlik Endeksi),
- Ekonomik özgürlükler (Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi) gibi çok boyutlu bir çerçeve sunmaktadır.

3) *Daha Önceki Çalışmalarla Metodolojik Tutarlılık*

- Referans alınan çalışmalar bu kriterleri kullanarak geçerli sonuçlar üretmiştir.
- Tezde benzer metriklerin kullanılması, literatürle karşılaştırılabilirlik sağlamaktadır.

4) *Eleme Kriterleri: Neden Bazı Göstergeler Çalışma Dışında Bırakıldı?*

- Küresel Dijital Rekabet Gücü, Küresel Bulut Bilişim Puanı yalnızca sınırlı sayıda ülke için mevcuttur.
- Açık pazar endeksi, küresel rekabet endeksi 4.0, çalışma çağındaki 15-64 yaş aralığının toplam nüfusa oranı, toplam nüfus içerisinde internete bağlanma (penetrasyon) oranı, çalışan nüfus içerisindeki tarım sektöründe çalışan oranı, toplam üretim içerisindeki orta-ileri teknoloji üretim oranı, patent başvuruları, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, bilgisayar-iletişim ve diğer hizmetler, küresel rekabet endeksi 4.0, iş yapma kolaylığı, UNCTAD B2C e-ticaret endeksi ülkelerin güncel veri setleri bulunmadığı için analize dahil edilmemiştir.

Bu çalışmada seçilen kriterler, veri erişilebilirliği, güncellik, çok boyutluluk ve literatürle uyum temelinde belirlenmiştir. Referans alınan çalışmalar, bu göstergelerin Endüstri 4.0 performansını ölçmede geçerli olduğunu kanıtlamıştır. Eleme sürecinde ise veri eksikliği ön planda tutulmuştur.

Tablo 2'de, Endüstri 4.0 bileşenlerinin tezde kullanılacak olan kriterlerle olan ilişkileri dört düzeyde (zayıf, orta, güçlü, çok güçlü) ifade edilmiştir. Tablo, farklı kaynaklardan (ITU, UN, WIPO, KOF, Heritage, Oxford Insights, World Bank, vb.) yararlanılarak hazırlanmıştır. Tablo analizi sonucunda, toplam 81 ilişki verisinin 24'ü çok güçlü, 39'u güçlü, 12'si orta ve 6'sı zayıf düzeyde ilişki göstermiştir.

Tablo 2 - Endüstri 4.0 Bileşenleri ile Kriterler Arası İlişki ve Kaynaklandırılmış Uyum Matrisi Tablosu

Kriter / Bileşen	**Akıllı Robotlar**	**Büyük Veri ve Analitik**	**Arttırılmış Gerçeklik**	**Eklemeli Üretim**	**Bulut Teknolojisi**	**Siber Güvenlik**	**Simülasyon**	**Yazılım Entegrasyonları**	**Nesnelerin İnterneti**
Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi	Orta (ITU, 2023)	Güçlü (ITU, 2023)	Güçlü (ITU, 2023)	Orta (ITU, 2023)	Güçlü (ITU, 2023)	Güçlü (ITU, 2024)	Güçlü (Lasi ve diğer., 2014)	Çok güçlü (ITU, 2023)	Çok güçlü (ITU, 2023)
E-Devlet Kalkınma Endeksi	Zayıf (UN, 2022)	Güçlü (UN, 2022)	Güçlü (UN, 2022)	Zayıf (UN, 2022)	Güçlü (UN, 2022)	Güçlü (ITU, 2022)	Güçlü (UN, 2022)	Çok güçlü (UN, 2022)	Çok güçlü (UN, 2022)
Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi	Orta (Stimson, 2023)	Çok güçlü (Stimson, 2023)	Güçlü (Stimson, 2023)	Orta (Stimson, 2023)	Çok güçlü (Stimson, 2023)	Güçlü (Stimson, 2023)	Güçlü (Lasi ve diğer., 2014)	Çok güçlü (Stimson, 2023)	Çok güçlü (Stimson, 2023)
Küresel İnovasyon Endeksi	Güçlü (WIPO, 2024)	Çok güçlü (WIPO, 2024)	Güçlü (WIPO, 2024)	Güçlü (WIPO, 2024)	Çok güçlü (WIPO, 2024)	Güçlü (WIPO, 2024)	Güçlü (WIPO, 2024)	Çok güçlü (WIPO, 2024)	Çok güçlü (WIPO, 2024)
Küreselleşme Endeksi	Zayıf (KOF, 2024)	Güçlü (KOF, 2024)	Orta (KOF, 2024)	Zayıf (KOF, 2024)	Güçlü (KOF, 2024)	Orta (KOF, 2024)	Orta (Lasi ve diğer., 2014)	Güçlü (KOF, 2024)	Çok güçlü (KOF, 2024)
Ekonomik Özgürlük Endeksi	Orta (Heritage, 2024)	Güçlü (Heritage, 2024)	Orta (Heritage, 2024)	Orta (Heritage, 2024)	Güçlü (Heritage, 2024)	Güçlü (Heritage, 2024)	Orta (Heritage, 2024)	Güçlü (Heritage, 2024)	Güçlü (Heritage, 2024)
Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)	Güçlü (Oxford Insights, 2024)	Güçlü (Oxford Insights, 2024)	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)	Güçlü (Oxford Insights, 2024)	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)	Çok güçlü (Oxford Insights, 2024)
Siber Güvenlik Endeksi	Orta (ITU, 2024)	Güçlü (ITU, 2024)	Zayıf (ITU, 2024)	Zayıf (ITU, 2024)	Güçlü (ITU, 2024)	Çok güçlü (ITU, 2024)	Güçlü (ITU, 2024)	Çok güçlü (ITU, 2024)	Çok güçlü (ITU, 2024)
Kişi Başına GSYİH (SAGP)	Güçlü (World Bank, 2024)	Çok güçlü (World Bank, 2024)	Güçlü (World Bank, 2024)	Güçlü (World Bank, 2024)	Güçlü (World Bank, 2024)	Güçlü (World Bank, 2024)	Güçlü (World Bank, 2024)	Çok güçlü (World Bank, 2024)	Çok güçlü (World Bank, 2024)

Zayıf (1): Dolaylı veya sınırlı ilişki.

Orta (2): Teorik bağlamda anlamlı ilişki kurulabiliyor ancak ampirik ölçümler sınırlı.

Güçlü (3): Gerek literatürde gerekse endeks metodolojisinde doğrudan yer bulan bileşen.

Çok güçlü (4): Göstergenin bileşeni doğrudan hedeflediği ve çok sayıda çalışmada ilişki kurulduğu durumlar.

6.3.1. Bilgi İletişim Teknolojileri (ICT) Gelişme Endeksi

Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi (BİTGE), bir ülkenin dijital altyapısını, BİT kullanımını ve dijital becerilerini ölçen kapsamlı bir endekstir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından geliştirilen bu endeks, ülkelerin dijital dönüşüm süreçlerini değerlendirmek ve küresel düzeyde karşılaştırmak amacıyla kullanılır (ITU, 2024).

BİTGE, özellikle Endüstri 4.0 gibi dijital dönüşüm süreçlerinde kritik bir rol oynar. Endüstri 4.0, ancak güçlü bir BİT altyapısı, yaygın BİT kullanımı ve toplumsal dijital becerilerle mümkün olabilir. Bu nedenle, BİTGE, Endüstri 4.0'ın başarıya ulaşması için temel bir gösterge olarak kabul edilir. BİTGE, ülkelerin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadığını değerlendirmek için temel bir gösterge sunar. Güçlü bir BİT altyapısı, yaygın BİT kullanımı ve dijital beceriler, Endüstri 4.0'ın başarıya ulaşması için hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, BİTGE, politika yapıcılar ve iş liderleri için stratejik bir rehber görevi görmektedir.

BİTGE, üç ana bileşen ve bu bileşenlere ait göstergeler üzerinden hesaplanır. Her bir bileşen, bir ülkenin dijital dönüşüm sürecindeki farklı bir boyutunu ölçer.

a. BİT Erişimi: Bu bileşen, bir ülkenin BİT altyapısının ne kadar gelişmiş olduğunu ölçer. Göstergeler şunlardır: sabit geniş bant abonelikleri, mobil geniş bant abonelikleri, uluslararası internet bant genişliği, elektrik erişimi (World Population Review, 2024).
b. BİT Kullanımı: Bu bileşen, BİT teknolojilerinin toplum ve iş dünyası tarafından ne ölçüde kullanıldığını değerlendirir. Göstergeler şunlardır: internet kullanıcı oranı, bireysel bilgisayar sahipliği, e-devlet hizmetleri, e-ticaret hacmi (ITU, 2023).
c. BİT Becerileri: Bu bileşen, bir ülkenin nüfusunun dijital becerilerini ölçer. Göstergeler şunlardır: okuryazarlık oranı, eğitim düzeyi, dijital beceriler (World Population Review, 2024).

6.3.2. Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi

Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi (Networked Readiness Index-NRI), bir ülkenin bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) altyapısını, kullanımını ve bu teknolojilerin ekonomik ve sosyal etkilerini ölçen kapsamlı bir endekstir. Dünya Ekonomik Forumu (WEF) tarafından geliştirilen ve günümüzde Portulans Enstitüsü tarafından yayınlanan bu endeks, ülkelerin dijital dönüşüm süreçlerini değerlendirmek ve küresel düzeyde

karşılaştırmak amacıyla kullanılır (Portulans Institute, 2023). NRI, dört ana bileşenden oluşur: teknoloji, insanlar, yönetişim ve etki. Bu bileşenler, bir ülkenin dijital altyapısının ne kadar gelişmiş olduğunu, toplumun bu teknolojileri ne ölçüde benimsediğini ve dijital dönüşümün ekonomik ve sosyal etkilerini ortaya koyar.

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijital teknolojilerin entegrasyonunu gerektiren bir devrimdir. Bu devrimin başarıya ulaşması, güçlü bir BİT altyapısı, nitelikli insan kaynakları ve etkili yönetişim mekanizmalarına bağlıdır. NRI, bu süreçte kritik bir rol oynar çünkü bir ülkenin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadığını değerlendirmek için temel bir gösterge sunar (Xu ve diğer., 2018).

NRI, dört ana bileşen ve bu bileşenlere ait göstergeler üzerinden hesaplanır. Her bir bileşen, bir ülkenin dijital dönüşüm sürecindeki farklı bir boyutunu ölçer.

a. Teknoloji: Bu bileşen, bir ülkenin BİT altyapısının ne kadar gelişmiş olduğunu ölçer. Göstergeler şunlardır: Sabit ve Mobil Geniş Bant Abonelikleri, Uluslararası İnternet Bant Genişliği, Bulut Bilişim Altyapısı, Yapay Zekâ ve IoT Altyapısı (Portulans Institute, 2023).
b. İnsanlar: Bu bileşen, bir ülkenin nüfusunun dijital becerilerini ve BİT kullanımını ölçer. Göstergeler şunlardır: Dijital Okuryazarlık, Eğitim Düzeyi, BİT Kullanımı (Portulans Institute, 2023).
c. Yönetişim: Bu bileşen, bir ülkenin dijital dönüşüm sürecindeki yönetişim mekanizmalarını değerlendirir. Göstergeler şunlardır: Dijital Politika ve Düzenlemeler, Siber Güvenlik, Veri Koruma ve Gizlilik (Portulans Institute, 2023).
d. Etki: Bu bileşen, BİT teknolojilerinin ekonomik ve sosyal etkilerini ölçer. Göstergeler şunlardır: Ekonomik Etki, Sosyal Etki, Çevresel Etki (Portulans Institute, 2023).

6.3.3. Küresel İnovasyon Endeksi

Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), ülkelerin inovasyon performanslarını ölçen ve karşılaştıran kapsamlı bir araçtır. Dünya Fikri Mülkiyet Örgütü (WIPO), Cornell Üniversitesi ve INSEAD iş birliğiyle her yıl yayınlanan bu endeks, inovasyonun ekonomik kalkınma ve sürdürülebilir büyüme üzerindeki kritik rolünü vurgular (WIPO, 2023). KİE, 80'den fazla göstergeyi kullanarak ülkelerin inovasyon ekosistemlerini analiz eder ve bu göstergeler, inovasyon girdileri ve inovasyon çıktıları olmak üzere iki ana bileşene ayrılır.

Bu bileşenler, bir ülkenin inovasyon kapasitesini ve bu kapasitenin ekonomik ve sosyal etkilerini ölçer.

Endüstri 4.0, güçlü bir inovasyon ekosistemine bağlıdır. KİE, bu ekosistemin temel bileşenlerini ölçerek, ülkelerin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadığını değerlendirmek için önemli bir gösterge sunar (Xu ve diğer., 2018).

KİE, iki ana bileşenden oluşur: İnovasyon Girdi Alt Endeksi ve İnovasyon Çıktı Alt Endeksi. Bu bileşenler, beşer alt bileşenle desteklenmekte ve her bir alt bileşen, çeşitli göstergelerle ölçülmektedir (WIPO, 2023).

İnovasyon Girdi Alt Endeksi: Bu alt endeks, bir ülkenin inovasyon kapasitesini destekleyen faktörleri ölçer. Beş ana bileşeni şunlardır: Kurumlar, İnsan Sermayesi ve Araştırma, Altyapı, Pazar Gelişmişliği, İş Gelişmişliği (WIPO, 2023).

İnovasyon Çıktı Alt Endeksi: Bu alt endeks, bir ülkenin inovasyon faaliyetlerinin sonuçlarını ölçer. İki ana bileşeni şunlardır: Bilgi ve Teknoloji Çıktıları, Yaratıcı Çıktılar (WIPO, 2023).

KİE, bir ülkenin inovasyon performansını ölçerek, küresel rekabet gücünü değerlendirmeye yardımcı olur. Endüstri 4.0, inovasyon kapasitesi yüksek ülkelerin küresel rekabette öne çıkmasını sağlar (Schwab, 2016). Örneğin, İsviçre, İsveç ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkeler, KİE'de üst sıralarda yer alarak Endüstri 4.0'ın öncüleri olmuştur (WIPO, 2023).

6.3.4. Küreselleşme Endeksi

Küreselleşme Endeksi, bir ülkenin ekonomik, sosyal ve politik açıdan küresel entegrasyon düzeyini ölçen kapsamlı bir endekstir. İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH Zürich) bünyesindeki KOF Ekonomi Enstitüsü tarafından geliştirilen bu endeks, ülkelerin küreselleşme süreçlerini değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla kullanılır (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

Endüstri 4.0, küresel tedarik zincirlerinin ve uluslararası yatırımların artmasını gerektirir. Küreselleşme Endeksi'nin ekonomik küreselleşme boyutu, bir ülkenin bu sürece ne ölçüde hazır olduğunu ölçer. Örneğin, yüksek ticaret hacmi ve doğrudan yabancı yatırımlar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlar (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

Endüstri 4.0, yalnızca teknolojik altyapıyı değil, aynı zamanda kültürel ve sosyal etkileşimleri de gerektirir. Küreselleşme Endeksi'nin sosyal küreselleşme boyutu, bir ülkenin kültürel ve bilgi paylaşımındaki entegrasyonunu ölçer. Örneğin, uluslararası öğrenci değişim programları ve bilimsel iş birlikleri, Endüstri 4.0'ın başarıya ulaşması için hayati öneme sahiptir (Kagermann ve diğer., 2013).

Endüstri 4.0'ın başarısı, uluslararası siyasi iş birliklerine ve kurumsal entegrasyona bağlıdır. Küreselleşme Endeksi'nin siyasi küreselleşme boyutu, bir ülkenin uluslararası örgütlere üyelik ve diplomatik ilişkilerini ölçer. Örneğin, uluslararası anlaşmalar ve diplomatik temsilcilikler, Endüstri 4.0'ın küresel düzeyde uygulanmasını kolaylaştırır (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

Küreselleşme Endeksi, üç ana boyut ve bu boyutlara ait göstergeler üzerinden hesaplanır. Her bir boyut, bir ülkenin küreselleşme sürecindeki farklı bir yönünü ölçer.

Ekonomik Küreselleşme: Bu boyut, bir ülkenin küresel ekonomiye entegrasyonunu ölçer. Göstergeler şunlardır: Ticaret Hacmi, Doğrudan Yabancı Yatırımlar (FDI), Sermaye Akışları, Vergi Politikaları (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

Sosyal Küreselleşme: Bu boyut, bir ülkenin kültürel ve sosyal açıdan küresel etkileşimlerini ölçer. Göstergeler şunlardır: Uluslararası Seyahat ve Turizm, Kültürel Değişim, Göç ve İletişim, Eğitim ve Bilgi Paylaşımı (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

Siyasi Küreselleşme: Bu boyut, bir ülkenin uluslararası siyasi iş birliklerini ve kurumsal entegrasyonunu ölçer. Göstergeler şunlardır: Uluslararası Örgütlere Üyelik, Uluslararası Anlaşmalar, Diplomatik İlişkiler (KOF Swiss Economic Institute, 2024).

6.3.5. Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi

Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi (Economic Freedom Index- EFI), Heritage Foundation tarafından yıllık olarak yayınlanan ve ülkelerin ekonomik özgürlük düzeylerini ölçen kapsamlı bir endekstir. Bu endeks, bireylerin ve işletmelerin ekonomik faaliyetlerini serbestçe yürütebilme kapasitelerini değerlendirir ve on iki adet niceliksel-niteliksel göstergeye dayanır (The Heritage Foundation, 2024).

EFI, dört temel bileşen üzerinden hesaplanır: Hukukun Üstünlüğü (Rule of Law), Devletin Etkinliği (Government Size), Düzenleyici Verimlilik (Regulatory Efficiency), Piyasa Açıklığı (Open Markets). Endeks, 0-100 arasında puanlanır ve ülkeleri "özgür",

"büyük ölçüde özgür", "orta düzeyde özgür", "çoğunlukla özgür olmayan" ve "baskıcı" şeklinde kategorize eder (The Heritage Foundation, 2024).

Endüstri 4.0'ın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, ekonomik özgürlüklerle doğrudan bağlantılıdır. EFI'nin ölçtüğü bileşenler, Endüstri 4.0'ın temel gereklilikleriyle örtüşür. Ekonomik özgürlüklerin yüksek olduğu ülkelerde, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği yenilikçi ortamın oluşması daha olasıdır. Özellikle, sağlam mülkiyet hakları ve etkin hukuki sistemler, işletmelerin Ar-Ge yatırımları yapmasını teşvik eder. Ayrıca, serbest ticaret politikaları ve minimal düzenlemeler, yeni teknolojilerin hızla benimsenmesini kolaylaştırır.

Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi, bir ülkenin Endüstri 4.0'a geçiş potansiyelini belirlemede önemli bir araçtır. Ekonomik özgürlük düzeyi yüksek ülkeler, dijital dönüşüm sürecinde avantaj sağlarken, düşük puanlı ülkelerin bu sürece adapte olabilmesi için, bürokratik engellerin azaltılması, AR-GE teşviklerinin artırılması, uluslararası iş birliklerinin geliştirilmesi gereklidir.

6.3.6. Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi

Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi (E-Government Development Index- EGDI), BM Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi (UNDESA) tarafından iki yılda bir yayınlanan ve ülkelerin dijital devlet kapasitelerini ölçen kapsamlı bir endekstir.

EGDI, üç temel alt endeksten oluşur (UNDESA, 2024): Çevrimiçi Hizmet Endeksi (Online Service Index – OSI, Telekomünikasyon Altyapı Endeksi (Telecommunication Infrastructure Index- TII), İnsan Sermayesi Endeksi (Human Capital Index- HCI). Endeks, 0-1 arasında puanlanır ve ülkeleri "çok yüksek", "yüksek", "orta" ve "düşük" dijital devlet kapasitesine sahip olarak sınıflandırır (UNDESA, 2024).

Endeksin üç bileşeni, Endüstri 4.0'ın uygulanabilirliği için kritik altyapıyı doğrudan destekler: Bu kriterler;

Telekomünikasyon Altyapı Endeksi (TII), Birleşmiş Milletler'in E-Devlet Gelişmişlik Endeksi (EGDI) kapsamında değerlendirdiği üç temel bileşenden biridir. TII, bir ülkenin dijital altyapı kapasitesini ölçer ve bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) yaygınlığına dair temel göstergeleri içerir.

Çevrimiçi Hizmet Endeksi (OSI), ülkelerin çevrimiçi kamu hizmetleri sunma kapasitesini ölçer ve bu kapasitenin Endüstri 4.0 uygulamalarıyla doğrudan ilişkili olduğu

görülmektedir. OSI, dijital devlet hizmetlerinin kapsamı, kullanıcıya özel hizmetlerin varlığı, veri paylaşımı yetenekleri ve mobil platformlardaki erişilebilirliği değerlendirmektedir (UNDESA, 2024).

Endeksin üçüncü bileşeni olan İnsani Sermaye (HCI), Endüstri 4.0'ın etkin biçimde uygulanabilmesi için gerekli olan nitelikli işgücünün varlığını ölçer. Bu kriter, okuryazarlık oranları, ortalama eğitim süresi ve dijital becerilerin yaygınlığı gibi göstergeleri içerir. Özellikle, Endüstri 4.0 teknolojilerinin (örneğin yapay zekâ, büyük veri analitiği, robotik sistemler) işletmelerde benimsenmesi için işgücünün teknik bilgiye sahip olması ve dijital araçları etkin şekilde kullanabilmesi gerekmektedir.

6.3.7. Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi

Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi (Government AI Readiness Index), Oxford Insights tarafından geliştirilen ve ülkelerin yapay zekâ (AI) teknolojilerini benimseme ve uygulama kapasitelerini ölçen kapsamlı bir değerlendirme aracıdır. Endeks, üç temel bileşen üzerinden hesaplanır (Oxford Insights, 2024).

a. *Yönetişim ve Etik:* AI politikaları, veri güvenliği ve etik düzenlemeler.
b. *Teknolojik Altyapı:* Dijital ağlar, bulut bilişim ve veri merkezleri.
c. *Yetenek ve Kapasite:* AR-GE yatırımları, nitelikli iş gücü ve akademik iş birlikleri.

Endeks, 0-100 arasında puanlanır ve ülkeleri "çok hazır", "hazır" ve "kısmen hazır" şeklinde kategorize eder. Örneğin, 2023 raporuna göre Singapur (85,7), ABD (84,3) ve Birleşik Krallık (78,3) ilk sıralarda yer alırken, üst-orta gelirli ülkelerden Malezya (62,1) ve Türkiye (54,8) orta segmentte bulunmaktadır (Oxford Insights, 2024).

Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan akıllı üretim sistemleri, IoT ve siber-fiziksel entegrasyon, yapay zekâ teknolojileri olmadan işlevsel olamaz. Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi'nin ölçtüğü kriterler, Endüstri 4.0'ın başarısı için kritik rol oynar:

Veri Yönetimi ve Güvenliği: Endüstri 4.0, büyük veri analitiği ve gerçek zamanlı veri paylaşımına dayanır. AI hazırlık endeksinde yüksek puan alan ülkeler (ör. Estonya), veri koruma kanunları ve siber güvenlik altyapısı sayesinde akıllı fabrikaların verimliliğini artırır (Lee ve Kao, 2021).

AR-GE ve İnovasyon Politikaları: AI'a yönelik kamu yatırımları (ör. Çin'in "Yeni Nesil AI Geliştirme Planı"), Endüstri 4.0'da kullanılan otonom robotlar ve makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesini destekler (Xu ve diğer., 2018).

İş Gücü Yetkinlikleri: Endeksin "Yetenek ve Kapasite" bileşeni, AI mühendisliği ve dijital becerileri ölçer. Bu, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği nitelikli insan kaynağı ile doğrudan ilişkilidir (World Economic Forum, 2023).

Kriterin teze olan katkısı ise ülkelerin AI hazırlık puanları, Endüstri 4.0 performansını değerlendirmede objektif bir kriter olarak kullanılır. Düşük puanlı ülkelerin, dijital dönüşüm için AI stratejilerini gözden geçirmesi gerektiği vurgulanır.

6.3.8. Küresel Siber Güvenlik Endeksi

Küresel Siber Güvenlik Endeksi (Global Cybersecurity Index- GCI), Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından geliştirilen ve ülkelerin siber güvenlik kapasitelerini ölçen kapsamlı bir değerlendirme aracıdır. Endeks, beş temel bileşen üzerinden hesaplanır (ITU-2, 2024):

a. *Yasal Önlemler:* Siber suçlarla mücadele yasaları ve düzenlemeler.
b. *Teknik Kapasite:* Siber güvenlik altyapısı ve teknolojik yetkinlikler.
c. *Organizasyonel Yapı:* Ulusal siber güvenlik stratejileri ve kurumsal mekanizmalar.
d. *Kapasite Geliştirme:* Eğitim programları ve farkındalık çalışmaları.
e. *İş Birliği:* Uluslararası ortaklıklar ve bilgi paylaşımı.

Endekste her bir bileşen 0-20 arasında puanlanır. Ülkeler "lider", "yüksek performanslı", "gelişmekte olan" ve "başlangıç seviyesinde" olarak sınıflandırır (ITU, 2024).

Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan akıllı üretim sistemleri, nesnelerin interneti (IoT) ve bulut bilişim teknolojileri, siber güvenlik olmadan işlevsel olamaz. Küresel Siber Güvenlik Endeksi'nin ölçtüğü kriterler, Endüstri 4.0'ın başarısı için kritik rol oynar:

Veri Bütünlüğü ve Gizliliği: Endüstri 4.0 sistemleri, büyük miktarda hassas verinin işlenmesini ve paylaşılmasını gerektirir. GCI'de yüksek puan alan ülkeler (ör. Singapur), veri şifreleme ve erişim kontrol mekanizmaları sayesinde akıllı fabrikalardaki siber saldırı risklerini azaltır (Smith ve Johnson, 2022).

Kritik Altyapı Koruması: Endüstri 4.0, enerji şebekeleri ve üretim hatları gibi kritik altyapıların siber-fiziksel entegrasyonuna dayanır. GCI'nin "teknik kapasite" bileşeni, bu altyapıların korunmasında kullanılan güvenlik protokollerini değerlendirir (Lee ve diğer., 2020).

İş Sürekliliği ve Risk Yönetimi: Siber saldırılar, üretim süreçlerinde aksamalara yol açabilir. GCI'de yüksek puan alan ülkeler (ör. Almanya), siber olaylara müdahale ekipleri ve

felaket kurtarma planlarıyla Endüstri 4.0 sistemlerinin sürekliliğini sağlar (World Economic Forum-2, 2023).

Bu tez kapsamında ülkelere ait veriler eklenirken, ilgili kriterin beş bileşeninden aldıkları skorların aritmetik ortalamaları hesaplanarak tek bir değer elde edilmiş ve bu şekilde analize dahil edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, söz konusu kriterin raporlandığı kaynakta ülkelerin değerlendirilmesinde tüm bileşenlerin birlikte ele alınması ve herhangi birine öncelik verilmeden ülkelere ait gruplandırma yapılmasıdır. Kriterin bu çalışmaya katkısı ise, ülkelerin siber güvenlik düzeylerini yansıtması bakımından önem taşımaktadır. Bu kapsamda, düşük skor elde eden ülkelerin Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde karşılaşabilecekleri zayıf yönlerin belirlenmesi mümkün olmakta; ayrıca bu ülkelerin siber güvenlik altyapılarını güçlendirmek amacıyla ulusal stratejiler geliştirmeleri gerektiği vurgulanmaktadır.

6.3.9. Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla

Kişi başına gayrisafi yurtiçi hasıla (GDP per capita), bir ülkenin ekonomik performansını ve vatandaşlarının refah düzeyini ölçen temel makroekonomik göstergelerden biridir. Satın alma gücü paritesine (PPP) göre düzeltilmiş veriler, ülkeler arası karşılaştırmalar için daha gerçekçi sonuçlar sunar (World Bank, 2024). Kişi başına GSYİH, bir ülkenin toplam ekonomik çıktısının nüfusuna bölünmesiyle hesaplanır. Satın Alma Gücü Paritesi (SAGP) ile düzeltilmiş versiyonu (GDP per capita, PPP), uluslararası karşılaştırmalarda fiyat farklılıklarını dengeleyerek daha gerçekçi sonuçlar sunar. Hesaplamada kullanılan temel bileşenler Tablo 3'de gösterilmiştir.

Endüstri 4.0 ile Derin İlişkisi:

a. Teknoloji Yatırım Kapasitesi (Doğrudan Etki)

Veri: 10.000 USD'den yüksek kişi başı GSYİH'ye sahip ülkeler, Endüstri 4.0 yatırımlarında yıllık ortalama %7,2 büyüme göstermiştir. (WIPO, 2024).

Örnek Vaka: Güney Kore'nin kişi başına 48.000 USD GSYİH'si, 2023'te sanayi robot yoğunluğunda dünya birinciliği (1.000 işçiye 1.012 robot) ile sonuçlanmıştır.

b. Beşerî Sermaye Kalitesi (Dolaylı Etki)

Eğitim Harcamaları: GSYİH'nin %2,5'inden fazlasını eğitime ayıran ülkelerde Endüstri 4.0 beceri açığı %37 daha düşük oluşmuştur (OECD, 2023).

STEM Mezunları: Kişi başına 30.000 USD üzeri GSYİH'de mühendislik mezunlarının oranı 2,3 kat fazla olduğu görülmüştür.

c. Kurumsal Altyapı (Aracı Değişken)

Regülasyon Kalitesi: 1 puanlık GSYİH artışı, dijital dönüşüm yasalarının uygulanma hızını %1,8 arttığı görülmüştür.

Finansal Sistemler: Yüksek GSYİH'li ülkelerde KOBİ'lerin Endüstri 4.0 kredilerine erişim oranı %64 iken düşük gelirlilerde %22 olduğu görülmektedir.

Tablo 3 - Kişi başına GSYİH, Satın Alma Gücü Paritesi temel bileşenleri

GSYİH Bileşenleri:	***SAGP Düzeltme Faktörleri:***
Tüketim Harcamaları: Hanehalkı ve devletin mal/hizmet tüketimi (Örn: Endüstri 4.0 teknolojilerine yapılan kamu yatırımları)	150'den fazla mal/hizmet sepetinin fiyat karşılaştırması.
Yatırımlar: Makine-teçhizat ve AR-GE harcamaları (Örn: Akıllı fabrika kurulum maliyetleri)	Dijital ekonomi ürünlerinin (bulut hizmetleri, yazılım lisansları) fiyatlandırması
Net İhracat: Yüksek teknoloji ürünleri ticareti (Örn: IoT cihazları ihracatı)	Emek verimliliği ve teknoloji adaptasyon maliyetleri

Kaynak: World Bank (2024)

GSYİH bir ülke için ne kadar yüksek olursa o ülkenin Endüstri 4.0 bileşenlerini kullanma oranları da o denli artmaktadır. GSYİH Endüstri 4.0 adaptasyon ilişkisi Tablo 4'de verilmiştir. 15.000 USD altında GSYİH'ye sahip olan ülkelerde robot ve bulut bilişim yoğunluğu düşük iken orta ve yüksek GSYİH'ye sahip olan ülkelerde bu oran artmaktadır.

Tablo 4 - GSYİH- Endüstri 4.0 Adaptasyon İlişkisi

GSYİH (PPP) Bandı	Robot Yoğunluğu (1000 işçiye)	Bulut Bilişim Kullanımı (%)
<15.000 USD	12	28
15.000-30.000 USD	89	53
>30.000 USD	312	82

Kaynak: International Federation of Robotics (2024)

6.4. Bulgular

Bu bölümde ülkelere ait ölçüt verileri çok kriterli karar verme yöntemleri ile analiz edilmiştir.

Tablo 5'te analizde kullanılacak kriterlerin kodları ve bu kriterlerin türleri gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan kriterler C1 ile C9 arasında kodlanmış olup, tamamı fayda (maksimizasyon) yönlüdür. Bu durum, kriterlere ait değerlerin artış göstermesinin, ilgili performansın daha yüksek olduğu ve daha iyi bir durumu temsil ettiği anlamına gelmektedir. Yani, analiz kapsamında ele alınan tüm kriterlerde daha yüksek değerlere ulaşmak, daha iyi bir performans olarak kabul edilmektedir.

Tablo 5 - Kriterlere Ait Kod ve Fayda - Maliyet Tablosu

Kriterler	**KOD**	**TÜR**
Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi	C1	Fayda
Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi	C2	Fayda
Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi	C3	Fayda
Küresel İnovasyon Endeksi	C4	Fayda
Küreselleşme Endeksi	C5	Fayda
Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi	C6	Fayda
Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi	C7	Fayda
Küresel Siber Güvenlik Endeksi	C8	Fayda
(GSYİH) / (SAGP)$, (GDP per capita, PPP$)	C9	Fayda

Tablo 6'da analizde değerlendirilen ülkeler (alternatifler) ve bu ülkelere atanan kodlar gösterilmektedir. Analiz kapsamında seçilen alternatifler, Küresel İnovasyon Endeksi'nde yer alan üst-orta gelirli ülkeler arasından seçilmiş ve A1 ile A14 arasında kodlanmıştır. Kodlama sistemi, analizde kullanılan yöntemlerin daha düzenli ve okunabilir bir formatta sunulabilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde her bir alternatif, ilgili analizlerde kolaylıkla takip edilebilmiştir.

Tablo 6 - Alternatif KOD Tablosu

Alternatifler	**KOD**
Arnavutluk	A1
Ermenistan	A2
Bosna Hersek	A3
Bulgaristan	A4
Kolombiya	A5
El Salvador	A6
Gürcistan	A7
Malezya	A8
Mauritius	A9
Meksika	A10
Kuzey Makedonya	A11
Peru	A12
Sırbistan	A13
Türkiye	A14

Bu çalışmada, Endüstri 4.0 düzeylerinin karşılaştırmalı analizi için iki farklı ağırlıklandırma yöntemi (CRITIC ve Entropi) kullanılmış ve altı farklı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniği (RAWEC, EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS, SAW) ile sıralama yapılmıştır. Aşağıda, her bir yöntemin metodolojik adımları ve sonuçlarına ilişkin açıklamalar sunulmaktadır.

6.4.1. CRITIC Yöntemi ile Ağırlıklandırma

CRITIC yöntemiyle belirlenecek kriter ağırlıkları hesaplama adımları aşağıda gösterilmiştir.

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de sunulan karar matrisi, ülkelerin Endüstri 4.0 performanslarını ölçen kriterlerdeki ham verileri yansıtmaktadır. Analiz edilen alternatiflere (ülkelere) ilişkin tüm

kriter değerlerini içeren karar matrisi hazırlanmıştır. Toplamda 14 alternatif (A1–A14) ve 9 kriter (C1–C9) bulunmaktadır. Her bir alternatifin kriterler üzerindeki performansı ölçülerek tabloya aktarılmıştır. Standart sapma satırı, alternatifler arasında her bir kriter değeri için farklılaşmayı yansıtmaktadır. Standart sapma sonuçları, C5 (Küreselleşme Endeksi) ve C8 (Siber Güvenlik Endeksi) gibi kriterlerin, ülkeler arasında daha fazla farklılaşmaya neden olduğunu ve dolayısıyla CRITIC yönteminde daha yüksek ağırlık alabileceğini göstermektedir. Tabloda ayrıca bu yöntemde ve bundan sonraki yöntemlerde kullanılmak üzere maksimum, minimum, ortalama ve toplam satırları oluşturulmuştur. Maksimum satırı, alternatiflere ait kriter değer satırındaki en yüksek değeri, minimum satırı ise en düşük değeri yansıtmaktadır. Maks – Min satırı, en yüksek değer ile en düşük değer arasındaki farkı temsil etmektedir. Ortalama satırı, alternatiflere ait kriter değerlerinin aritmetik ortalamasını temsil etmektedir. Toplam satırı, alternatiflere ait her bir kriter değerinin toplamını yansıtmaktadır.

Tablo 7 - CRITIC Yöntemi / Karar Matrisi Tablosu

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	84,7	0,8	44,67	24,5	65,6223	64,8	45,47	17,302	19.566
A2	86,4	0,8422	49,54	29	68,4108	64,9	44,51	10,762	19.745
A3	78,6	0,6329	43,2	25,5	66,3715	62	37,02	6,752	19.634
A4	88,7	0,8145	53,15	38,5	77,5180	68,5	60,64	14,912	33.780
A5	73,2	0,7793	49,64	29,2	64,4586	59,2	59,33	13,174	19.482
A6	66,1	0,5988	39,36	20,6	65,0458	54,4	34,09	11,292	11.717
A7	87,8	0,7792	49,3	30,4	70,1365	68,4	46,92	18,384	22.357
A8	95	0,8111	57,88	40,5	80,6902	65,7	71,4	19,764	37.083
A9	84,2	0,7506	51,17	30,6	71,2239	71,5	53,94	20	29.349
A10	80,7	0,785	50,32	30,4	72,9237	62	53,29	17,154	24.967
A11	82	0,707	45,92	29,9	68,5032	61,4	45,12	13,178	21.391
A12	76,4	0,807	44,76	26,7	66,8907	64,8	57,11	16,748	15.894
A13	87,7	0,8618	53,91	32,3	78,1352	62,7	58,49	19,364	26.074
A14	87,5	0,8913	52,65	39	70,5114	56,2	60,63	20	41.888
Standart Sapma	0,2554	0,2792	0,2652	0,2847	0,3180	0,2747	0,2751	0,3084	0,2789
Maksimum	95	0,8913	57,88	40,5	80,6902	71,5	71,4	20	41.888
Minimum	66,1	0,5988	39,36	20,6	64,4586	54,4	34,09	6,752	11.717
Maks – Min	28,9	0,2925	18,52	19,9	16,2316	17,1	37,31	13,248	30.171
Ortalama	82,7857	0,7758	48,9621	30,5071	70,4601	63,3214	51,9971	15,6276	24.494,7857
Toplam	1.159	10,8607	685,47	427,1	986,4417	886,5	727,96	218,786	342.927

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Karar matrisindeki veriler farklı ölçeklerde olduğu için, tüm kriter değerleri karşılaştırılabilir hale getirilmek amacıyla normalize edilmiştir. Normalize edilmiş değerler 0 ile 1 arasında ifade edilmiştir. Bu süreçte, kriterlerin fayda ya da maliyet olma özelliklerine bakılmaksızın, doğrudan normalize edilmesi tercih edilmiştir. Böylece kriterler arasındaki farklar ortadan kaldırılmış ve değerlendirme daha objektif hale getirilmiştir. Normalize edilmiş matris Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8 - CRITIC Yöntemi / Normalize Edilmiş Karar Matrisi Tablosu

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,6436	0,6879	0,2867	0,1960	0,0717	0,6082	0,3050	0,7963	0,2602
A2	0,7024	0,8321	0,5497	0,4221	0,2435	0,6140	0,2793	0,3027	0,2661
A3	0,4325	0,1166	0,2073	0,2462	0,1179	0,4444	0,0785	0,0000	0,2624
A4	0,7820	0,7374	0,7446	0,8995	0,8046	0,8246	0,7116	0,6159	0,7313
A5	0,2457	0,6171	0,5551	0,4322	0,0000	0,2807	0,6765	0,4848	0,2574
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0362	0,0000	0,0000	0,3427	0,0000
A7	0,7509	0,6168	0,5367	0,4925	0,3498	0,8187	0,3439	0,8780	0,3527
A8	1,0000	0,7258	1,0000	1,0000	1,0000	0,6608	1,0000	0,9822	0,8407
A9	0,6263	0,5190	0,6377	0,5025	0,4168	1,0000	0,5320	1,0000	0,5844
A10	0,5052	0,6366	0,5918	0,4925	0,5215	0,4444	0,5146	0,7852	0,4392
A11	0,5502	0,3699	0,3542	0,4673	0,2492	0,4094	0,2956	0,4851	0,3206
A12	0,3564	0,7118	0,2916	0,3065	0,1498	0,6082	0,6170	0,7545	0,1384
A13	0,7474	0,8991	0,7856	0,5879	0,8426	0,4854	0,6540	0,9520	0,4759
A14	0,7405	1,0000	0,7176	0,9246	0,3729	0,1053	0,7113	1,0000	1,0000

3) Adım: İlişki katsayı matrisini oluşturulması:

Bu adımda, kriterler arasındaki korelasyon değerleri hesaplanarak ilişki katsayı matrisi elde edilmiştir. Tablo 9'da ρ_{jk} değeri, her bir kriter çiftinin birbiriyle olan doğrusal ilişki düzeyini yansıtır. Örneğin, C3 ile C4 arasında yüksek bir ilişki görülürken ($\rho = 0,9087$), C2 ile C6 arasında daha zayıf bir ilişki söz konusudur ($\rho = 0,2567$). Bu değerler, kriterler arasındaki bilgi tekrarının belirlenmesinde önemli rol oynar

Tablo 9 - CRITIC Yöntemi / İlişki Katsayı Matrisi Tablosu (ρ_{jk})

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	0,6700	0,8030	0,7813	0,7505	0,5710	0,5683	0,5497	0,7506
C2	0,6700	1	0,7337	0,6544	0,4735	0,2567	0,7189	0,6469	0,5903
C3	0,8030	0,7337	1	0,9087	0,8372	0,3875	0,8604	0,6326	0,8284
C4	0,7813	0,6544	0,9087	1	0,7932	0,2560	0,8287	0,5466	0,9359
C5	0,7505	0,4735	0,8372	0,7932	1	0,3922	0,6858	0,5453	0,7126
C6	0,5710	0,2567	0,3875	0,2560	0,3922	1	0,2591	0,3290	0,1964
C7	0,5683	0,7189	0,8604	0,8287	0,6858	0,2591	1	0,6844	0,7264
C8	0,5497	0,6469	0,6326	0,5466	0,5453	0,3290	0,6844	1	0,5975
C9	0,7506	0,5903	0,8284	0,9359	0,7126	0,1964	0,7264	0,5975	1

Tablo 10'da her bir kriter çiftinin bilgi tekrarını azaltmak amacıyla ilişki katsayılarının 1'den çıkarılmasıyla elde edilen değerler kullanılmıştır. Bu matris, kriterler arasındaki farklılık ve çelişkiyi yani "karşıtlık yoğunluğunu" ifade eder. Daha düşük korelasyona sahip kriterler, diğerlerine kıyasla daha fazla özgün bilgi taşıdığından, bu durum ağırlıklandırmada belirleyici olacaktır.

Tablo 10 - CRITIC Yöntemi / İlişki Katsayı Matrisi Tablosu (1- ρ_{jk})

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	0	0,3300	0,1970	0,2187	0,2495	0,4290	0,4317	0,4503	0,2494
C2	0,3300	0	0,2663	0,3456	0,5265	0,7433	0,2811	0,3531	0,4097
C3	0,1970	0,2663	0	0,0913	0,1628	0,6125	0,1396	0,3674	0,1716
C4	0,2187	0,3456	0,0913	0	0,2068	0,7440	0,1713	0,4534	0,0641
C5	0,2495	0,5265	0,1628	0,2068	0	0,6078	0,3142	0,4547	0,2874
C6	0,4290	0,7433	0,6125	0,7440	0,6078	0	0,7409	0,6710	0,8036
C7	0,4317	0,2811	0,1396	0,1713	0,3142	0,7409	0	0,3156	0,2736
C8	0,4503	0,3531	0,3674	0,4534	0,4547	0,6710	0,3156	0	0,4025
C9	0,2494	0,4097	0,1716	0,0641	0,2874	0,8036	0,2736	0,4025	0

Tablo 9 ve 10, CRITIC yönteminin temelini oluşturan kriterler arası ilişki ve çelişki matrislerini göstermektedir. Bu bulgular, C6'nın nihai ağırlıklandırmada daha kritik bir rol oynayabileceğine işaret etmektedir.

4) Adım: C_{ij} değerlerinin hesaplanması:

Tablo 11'de sunulan standart sapma değerleri, normalize edilmiş veri setindeki kriterlerin dağılımını göstermektedir. Bu değerler, kriterin veri dağılımındaki varyasyonunu ve dolayısıyla bilgi taşıma kapasitesini gösterir.

Tablo 11 - CRITIC Yöntemi / Kriterlere Ait Normalize Matris Standart Sapma Tablosu

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Standart Sapma	0,2554	0,2792	0,2652	0,2847	0,3180	0,2747	0,2751	0,3084	0,2789

Tablo 12'de C_{ij} değerleri, her bir kriterin standart sapma değeri ile diğer kriterlerle olan karşıtlık yoğunluklarının çarpılması sonucu elde edilmiştir. Bu değerler, kriterin hem kendi içinde bilgi taşıma gücünü hem de diğer kriterlerle olan özgünlüğünü yansıtır. C6 kriteri 1,4703 ile en yüksek bilgi miktarına sahip kriter olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuç, C6'nın hem değişkenliğinin hem de diğer kriterlerle olan düşük ilişkili yapısının yüksek olduğunu gösterir.

Tablo 12 - CRITIC Yöntemi / Kriterlerinde Yer Alan Karşıtlık Yoğunluğu ve Paradokslardan Elde Edilen Bilgi Miktarı Değerinin Hesaplanması Tablosu (C_{ij})

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	TOPLAM
C_{ij}	0,6526	0,9089	0,5326	0,6534	0,8935	1,4703	0,7341	1,0697	0,7424	7,6575

5) Adım: Kriter ağırlıklarının (w_j) hesaplanması:

Tablo 13'de, her bir kriterin bilgi miktarına göre ağırlıkları hesaplanmış ve toplam ağırlık 1 olacak şekilde normalize edilmiştir. En yüksek ağırlık değeri %19,20 ile C6 (Ekonomik Özgürlük Endeksi) kriterine aitken, en düşük ağırlık %6,96 ile C3 (Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi) kriterine aittir. Bu durum, karar sürecinde C6'nın diğer kriterlere kıyasla daha belirleyici olduğunu, C3'ün ise görece daha az etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 13 - CRITIC Yöntemi / Kriterlere Ait Ağırlık Tablosu (w_j)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	TOPLAM
w_j	0,0852	0,1187	0,0696	0,0853	0,1167	0,1920	0,0959	0,1397	0,0970	1,0000

6.4.2. CRITIC Ağırlıklı RAWEC Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalizasyonu:

Tablo 14'de çalışma kapsamında ele alınan tüm kriterlerin "fayda" yönlü olması dikkate alınarak, karar matrisinin normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Fayda türündeki kriterler için yapılan normalizasyon işlemi, her bir alternatifin kriter bazında en iyi (maksimum) performans gösteren alternatif değerine oranlanması esasına dayanmaktadır.

Tablo 14 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Fayda Kriteri Tablosu (n_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000
Standart Sapma	0,0777	0,0916	0,0848	0,1399	0,0640	0,0657	0,1438	0,2043	0,2009

Tablo 15'da teorik sürecin bir parçası olarak, kriterlerin tümü fayda yönlü olmasına rağmen, RAWEC yönteminin yapısal gerekliliği doğrultusunda maliyet kriteri yaklaşımı da modellenmiştir. Maliyet türü normalizasyon işlemi, her bir kriter için minimum değerin ilgili alternatif değerine oranlanması prensibine dayanmaktadır. Bu işlem sayesinde, maliyet yönlü yaklaşıma göre normalize edilmiş bir karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 15 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Maliyet Kriteri Tablosu (n'_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,7804	0,7485	0,8811	0,8408	0,9823	0,8395	0,7497	0,3902	0,5988
A2	0,7650	0,7110	0,7945	0,7103	0,9422	0,8382	0,7659	0,6274	0,5934
A3	0,8410	0,9461	0,9111	0,8078	0,9712	0,8774	0,9209	1,0000	0,5968
A4	0,7452	0,7352	0,7405	0,5351	0,8315	0,7942	0,5622	0,4528	0,3469
A5	0,9030	0,7684	0,7929	0,7055	1,0000	0,9189	0,5746	0,5125	0,6014
A6	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9910	1,0000	1,0000	0,5979	1,0000
A7	0,7528	0,7685	0,7984	0,6776	0,9190	0,7953	0,7266	0,3673	0,5241
A8	0,6958	0,7383	0,6800	0,5086	0,7988	0,8280	0,4775	0,3416	0,3160
A9	0,7850	0,7978	0,7692	0,6732	0,9050	0,7608	0,6320	0,3376	0,3992
A10	0,8191	0,7628	0,7822	0,6776	0,8839	0,8774	0,6397	0,3936	0,4693
A11	0,8061	0,8470	0,8571	0,6890	0,9410	0,8860	0,7555	0,5124	0,5478
A12	0,8652	0,7420	0,8794	0,7715	0,9636	0,8395	0,5969	0,4032	0,7372
A13	0,7537	0,6948	0,7301	0,6378	0,8250	0,8676	0,5828	0,3487	0,4494
A14	0,7554	0,6718	0,7476	0,5282	0,9142	0,9680	0,5623	0,3376	0,2797
Standart Sapma	0,0778	0,0925	0,0848	0,1318	0,0644	0,0660	0,1469	0,1796	0,1864

3) Adım: Kriter ağırlığından sapmanın hesaplanması:

Tablo 16'da her alternatif için normalize edilmiş fayda verilerinin maksimum değerden ne kadar sapma gösterdiği hesaplanmıştır. Normalize edilmiş değerler üzerinden, her bir kriter için $1 - n_{ij}$ işlemi yapılmıştır. Buradaki sapmalar, alternatifin ideal (maksimum) performansa ne kadar uzak olduğunu gösterir. Sapma değeri ne kadar küçükse, alternatif ilgili kriter de o kadar başarılıdır.

Tablo 16 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu $(1 - n_{ij})$

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,1084	0,1024	0,2282	0,3951	0,1867	0,0937	0,3632	0,1349	0,5329
A2	0,0905	0,0551	0,1441	0,2840	0,1522	0,0923	0,3766	0,4619	0,5286
A3	0,1726	0,2899	0,2536	0,3704	0,1775	0,1329	0,4815	0,6624	0,5313
A4	0,0663	0,0862	0,0817	0,0494	0,0393	0,0420	0,1507	0,2544	0,1936
A5	0,2295	0,1257	0,1424	0,2790	0,2012	0,1720	0,1690	0,3413	0,5349
A6	0,3042	0,3282	0,3200	0,4914	0,1939	0,2392	0,5225	0,4354	0,7203
A7	0,0758	0,1258	0,1482	0,2494	0,1308	0,0434	0,3429	0,0808	0,4663
A8	0,0000	0,0900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0811	0,0000	0,0118	0,1147
A9	0,1137	0,1579	0,1159	0,2444	0,1173	0,0000	0,2445	0,0000	0,2993
A10	0,1505	0,1193	0,1306	0,2494	0,0963	0,1329	0,2536	0,1423	0,4040
A11	0,1368	0,2068	0,2066	0,2617	0,1510	0,1413	0,3681	0,3411	0,4893
A12	0,1958	0,0946	0,2267	0,3407	0,1710	0,0937	0,2001	0,1626	0,6206
A13	0,0768	0,0331	0,0686	0,2025	0,0317	0,1231	0,1808	0,0318	0,3775
A14	0,0789	0,0000	0,0904	0,0370	0,1261	0,2140	0,1508	0,0000	0,0000

Tablo 17'de her alternatif için normalize edilmiş değerlerin maliyet kriterleri perspektifiyle değerlendirilmiş maksimum sapmaları gösterilmiştir. Bu adımda, verilerin bir kısmı (özellikle maliyet gibi "az olması istenen" kriterler için) ayrıca normalize edilerek $1 - \mathrm{n'_{ij}}$ işlemi yapılmıştır. Maliyet kriterlerinde değerin büyük olması kötü kabul edildiğinden, burada sapmalar farklı şekilde analiz edilir. Sonuçlar, alternatiflerin maliyet açısından maksimumdan ne kadar uzaklaştığını gösterir.

Tablo 17 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu $(1 - n'_{ij})$

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,2196	0,2515	0,1189	0,1592	0,0177	0,1605	0,2503	0,6098	0,4012
A2	0,2350	0,2890	0,2055	0,2897	0,0578	0,1618	0,2341	0,3726	0,4066
A3	0,1590	0,0539	0,0889	0,1922	0,0288	0,1226	0,0791	0,0000	0,4032
A4	0,2548	0,2648	0,2595	0,4649	0,1685	0,2058	0,4378	0,5472	0,6531
A5	0,0970	0,2316	0,2071	0,2945	0,0000	0,0811	0,4254	0,4875	0,3986
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0090	0,0000	0,0000	0,4021	0,0000

A7	0,2472	0,2315	0,2016	0,3224	0,0810	0,2047	0,2734	0,6327	0,4759
A8	0,3042	0,2617	0,3200	0,4914	0,2012	0,1720	0,5225	0,6584	0,6840
A9	0,2150	0,2022	0,2308	0,3268	0,0950	0,2392	0,3680	0,6624	0,6008
A10	0,1809	0,2372	0,2178	0,3224	0,1161	0,1226	0,3603	0,6064	0,5307
A11	0,1939	0,1530	0,1429	0,3110	0,0590	0,1140	0,2445	0,4876	0,4522
A12	0,1348	0,2580	0,1206	0,2285	0,0364	0,1605	0,4031	0,5968	0,2628
A13	0,2463	0,3052	0,2699	0,3622	0,1750	0,1324	0,4172	0,6513	0,5506
A14	0,2446	0,3282	0,2524	0,4718	0,0858	0,0320	0,4377	0,6624	0,7203

CRITIC yöntemi göre elde edilmiş kriterlerin ağırlıkları Tablo 13'de belirtildiği üzere bu aşamada yönteme dâhil edilmiştir.

Tablo 18'de her alternatif için fayda kriterlerindeki sapmalar, ilgili kriter ağırlıklarıyla çarpılmıştır. Sonra her alternatif için tüm kriterlerdeki bu çarpım değerleri toplanmıştır. Toplam değer ne kadar küçükse, alternatif fayda açısından maksimum performansa o kadar yakındır.

Tablo 18 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0092	0,0122	0,0159	0,0337	0,0218	0,0180	0,0348	0,0188	0,0517	0,2161
A2	0,0077	0,0065	0,0100	0,0242	0,0178	0,0177	0,0361	0,0645	0,0513	0,2359
A3	0,0147	0,0344	0,0176	0,0316	0,0207	0,0255	0,0462	0,0925	0,0515	0,3348
A4	0,0057	0,0102	0,0057	0,0042	0,0046	0,0081	0,0144	0,0355	0,0188	0,1072
A5	0,0196	0,0149	0,0099	0,0238	0,0235	0,0330	0,0162	0,0477	0,0519	0,2404
A6	0,0259	0,0390	0,0223	0,0419	0,0226	0,0459	0,0501	0,0608	0,0698	0,3784
A7	0,0065	0,0149	0,0103	0,0213	0,0153	0,0083	0,0329	0,0113	0,0452	0,1659
A8	0,0000	0,0107	0,0000	0,0000	0,0000	0,0156	0,0000	0,0016	0,0111	0,0390
A9	0,0097	0,0187	0,0081	0,0209	0,0137	0,0000	0,0234	0,0000	0,0290	0,1235
A10	0,0128	0,0142	0,0091	0,0213	0,0112	0,0255	0,0243	0,0199	0,0392	0,1774
A11	0,0117	0,0245	0,0144	0,0223	0,0176	0,0271	0,0353	0,0477	0,0474	0,2480
A12	0,0167	0,0112	0,0158	0,0291	0,0200	0,0180	0,0192	0,0227	0,0602	0,2128
A13	0,0065	0,0039	0,0048	0,0173	0,0037	0,0236	0,0173	0,0044	0,0366	0,1182
A14	0,0067	0,0000	0,0063	0,0032	0,0147	0,0411	0,0145	0,0000	0,0000	0,0864

Tablo 19'da her alternatif için maliyet kriterlerindeki sapmalar, ilgili kriter ağırlıklarıyla çarpılarak hesaplanmıştır. Alternatiflerin toplam maliyet değerleri elde

edilmiştir. Toplam değer ne kadar küçükse, alternatif maliyet açısından daha iyidir (daha düşük maliyet etkisi vardır).

Tablo 19 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (v'_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0187	0,0299	0,0083	0,0136	0,0021	0,0308	0,0240	0,0852	0,0389	0,2514
A2	0,0200	0,0343	0,0143	0,0247	0,0067	0,0311	0,0224	0,0521	0,0394	0,2451
A3	0,0136	0,0064	0,0062	0,0164	0,0034	0,0235	0,0076	0,0000	0,0391	0,1161
A4	0,0217	0,0314	0,0180	0,0397	0,0197	0,0395	0,0420	0,0764	0,0633	0,3518
A5	0,0083	0,0275	0,0144	0,0251	0,0000	0,0156	0,0408	0,0681	0,0386	0,2384
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000	0,0562	0,0000	0,0572
A7	0,0211	0,0275	0,0140	0,0275	0,0094	0,0393	0,0262	0,0884	0,0461	0,2996
A8	0,0259	0,0311	0,0223	0,0419	0,0235	0,0330	0,0501	0,0920	0,0663	0,3861
A9	0,0183	0,0240	0,0161	0,0279	0,0111	0,0459	0,0353	0,0925	0,0582	0,3293
A10	0,0154	0,0282	0,0151	0,0275	0,0135	0,0235	0,0345	0,0847	0,0515	0,2940
A11	0,0165	0,0182	0,0099	0,0265	0,0069	0,0219	0,0234	0,0681	0,0438	0,2353
A12	0,0115	0,0306	0,0084	0,0195	0,0042	0,0308	0,0386	0,0834	0,0255	0,2526
A13	0,0210	0,0362	0,0188	0,0309	0,0204	0,0254	0,0400	0,0910	0,0534	0,3371
A14	0,0208	0,0390	0,0176	0,0403	0,0100	0,0061	0,0420	0,0925	0,0698	0,3381

4) Adım: RAWEC yönteminin değerinin hesaplanması:

Tablo 20'de RAWEC yöntemiyle her alternatif için nihai performans değerleri (Q_i) hesaplanmış ve buna göre sıralama yapılmıştır. Q_i değeri, her alternatifin hem fayda kriterlerinden hem de maliyet kriterlerinden elde ettiği toplam sapmalara dayalı olarak bulunmuştur. Q_i değeri ne kadar yüksekse, alternatif o kadar üst sırada yer almaktadır. Negatif Q_i değerleri, alternatifin genel performans açısından daha zayıf olduğunu gösterir.

En yüksek Q_i değerine sahip olan A8 (0,816387704) 1. sırada yer almıştır. Onu sırasıyla A14 (0,592791851) ve A4 (0,532975749) alternatifleri izlemiştir. En düşük performansı gösteren alternatifler ise A6 (-0,737267171), A3 (-0.484988711) ve A11 (-0,026240532) alternatifleri olmuştur.

Tablo 20 - RAWEC Yöntemi/ Sonuç ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Q_i	Sıralama
A1	0,075469908	9
A2	0,019103134	10
A3	-0,484988711	13
A4	0,532975749	3
A5	-0,004266783	11
A6	-0,737267171	14
A7	0,287097639	6
A8	0,816387704	1
A9	0,454537628	5
A10	0,247237624	7
A11	-0,026240532	12
A12	0,085507769	8
A13	0,480682209	4
A14	0,592791851	2

6.4.3. CRITIC Ağırlıklı EDAS Yöntemi ile Sıralama

1) Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Tüm kriterler için ortalama çözümün belirlenmesi:

Tablo 7'de belirtildiği üzere her bir kritere ait aritmetik ortalama belirlenmiştir.

3) Adım: Ortalamadan pozitif uzaklığı (PDA) ve ortalama matrislerden negatif uzaklığı (NDA) ölçüt türüne (fayda ve maliyet) göre hesaplanması:

Tablo 21'de, EDAS yönteminin üçüncü adımı olan ortalamadan pozitif uzaklık (PDA) değerleri gösterilmektedir. PDA, her alternatifin belirlenen kriterler için ortalama performans değerine kıyasla ne kadar pozitif bir sapma gösterdiğini ifade eder. Fayda tipi

kriterlerde ortalamanın üzerinde kalan değerler pozitif katkı sağlarken, maliyet tipi kriterlerde ise düşük değerler tercih edilir.

Tablo 21 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Pozitif Uzaklık Tablosu (PDA_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0231	0,0312	0,0000	0,0000	0,0000	0,0234	0,0000	0,1071	0,0000
A2	0,0437	0,0856	0,0118	0,0000	0,0000	0,0249	0,0000	0,0000	0,0000
A3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A4	0,0714	0,0499	0,0855	0,2620	0,1002	0,0818	0,1662	0,0000	0,3791
A5	0,0000	0,0046	0,0138	0,0000	0,0000	0,0000	0,1410	0,0000	0,0000
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A7	0,0606	0,0044	0,0069	0,0000	0,0000	0,0802	0,0000	0,1764	0,0000
A8	0,1475	0,0455	0,1821	0,3276	0,1452	0,0376	0,3732	0,2647	0,5139
A9	0,0171	0,0000	0,0451	0,0030	0,0108	0,1292	0,0374	0,2798	0,1982
A10	0,0000	0,0119	0,0277	0,0000	0,0350	0,0000	0,0249	0,0977	0,0193
A11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A12	0,0000	0,0403	0,0000	0,0000	0,0000	0,0234	0,0983	0,0717	0,0000
A13	0,0594	0,1109	0,1011	0,0588	0,1089	0,0000	0,1249	0,2391	0,0645
A14	0,0569	0,1489	0,0753	0,2784	0,0007	0,0000	0,1660	0,2798	0,7101

Tablo 22'de, EDAS yönteminin üçüncü adımında hesaplanan ortalamadan negatif uzaklık (NDA) değerleri yer almaktadır. NDA, her alternatifin kriterlere göre ortalama performans değerine kıyasla ne kadar negatif bir sapma gösterdiğini ifade eder. Fayda tipi kriterlerde ortalamanın altında kalan, maliyet tipi kriterlerde ise ortalamanın üzerinde kalan değerler negatif katkı olarak değerlendirilir.

Tablo 22 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Negatif Uzaklık Tablosu (NDA_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0000	0,0000	0,0877	0,1969	0,0687	0,0000	0,1255	0,0000	0,2012
A2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0494	0,0291	0,0000	0,1440	0,3113	0,1939
A3	0,0506	0,1842	0,1177	0,1641	0,0580	0,0209	0,2880	0,5679	0,1984
A4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0458	0,0000
A5	0,1158	0,0000	0,0000	0,0428	0,0852	0,0651	0,0000	0,1570	0,2046
A6	0,2016	0,2281	0,1961	0,3247	0,0768	0,1409	0,3444	0,2774	0,5217
A7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0035	0,0046	0,0000	0,0976	0,0000	0,0873
A8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A9	0,0000	0,0324	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A10	0,0252	0,0000	0,0000	0,0035	0,0000	0,0209	0,0000	0,0000	0,0000
A11	0,0095	0,0886	0,0621	0,0199	0,0278	0,0303	0,1323	0,1567	0,1267
A12	0,0771	0,0000	0,0858	0,1248	0,0507	0,0000	0,0000	0,0000	0,3511
A13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0098	0,0000	0,0000	0,0000
A14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1125	0,0000	0,0000	0,0000

4) Adım: Tüm alternatifler için PDA ve NDA'nın ağırlıklı toplamlarının belirlenmesi:

Çalışmada kullanılan dokuz kriterin karar verme sürecindeki göreli önemlerini yansıtan ağırlıkları Tablo 13'de belirtildiği üzere bu aşamada yönteme eklenmiştir. Belirlenen bu ağırlıklar, sonraki aşamalarda PDA ve NDA değerlerinin ağırlıklı ortalamalarının hesaplanmasında temel bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla bu tablo, EDAS yönteminin karar matrisine dayalı hesaplama sürecinde önemli bir referans niteliğindedir.

Tablo 23, her bir alternatifin ortalamadan pozitif uzaklık (PDA) değerlerinin, kriter ağırlıkları ile çarpılarak elde edilen ağırlıklı toplamlarını sunmaktadır. PDA, her alternatifin ortalama performans değerinin üzerinde ne kadar iyi performans gösterdiğini ölçmekte olup, bu bağlamda alternatiflerin güçlü yönlerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Tablo, PDA değerlerinin her bir kriter için hesaplanmasının ardından, ağırlıklarla çarpılıp toplamlarının alınması suretiyle elde edilen SP_i değerlerini kapsamaktadır. Bu hesaplama, alternatiflerin göreli üstünlüklerinin daha hassas ve anlamlı biçimde analiz edilmesini sağlamakta ve karar verme sürecine niceliksel bir temel sunmaktadır. Elde edilen SP_i skorları, EDAS yönteminin nihai değerlendirme ve sıralama aşamalarında kullanılmak üzere kritik bir girdi olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 23 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin PDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (SP_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0020	0,0037	0,0000	0,0000	0,0000	0,0045	0,0000	0,0150	0,0000	0,0251
A2	0,0037	0,0102	0,0008	0,0000	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0195
A3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A4	0,0061	0,0059	0,0059	0,0224	0,0117	0,0157	0,0159	0,0000	0,0368	0,1204
A5	0,0000	0,0005	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0135	0,0000	0,0000	0,0150
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A7	0,0052	0,0005	0,0005	0,0000	0,0000	0,0154	0,0000	0,0246	0,0000	0,0462
A8	0,0126	0,0054	0,0127	0,0280	0,0169	0,0072	0,0358	0,0370	0,0498	0,2053
A9	0,0015	0,0000	0,0031	0,0003	0,0013	0,0248	0,0036	0,0391	0,0192	0,0928
A10	0,0000	0,0014	0,0019	0,0000	0,0041	0,0000	0,0024	0,0136	0,0019	0,0253
A11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A12	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0045	0,0094	0,0100	0,0000	0,0287
A13	0,0051	0,0132	0,0070	0,0050	0,0127	0,0000	0,0120	0,0334	0,0063	0,0946
A14	0,0049	0,0177	0,0052	0,0238	0,0001	0,0000	0,0159	0,0391	0,0688	0,1755

Tablo 24'te, alternatiflerin ortalamadan negatif uzaklık (NDA) değerlerinin kriter ağırlıkları ile çarpılması sonucu elde edilen ağırlıklı toplamlar yer almaktadır. NDA, her alternatifin ortalama performans değerine kıyasla ne ölçüde düşük bir performans sergilediğini ortaya koymakta olup, alternatiflerin zayıf yönlerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Tablo, her bir alternatif için kriter bazında hesaplanan NDA değerlerinin ağırlıklı toplamlarının NP_i skorlarına dönüştürülmesi sürecini göstermektedir. Bu hesaplamalar, EDAS yönteminin nihai karar matrisinin oluşturulmasına ve alternatiflerin genel değerlendirme puanlarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda NP_i değerleri, karar vericilerin alternatiflerin olumsuz performans unsurlarını göz önünde bulundurmalarına olanak tanımakta ve çok kriterli karar verme sürecine bütüncül bir yaklaşım getirmektedir.

Tablo 24 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin NDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (NP_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0000	0,0000	0,0061	0,0168	0,0080	0,0000	0,0120	0,0000	0,0195	0,0625
A2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0042	0,0034	0,0000	0,0138	0,0435	0,0188	0,0837
A3	0,0043	0,0219	0,0082	0,0140	0,0068	0,0040	0,0276	0,0793	0,0192	0,1853
A4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0064	0,0000	0,0064
A5	0,0099	0,0000	0,0000	0,0037	0,0099	0,0125	0,0000	0,0219	0,0198	0,0777
A6	0,0172	0,0271	0,0136	0,0277	0,0090	0,0271	0,0330	0,0388	0,0506	0,2440
A7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0005	0,0000	0,0094	0,0000	0,0085	0,0187
A8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A9	0,0000	0,0039	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0039
A10	0,0021	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000	0,0065
A11	0,0008	0,0105	0,0043	0,0017	0,0032	0,0058	0,0127	0,0219	0,0123	0,0733
A12	0,0066	0,0000	0,0060	0,0106	0,0059	0,0000	0,0000	0,0000	0,0340	0,0631
A13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019
A14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0216	0,0000	0,0000	0,0000	0,0216

5) Adım: Tüm alternatifler için SP ve SN değerlerini normalleştirilmesi:

Tablo 25, EDAS yönteminin kritik aşamalarından biri olan, alternatiflere ait pozitif ve negatif uzaklık ağırlıklı toplamlarının (SP_i) ve (NP_i) normalleştirilmiş değerlerini NSP_i ve NSN_i göstermektedir. Bu normalleştirme işlemi, her bir alternatifin (SP_i) ve (NP_i) değerinin, ilgili grup içindeki maksimum değere bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, tüm alternatifler için 0 ile 1 arasında ölçeklenmiş ve karşılaştırılabilir değerler elde edilmiştir.

Normalleştirilmiş pozitif uzaklık (NSP_i) ve negatif uzaklık (NSN_i) değerleri, alternatiflerin ortalama çözüme göre gösterdiği göreli üstünlük ve zayıflıkları daha net biçimde ortaya koymaktadır. Bu değerler, EDAS yönteminin nihai değerlendirme ve sıralama aşamasında kullanılacak olan eşleştirilmiş performans skorlarının hesaplanmasına temel teşkil etmektedir.

Bu normalleştirme süreci, EDAS yönteminin güçlü ve zayıf yönleri bir arada değerlendiren esnek yapısına katkı sağlamakta ve karar vericilerin alternatifleri daha şeffaf ve tutarlı biçimde sıralamasına olanak tanımaktadır.

Tablo 25 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatiflerin SP ve SN Değerlerinin Normalleştirilmesi Tablosu (NSP_i, NSN_i)

Alternatif	$\boldsymbol{NSP_i}$	$\boldsymbol{NSN_i}$
A1	0,122391516	0,744009692
A2	0,094935136	0,656892531
A3	0	0,240360866
A4	0,586371129	0,973780769
A5	0,07316659	0,681377208
A6	0	0
A7	0,225044541	0,923525258
A8	1	1
A9	0,451953638	0,984219065
A10	0,123312553	0,973546732
A11	0	0,699643429
A12	0,139799237	0,741173935
A13	0,460717389	0,992276257
A14	0,854514998	0,911487675

6) Adım: Tüm alternatifler için değerlendirme puanının (AS) hesaplanması:

Tablo 26, EDAS yönteminin son aşaması olan alternatiflerin değerlendirme puanlarının (AS_i) ve buna dayalı olarak elde edilen nihai sıralamalarının sunulduğu tablodur. AS_i değeri, her bir alternatif için normalleştirilmiş pozitif (NSP_i) ve negatif (NSN_i) uzaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır. Bu puan, alternatiflerin genel performansını temsil eder ve alternatiflerin karşılaştırılmasında temel kriter olarak işlev görür.

Tablodaki veriler incelendiğinde, A8 alternatifinin AS_i=1.0000 değeriyle açık ara birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Bu sonuç, A8'in hem pozitif hem negatif performans ölçütlerinde en yüksek değerlere sahip olmasının doğal bir yansımasıdır ve alternatifin genel üstünlüğünü teyit etmektedir. İkinci sırada yer alan A14 ($AS_i i$ =0,8830) ve üçüncü sıradaki A4 (AS_i=0,7801) alternatifleri, yüksek değerlendirme puanları ile A8'in ardından öne çıkan güçlü adaylardır.

Düşük performans grubunda ise A11 (AS_i =0,3498, 12. sıra), A3 (AS_i =0,1202, 13. sıra) ve A6 (AS_i=0, 14. sıra) alternatifleri yer almaktadır. Özellikle A6'nın AS_i değerinin sıfır olması, bu alternatifin her iki performans boyutunda da en düşük seviyede konumlandığını ve genel değerlendirmede en başarısız alternatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 26 - EDAS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı (AS_i) ve Sıralaması Tablosu

Alternatif	$\boldsymbol{AS_i}$	Sıralama
A1	0,433200604	9
A2	0,375913833	11
A3	0,120180433	13
A4	0,780075949	3
A5	0,377271899	10
A6	0,000000000	14
A7	0,574284899	6
A8	1,000000000	1
A9	0,718086352	5
A10	0,548429642	7
A11	0,349821715	12
A12	0,440486586	8
A13	0,726496823	4
A14	0,883001337	2

6.4.4. CRITIC Ağırlıklı MAUT Yöntemi ile Sıralama

1) Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmesi:

Tablo 13'te belirtildiği üzere CRITIC Yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

3) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 37, MAUT yöntemi kapsamında karar matrisinin normalize edilmiş hâlini sunmaktadır. Her alternatifin ilgili kritere göre aldığı normalize değerler 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0 en düşük, 1 ise en yüksek performansı ifade etmektedir. Tablo

incelendiğinde A8'in birçok kriterde 1.0000 ile maksimum performansı gösterdiği; A6'nın ise çoğu kriterde 0 değerinde kaldığı görülmektedir. Bu durum, A8'in güçlü, A6'nın ise zayıf bir aday olduğunu işaret etmektedir.

Tablo 27 - MAUT Yöntemi / Karar Matrisinin Normalize Tablosu (u_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,6436	0,6879	0,2867	0,1960	0,0717	0,6082	0,3050	0,7963	0,2602
A2	0,7024	0,8321	0,5497	0,4221	0,2435	0,6140	0,2793	0,3027	0,2661
A3	0,4325	0,1166	0,2073	0,2462	0,1179	0,4444	0,0785	0,0000	0,2624
A4	0,7820	0,7374	0,7446	0,8995	0,8046	0,8246	0,7116	0,6159	0,7313
A5	0,2457	0,6171	0,5551	0,4322	0,0000	0,2807	0,6765	0,4848	0,2574
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0362	0,0000	0,0000	0,3427	0,0000
A7	0,7509	0,6168	0,5367	0,4925	0,3498	0,8187	0,3439	0,8780	0,3527
A8	1,0000	0,7258	1,0000	1,0000	1,0000	0,6608	1,0000	0,9822	0,8407
A9	0,6263	0,5190	0,6377	0,5025	0,4168	1,0000	0,5320	1,0000	0,5844
A10	0,5052	0,6366	0,5918	0,4925	0,5215	0,4444	0,5146	0,7852	0,4392
A11	0,5502	0,3699	0,3542	0,4673	0,2492	0,4094	0,2956	0,4851	0,3206
A12	0,3564	0,7118	0,2916	0,3065	0,1498	0,6082	0,6170	0,7545	0,1384
A13	0,7474	0,8991	0,7856	0,5879	0,8426	0,4854	0,6540	0,9520	0,4759
A14	0,7405	1,0000	0,7176	0,9246	0,3729	0,1053	0,7113	1,0000	1,0000

4) Adım: Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri bulunması:

Tablo 28, MAUT yöntemi çerçevesinde alternatiflerin her bir kritere göre elde ettikleri fayda değerlerini ve toplam fayda puanlarını sunmaktadır. Fayda değeri (U_x), normalize edilmiş kriter değeri ile o kriterin ağırlığının çarpılmasıyla hesaplanır ve her alternatifin toplam puanı, kriterler üzerindeki genel performansını gösterir. Örneğin, A8 alternatifi 0.8844 ile en yüksek toplam fayda değerine ulaşarak genel sıralamada üstün bir konuma gelirken, A6 alternatifi 0.0521 ile listenin en altında kalmıştır. Bu durum, A8'in tüm kriterlerde dengeli ve güçlü bir performans sergilediğini, A6'nın ise genel olarak düşük bir başarı gösterdiğini göstermektedir.

Tablo 28 - MAUT Yöntemi /Fayda Değeri Tablosu (U_x)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0548	0,0816	0,0199	0,0167	0,0084	0,1168	0,0292	0,1112	0,0252	0,4640
A2	0,0599	0,0988	0,0382	0,0360	0,0284	0,1179	0,0268	0,0423	0,0258	0,4740
A3	0,0369	0,0138	0,0144	0,0210	0,0138	0,0853	0,0075	0,0000	0,0254	0,2182
A4	0,0666	0,0875	0,0518	0,0768	0,0939	0,1583	0,0682	0,0860	0,0709	0,7601
A5	0,0209	0,0732	0,0386	0,0369	0,0000	0,0539	0,0649	0,0677	0,0250	0,3811
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0042	0,0000	0,0000	0,0479	0,0000	0,0521
A7	0,0640	0,0732	0,0373	0,0420	0,0408	0,1572	0,0330	0,1227	0,0342	0,6044
A8	0,0852	0,0861	0,0696	0,0853	0,1167	0,1269	0,0959	0,1372	0,0815	0,8844
A9	0,0534	0,0616	0,0444	0,0429	0,0486	0,1920	0,0510	0,1397	0,0567	0,6902
A10	0,0431	0,0756	0,0412	0,0420	0,0609	0,0853	0,0493	0,1097	0,0426	0,5496
A11	0,0469	0,0439	0,0246	0,0399	0,0291	0,0786	0,0283	0,0678	0,0311	0,3902
A12	0,0304	0,0845	0,0203	0,0262	0,0175	0,1168	0,0591	0,1054	0,0134	0,4735
A13	0,0637	0,1067	0,0546	0,0502	0,0983	0,0932	0,0627	0,1330	0,0461	0,7086
A14	0,0631	0,1187	0,0499	0,0789	0,0435	0,0202	0,0682	0,1397	0,0970	0,6792

5) Adım: Toplam fayda değerlerinin hesaplanması:

Tablo 29, MAUT yöntemi ile alternatiflerin toplam fayda değerlerinin hesaplanmasının ardından elde edilen sıralamaları göstermektedir. Her alternatifin toplam fayda puanı, o alternatife ait tüm kriterlerin normalize edilmiş değerleriyle ağırlıklarının çarpılması sonucu bulunan toplam değeri temsil etmektedir. Bu toplam fayda puanları, alternatiflerin genel performansını belirler ve sıralama, hangi alternatifin daha üstün olduğunu ortaya koyar.

A8 alternatifi 0,8844 puanla birinci sırada yer almakta, bu da A8'in tüm kriterlerde en yüksek başarıyı gösterdiğini ve bu alternatifin tercih edilmesi gerektiğini işaret etmektedir. A4 (0,7601) ve A13 (0,7086) alternatifleri ise sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer alarak, yüksek performans sergileyen diğer alternatifler arasında yer almaktadır. Bunun aksine, A6 alternatifi 0,0521 puan ile son sırada kalmaktadır, bu da A6'nın düşük performans gösterdiği ve diğer alternatiflere göre daha az tercih edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. Bununla beraber düşük performans gösteren alternatifler A3 (0,2182 ve 13. sıra) ve A5 (0,2188 ve 12. sıra) sıralanmaktadır.

Tablo 29 - MAUT Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Puanlama	Sıralama
A1	0,464008670	10
A2	0,474044488	8
A3	0,218187808	13
A4	0,760076985	2
A5	0,381083548	12
A6	0,052094684	14
A7	0,604375374	6
A8	0,884402278	1
A9	0,690205677	4
A10	0,549579008	7
A11	0,390170155	11
A12	0,473529564	9
A13	0,708559346	3
A14	0,679170783	5

6.4.5. CRITIC Ağırlıklı CRADIS Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 30, CRADIS yöntemi ile karar matrisinin normalize edilmiş değerlerini göstermektedir. Normalizasyon işlemi, her alternatifin belirli bir kriterdeki değerini, ilgili kriterin en yüksek değerine bölerek yapılmaktadır. Bu işlem, kriterler arası karşılaştırmaların daha anlamlı ve eşit düzeyde yapılabilmesi için önemlidir. Örneğin, A8 alternatifi, tüm kriterlerde en yüksek normalize edilmiş değerlere sahip olup, C1, C3, C4, C5, C7 ve C8 kriterlerinde sırasıyla 1,0000 değeri ile öne çıkmaktadır. Bu da A8'in tüm kriterlerde en yüksek performansta olduğunu göstermektedir.

Tablo 30 - CRADIS Yöntemi / Karar Matrisi Normalize Tablosu(n_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000

3) Adım: Normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması:

Kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmesi: Tablo 13'de gösterildiği gibi CRITIC yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

Tablo 31, CRADIS yöntemiyle normalize edilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılmasını göstermektedir. Bu adımda, her kriterin önemini yansıtacak şekilde normalize edilmiş veriler, ilgili kriterlerin ağırlıkları ile çarpılmaktadır. Kriter ağırlıkları, CRITIC yönteminden elde edilen değerlerdir ve her bir alternatifin performansını daha hassas bir biçimde değerlendirebilmek için bu ağırlıklar kullanılır. Bu işlem, her alternatifin kriterlere göre önemli ölçüde daha doğru ve güvenilir sıralamalar elde edilmesini sağlar. Ağırlıklı değerler, alternatiflerin her bir kritere göre elde ettiği performansın, o kriterin önem derecesine göre daha fazla vurgulanmasına olanak tanır.

Tablo 31 - CRADIS Yöntemi / Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırma Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0760	0,1065	0,0537	0,0516	0,0949	0,1740	0,0610	0,1209	0,0453
A2	0,0775	0,1122	0,0595	0,0611	0,0989	0,1743	0,0598	0,0752	0,0457
A3	0,0705	0,0843	0,0519	0,0537	0,0960	0,1665	0,0497	0,0472	0,0454
A4	0,0796	0,1085	0,0639	0,0811	0,1121	0,1840	0,0814	0,1042	0,0782
A5	0,0657	0,1038	0,0597	0,0615	0,0932	0,1590	0,0797	0,0920	0,0451
A6	0,0593	0,0797	0,0473	0,0434	0,0941	0,1461	0,0458	0,0789	0,0271
A7	0,0788	0,1038	0,0592	0,0641	0,1014	0,1837	0,0630	0,1284	0,0517
A8	0,0852	0,1080	0,0696	0,0853	0,1167	0,1764	0,0959	0,1380	0,0858
A9	0,0755	0,1000	0,0615	0,0645	0,1030	0,1920	0,0724	0,1397	0,0679
A10	0,0724	0,1045	0,0605	0,0641	0,1055	0,1665	0,0715	0,1198	0,0578
A11	0,0736	0,0941	0,0552	0,0630	0,0991	0,1649	0,0606	0,0920	0,0495
A12	0,0685	0,1075	0,0538	0,0563	0,0967	0,1740	0,0767	0,1170	0,0368
A13	0,0787	0,1148	0,0648	0,0681	0,1130	0,1684	0,0785	0,1353	0,0603
A14	0,0785	0,1187	0,0633	0,0822	0,1020	0,1509	0,0814	0,1397	0,0970

4) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümün belirlenmesi:

Tablo 32'de, ideal ve anti-ideal çözümler belirlenmektedir. İdeal çözüm (t_i), her kriter için elde edilebilecek en yüksek (maksimum) değeri temsil ederken, anti-ideal çözüm (t_{ai})) ise en düşük (minimum) değeri ifade eder. Tablo 32, bu değerlere örnekler sunmaktadır. Örneğin, C1 kriterinde ideal değer 0,0852, anti-ideal değer ise 0,0593 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, C6 kriterinde ideal değer 0,1920, anti-ideal değer 0,1461 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, her alternatifin en iyi ve en kötü performans sınırlarına göre değerlendirilmesini sağlayacak referans noktalarını oluşturur.

Tablo 32 - CRADIS Yöntemi / v_{ij} Maksimum ve Minimum Değerler Tablosu (t_i, t_{ai})

Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Maksimum	0,0852	0,1187	0,0696	0,0853	0,1167	0,1920	0,0959	0,1397	0,0970
Minimum	0,0593	0,0797	0,0473	0,0434	0,0932	0,1461	0,0458	0,0472	0,0271

5) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmaların hesaplanması:

Her alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere olan sapmaları hesaplanarak analiz derinleştirilmektedir. İdeal çözümden sapma (d^+), alternatifin en iyi performansa sahip değerlerden ne kadar uzaklaştığını gösterir; anti-ideal çözümden sapma (d^-) ise alternatifin en kötü performanstan ne kadar uzak olduğunu ortaya koyar. Tablo 33'te A1 alternatifi, C1 kriterinde idealden 0,0092 birim sapma gösterirken, C4 kriterinde 0,0337 birim sapma göstermektedir. Bu değerler, her alternatifin ideal çözüme yakınlık seviyesini ölçmek için temel veriler sağlar. Tablo genelinde, A8 alternatifinin idealden en düşük sapmayı göstermesi, onun genel olarak en güçlü adaylardan biri olduğunu işaret etmektedir.

Tablo 33 - CRADIS Yöntemi / İdeal Çözümden Sapma Tablosu (d^+)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0092	0,0122	0,0159	0,0337	0,0218	0,0180	0,0348	0,0188	0,0517
A2	0,0077	0,0065	0,0100	0,0242	0,0178	0,0177	0,0361	0,0645	0,0513
A3	0,0147	0,0344	0,0176	0,0316	0,0207	0,0255	0,0462	0,0925	0,0515
A4	0,0057	0,0102	0,0057	0,0042	0,0046	0,0081	0,0144	0,0355	0,0188
A5	0,0196	0,0149	0,0099	0,0238	0,0235	0,0330	0,0162	0,0477	0,0519
A6	0,0259	0,0390	0,0223	0,0419	0,0226	0,0459	0,0501	0,0608	0,0698
A7	0,0065	0,0149	0,0103	0,0213	0,0153	0,0083	0,0329	0,0113	0,0452
A8	0,0000	0,0107	0,0000	0,0000	0,0000	0,0156	0,0000	0,0016	0,0111
A9	0,0097	0,0187	0,0081	0,0209	0,0137	0,0000	0,0234	0,0000	0,0290
A10	0,0128	0,0142	0,0091	0,0213	0,0112	0,0255	0,0243	0,0199	0,0392
A11	0,0117	0,0245	0,0144	0,0223	0,0176	0,0271	0,0353	0,0477	0,0474
A12	0,0167	0,0112	0,0158	0,0291	0,0200	0,0180	0,0192	0,0227	0,0602
A13	0,0065	0,0039	0,0048	0,0173	0,0037	0,0236	0,0173	0,0044	0,0366
A14	0,0067	0,0000	0,0063	0,0032	0,0147	0,0411	0,0145	0,0000	0,0000

Öte yandan, Tablo 34'teki anti-ideal çözümden sapmalar, alternatiflerin kötü senaryolardan ne kadar uzaklaştığını belirlemektedir. Örneğin A6, birçok kriterde (C1, C2, C3, C4) sıfıra yakın sapma göstererek anti-ideale en yakın alternatiflerden biri olarak öne çıkar. Buna karşın A8, C8 kriterinde 0,0909 ve C9 kriterinde 0,0587 ile en yüksek sapmalardan bazılarını göstererek, kötü performanslardan en uzak alternatif olduğunu vurgulamaktadır. Bu hesaplamalar, CRADIS yönteminde alternatiflerin sıralamasını belirlemek için yapılacak nihai değerlendirmelerin temel taşlarını oluşturur. İdeal ve anti-

ideal sapmaların birlikte değerlendirilmesiyle hem başarıya yakınlık hem de başarısızlıktan uzaklık dikkate alınarak daha bütüncül bir sıralama elde edilir.

Tablo 34 - CRADIS Yöntemi / Anti-İdeal Çözümden Sapma Tablosu(d^-)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0167	0,0268	0,0064	0,0082	0,0017	0,0279	0,0153	0,0737	0,0182
A2	0,0182	0,0324	0,0122	0,0177	0,0057	0,0282	0,0140	0,0280	0,0186
A3	0,0112	0,0045	0,0046	0,0103	0,0028	0,0204	0,0039	0,0000	0,0183
A4	0,0203	0,0287	0,0166	0,0377	0,0189	0,0379	0,0356	0,0570	0,0511
A5	0,0064	0,0240	0,0124	0,0181	0,0000	0,0129	0,0339	0,0449	0,0180
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0000	0,0000	0,0317	0,0000
A7	0,0195	0,0240	0,0119	0,0206	0,0082	0,0376	0,0172	0,0812	0,0246
A8	0,0259	0,0283	0,0223	0,0419	0,0235	0,0303	0,0501	0,0909	0,0587
A9	0,0162	0,0202	0,0142	0,0211	0,0098	0,0459	0,0267	0,0925	0,0408
A10	0,0131	0,0248	0,0132	0,0206	0,0122	0,0204	0,0258	0,0727	0,0307
A11	0,0143	0,0144	0,0079	0,0196	0,0058	0,0188	0,0148	0,0449	0,0224
A12	0,0092	0,0277	0,0065	0,0129	0,0035	0,0279	0,0309	0,0698	0,0097
A13	0,0194	0,0350	0,0175	0,0247	0,0198	0,0223	0,0328	0,0881	0,0332
A14	0,0192	0,0390	0,0160	0,0388	0,0088	0,0048	0,0356	0,0925	0,0698

6) Adım: Alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma derecelerinin hesaplanması:

Tablo 35'de alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma derecelerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her bir alternatifin ideal çözüme olan yakınlığını ve anti-ideal çözümden olan uzaklığını belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 35 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin İdeal ve Anti-İdeal Çözümden Sapma Dereceleri Tablosu (s_i^+, s_i^-)

Alternatif	s_i^+	s_i^-
A1	0,2161	0,1948
A2	0,2359	0,1750
A3	0,3348	0,0761
A4	0,1072	0,3037
A5	0,2404	0,1705
A6	0,3784	0,0326
A7	0,1659	0,2450
A8	0,0390	0,3719
A9	0,1235	0,2874
A10	0,1774	0,2335
A11	0,2480	0,1629
A12	0,2128	0,1981
A13	0,1182	0,2927
A14	0,0864	0,3245

7) Adım: Optimum alternatiflerden sapmalara ilişkin olarak her bir alternatif için fayda fonksiyonunun hesaplanması:

Tablo 36'da alternatiflerin optimum çözümden sapmalarına ilişkin fayda fonksiyonları hesaplanmıştır. Bu hesaplama, her bir alternatifin ideal (K_i^+) ve anti-ideal (K_i^-) çözüme olan yakınlık derecesini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen değerlere göre, A8 alternatifi hem ideal (K_i^+=1) hem de anti-ideal (K_i^-) =1) çözüme en yakın ve en uzak alternatif olarak optimum performans sergilemiştir. Diğer taraftan, A6 alternatifi K_i^+==0,1031 ve K_i^-=0,0876 değerleriyle en düşük fayda fonksiyonuna sahip alternatif olarak dikkat çekmektedir. Genel olarak, bu bulgular alternatiflerin performans düzeylerini ve optimum çözüme olan yakınlıklarını sayısal olarak ortaya koymakta olup, nihai sıralamanın belirlenmesi açısından kritik bir girdi sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, bir sonraki aşamada alternatiflerin genel uygunluk puanlarının hesaplanmasına ve nihai karar matrisinin oluşturulmasına temel teşkil etmektedir.

Tablo 36 - CRADIS Yöntemi / Optimum Alternatiften Sapmalara İlişkin Fayda Fonksiyonu Tablosu

Alternatif	K_i^+	K_i^-	s_0^+	s_0^-
A1	0,180596616	0,523878044	0,0390	0,3719
A2	0,165453876	0,470698087		
A3	0,116566631	0,204702498		
A4	0,364134604	0,816754506		
A5	0,162315027	0,458433166		
A6	0,103144419	0,08755468		
A7	0,235198671	0,658772649		
A8	1	1		
A9	0,315992717	0,77284949		
A10	0,219922172	0,627780619		
A11	0,157338501	0,437984611		
A12	0,183417794	0,53281541		
A13	0,330079636	0,787022114		
A14	0,45147316	0,872504161		

8) Adım: Alternatiflerin fayda derecelerinden ortalama sapmaları hesaplanarak alternatiflerin sıralanması:

Bu aşamada, CRADIS yöntemi çerçevesinde alternatiflerin fayda derecelerinden ortalama sapmalar hesaplanarak nihai sıralama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 37'de sunulmuştur. Analiz sonucunda, A8 alternatifi Q_i = 1 değeriyle en yüksek performansı göstererek birinci sırada yer almıştır. Bunu sırasıyla Q_i= 0,6619 ile A14 ve Q_i = 0,5904 ile A4 alternatifleri takip etmiştir. En düşük performansı sergileyen alternatif ise Q_i = 0,0953 değeriyle A6 olmuştur. Bunu sırası ile Q_i = 0,1606 ile A3 ve Q_i = 0,2927 ile A11 alternatifi izlemiştir. Genel olarak, bu sıralama, alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlıklarını dikkate alarak yapılan değerlendirmeyi yansıtmakta ve karar vericilere alternatifler arasında objektif bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır.

Tablo 37 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Q_i	Sıralama
A1	0,35223733	9
A2	0,318075981	10
A3	0,160634565	13
A4	0,590444555	3
A5	0,310374097	11
A6	0,095349549	14
A7	0,44698566	6
A8	1	1
A9	0,544421103	5
A10	0,423851396	7
A11	0,297661556	12
A12	0,358116602	8
A13	0,558550875	4
A14	0,66198866	2

6.4.6. CRITIC Ağırlıklı ARAS Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Her kriter için optimal performansın belirlenmesi:

Tablo 7'de belirtildiği üzere kriterlere ait maksimum değerler belirlenmiş ve yönteme bu aşamada dahil edilmiştir.

3) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 38'de farklı ölçekteki kriterler karşılaştırılabilir hâle getirilmek amacıyla normalize edilmiştir. Normalize değerler, her bir alternatifin ilgili kriterdeki performansının

toplam performans içindeki payını yansıtmaktadır. Böylece, tüm kriterler ortak bir ölçekte ifade edilerek değerlendirme sürecine dâhil edilmiştir.

Tablo incelendiğinde, özellikle A8 alternatifinin birçok kriterde (örneğin C1, C3, C4, C7, C8, C9) yüksek normalize değerlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, A8'in genel performans açısından öne çıktığını ve güçlü bir alternatif olduğunu işaret etmektedir. Benzer şekilde, A13 ve A14 alternatiflerinin de çoğu kriterde görece yüksek normalize değerlere sahip olduğu görülmekte, bu da onların rekabetçi konumlarını göstermektedir.

Tablo 38 - ARAS Yöntemi / Normalize Karar Matris Tablosu (r_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0731	0,0737	0,0652	0,0574	0,0665	0,0731	0,0625	0,0791	0,0571
A2	0,0745	0,0775	0,0723	0,0679	0,0694	0,0732	0,0611	0,0492	0,0576
A3	0,0678	0,0583	0,0630	0,0597	0,0673	0,0699	0,0509	0,0309	0,0573
A4	0,0765	0,0750	0,0775	0,0901	0,0786	0,0773	0,0833	0,0682	0,0985
A5	0,0632	0,0718	0,0724	0,0684	0,0653	0,0668	0,0815	0,0602	0,0568
A6	0,0570	0,0551	0,0574	0,0482	0,0659	0,0614	0,0468	0,0516	0,0342
A7	0,0758	0,0717	0,0719	0,0712	0,0711	0,0772	0,0645	0,0840	0,0652
A8	0,0820	0,0747	0,0844	0,0948	0,0818	0,0741	0,0981	0,0903	0,1081
A9	0,0726	0,0691	0,0746	0,0716	0,0722	0,0807	0,0741	0,0914	0,0856
A10	0,0696	0,0723	0,0734	0,0712	0,0739	0,0699	0,0732	0,0784	0,0728
A11	0,0708	0,0651	0,0670	0,0700	0,0694	0,0693	0,0620	0,0602	0,0624
A12	0,0659	0,0743	0,0653	0,0625	0,0678	0,0731	0,0785	0,0765	0,0463
A13	0,0757	0,0794	0,0786	0,0756	0,0792	0,0707	0,0803	0,0885	0,0760
A14	0,0755	0,0821	0,0768	0,0913	0,0715	0,0634	0,0833	0,0914	0,1221

4) Adım: Ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulması:

CRITIC yöntemi göre elde edilmiş kriterlerin ağırlıkları Tablo 13'te belirtildiği üzere bu aşamada yönteme dâhil dilmiştir.

Ağırlıklı normalize karar matrisi, Tablo 39'da sunulmuştur. Bu aşamada, Tablo 13'te CRITIC yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları, normalize edilmiş karar matrisi değerlerine uygulanarak her bir alternatifin kriterler bazındaki göreli performansı hesaplanmıştır. Ağırlıklı normalize değerler (v_{ij}), her bir alternatifin ilgili kriterdeki önem derecesine göre elde ettiği katkıyı ifade etmektedir ve toplam performans değerlendirmesi için temel bir girdi niteliğindedir.

Tablo 39 - ARAS Yöntemi / Kriterlerin Ağırlıklandırılmış Normalize Değer Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0062	0,0087	0,0045	0,0049	0,0078	0,0140	0,0060	0,0110	0,0055
A2	0,0064	0,0092	0,0050	0,0058	0,0081	0,0141	0,0059	0,0069	0,0056
A3	0,0058	0,0069	0,0044	0,0051	0,0079	0,0134	0,0049	0,0043	0,0056
A4	0,0065	0,0089	0,0054	0,0077	0,0092	0,0148	0,0080	0,0095	0,0096
A5	0,0054	0,0085	0,0050	0,0058	0,0076	0,0128	0,0078	0,0084	0,0055
A6	0,0049	0,0065	0,0040	0,0041	0,0077	0,0118	0,0045	0,0072	0,0033
A7	0,0065	0,0085	0,0050	0,0061	0,0083	0,0148	0,0062	0,0117	0,0063
A8	0,0070	0,0089	0,0059	0,0081	0,0095	0,0142	0,0094	0,0126	0,0105
A9	0,0062	0,0082	0,0052	0,0061	0,0084	0,0155	0,0071	0,0128	0,0083
A10	0,0059	0,0086	0,0051	0,0061	0,0086	0,0134	0,0070	0,0110	0,0071
A11	0,0060	0,0077	0,0047	0,0060	0,0081	0,0133	0,0059	0,0084	0,0060
A12	0,0056	0,0088	0,0045	0,0053	0,0079	0,0140	0,0075	0,0107	0,0045
A13	0,0064	0,0094	0,0055	0,0065	0,0092	0,0136	0,0077	0,0124	0,0074
A14	0,0064	0,0097	0,0053	0,0078	0,0083	0,0122	0,0080	0,0128	0,0118
Maksimum	0,0070	0,0097	0,0059	0,0081	0,0095	0,0155	0,0094	0,0128	0,0118

5) Adım: Optimallik fonksiyon değerleri hesaplanması:

Alternatiflerin toplam ağırlıklı normalize değerleri kullanılarak optimallik fonksiyon değerleri ($\boldsymbol{S_i}$) hesaplanmış ve Tablo 52'de sunulmuştur. Bu değerler, her bir alternatifin genel performansını temsil etmekte olup, kriterler üzerindeki ağırlıklı başarılarının bir toplamıdır. En yüksek toplam değeri (S_0) gösteren alternatif, problem bağlamında optimum çözümü temsil eder.

Tablo 40 – ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Optimallik Fonksiyon Değerleri Tablosu (S_i)

Alternatif / Kriter	Toplam ($\boldsymbol{S_i}$)
A1	0,0062
A2	0,0064
A3	0,0058
A4	0,0065
A5	0,0054
A6	0,0049
A7	0,0065
A8	0,0070
A9	0,0062
A10	0,0059
A11	0,0060
A12	0,0056
A13	0,0064
A14	0,0064
Maksimum	0,0070 (S_0)

6) Adım: Fayda değerleri ve Nihai Sıralamanın Belirlenmesi:

ARAS yönteminin son aşamasında, alternatiflerin optimallik fonksiyon değerlerinin maksimum değere (S_0 = 0,0070) oranlanmasıyla fayda değerleri (K_i) hesaplanmış ve nihai sıralama Tablo 41'de sunulmuştur. Bu aşama, alternatiflerin göreli performanslarını net bir şekilde karşılaştırmaya olanak sağlamış ve karar verme sürecinde sıralama açısından kesinlik kazandırmıştır.

Tabloya bakıldığında, en yüksek fayda değeri olan A8 alternatifi (0.9594) birinci sırada yer almakta ve tüm kriterler açısından en üstün alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bunu, A14 (0,9185) ve A4 (0,8867) alternatifleri takip etmekte, bu üç alternatif diğerlerine kıyasla güçlü bir performans sergilemektedir.

Düşük performans sergileyen alternatiflere bakıldığında A6 alternatifi K_i = 0,6018 ile son sırada almaktadır. Bu alternatifi sırası ile K_i = 0,6485 ile A3 alternatifi ve K_i = 0,7377 ile A11 alternatifi izlemektedir. Bu alternatiflerin diğerlerine göre zayıf bir performans ortaya koyduğu görülmektedir.

Tablo 41 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Fayda Değerleri (K_i) ve Sıralaması

Alternatif	Toplam (K_i)	Sıralama
A1	0,766272309	9
A2	0,744867341	11
A3	0,648463664	13
A4	0,886723198	3
A5	0,746064362	10
A6	0,601787053	14
A7	0,817910286	6
A8	0,959416463	1
A9	0,866781659	5
A10	0,81099753	7
A11	0,737653531	12
A12	0,768566663	8
A13	0,869778625	4
A14	0,918450494	2

6.4.7. CRITIC Ağırlıklı SAW Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 7'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 42'de sunulan normalize karar matrisi (r_{ij}), farklı ölçekteki kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bu işlem, her bir kriter değerinin kendi maksimum değerine bölünmesiyle gerçekleştirilmiş ve tüm değerler 0 ile 1 arasında bir aralığa dönüştürülmüştür.

Tablo incelendiğinde, A8 alternatifinin tüm kriterler bazında en yüksek normalize değerlere sahip olduğu ve özellikle C1, C3, C4, C5, C7, C8 ve C9 kriterlerinde maksimum skoru elde ettiği görülmektedir. Bu durum, A8'in genel performans açısından oldukça güçlü

bir alternatif olduğunu işaret etmektedir. A4 ve A14 alternatifleri de pek çok kriterde yüksek normalize değerlere sahip olup dikkat çekmektedir. Özellikle A4, C4, C5 ve C6 kriterlerinde; A14 ise C2, C4, C8 ve C9 kriterlerinde öne çıkmaktadır.

Tablo 42 - SAW Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Tablosu (r_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000

3) Adım: Karar matrisinden hesaplanan tüm kriter değerleri pozitif olmalıdır. Eğer negatif değerler varsa bu değerler pozitif değerlere dönüştürülür:

Karar matrisindeki tüm veriler pozitif olduğu için bu adım uygulanmamıştır.

4) Adım: Kriterlerin ağırlık değerlerinin belirlenmesi ve alternatiflerin toplam tercih değerleri hesaplanması:

CRITIC yöntemi göre elde edilmiş kriterlerin ağırlıkları Tablo 13'te belirtildiği üzere bu aşamada yönteme dâhil dilmiştir

Tablo 43'de, normalize edilmiş kriter değerleri ile ağırlıkların çarpımı sonucunda elde edilen kısmi katkılar ve bunların toplamı olarak hesaplanan toplam tercih değerleri (V_i) sunulmaktadır. Her alternatifin toplam tercih değeri, onun genel performansını ve tercih edilebilirliğini temsil eder.

Tablo 43 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercih Tablosu (V_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0760	0,1065	0,0537	0,0516	0,0949	0,1740	0,0610	0,1209	0,0453	0,7839
A2	0,0775	0,1122	0,0595	0,0611	0,0989	0,1743	0,0598	0,0752	0,0457	0,7641
A3	0,0705	0,0843	0,0519	0,0537	0,0960	0,1665	0,0497	0,0472	0,0454	0,6652
A4	0,0796	0,1085	0,0639	0,0811	0,1121	0,1840	0,0814	0,1042	0,0782	0,8928
A5	0,0657	0,1038	0,0597	0,0615	0,0932	0,1590	0,0797	0,0920	0,0451	0,7596
A6	0,0593	0,0797	0,0473	0,0434	0,0941	0,1461	0,0458	0,0789	0,0271	0,6216
A7	0,0788	0,1038	0,0592	0,0641	0,1014	0,1837	0,0630	0,1284	0,0517	0,8341
A8	0,0852	0,1080	0,0696	0,0853	0,1167	0,1764	0,0959	0,1380	0,0858	0,9610
A9	0,0755	0,1000	0,0615	0,0645	0,1030	0,1920	0,0724	0,1397	0,0679	0,8765
A10	0,0724	0,1045	0,0605	0,0641	0,1055	0,1665	0,0715	0,1198	0,0578	0,8226
A11	0,0736	0,0941	0,0552	0,0630	0,0991	0,1649	0,0606	0,0920	0,0495	0,7520
A12	0,0685	0,1075	0,0538	0,0563	0,0967	0,1740	0,0767	0,1170	0,0368	0,7872
A13	0,0787	0,1148	0,0648	0,0681	0,1130	0,1684	0,0785	0,1353	0,0603	0,8818
A14	0,0785	0,1187	0,0633	0,0822	0,1020	0,1509	0,0814	0,1397	0,0970	0,9136

Tablo 44, her alternatifin toplam tercih değeri (V_i) ile birlikte büyükten küçüğe sıralamasını göstermektedir. Bu sıralama, karar vericiler için en uygun alternatifi belirlemede doğrudan yol göstericidir.

A8, en yüksek V_i = 0,9610 değeri ile 1. sıra ile en iyi performans sergileyen alternatif olarak öne çıkmıştır. A14 ve A4, sırasıyla V_i = 0,9136 değeri ile 2. ve V_i = 0,8928 değer ile 3. sırayı alarak güçlü performans sergilemişlerdir. Öte yandan A6, V_i = 0,6216 değeri ile sıralamada son sırayı almıştır. Bu alternatifi sırası ile A3 ve A11 alternatifleri V_i = 0,6652 değeri ile 13., V_i = 0,7520 değeri ile 12. sırada izlemektedir.

Tablo 44 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercihi ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Toplam	Sıralama
A1	0.7839	9
A2	0.7641	10
A3	0.6652	13
A4	0.8928	3
A5	0.7596	11
A6	0.6216	14
A7	0.8341	6
A8	0.9610	1
A9	0.8765	5
A10	0.8226	7
A11	0.7520	12
A12	0.7872	8
A13	0.8818	4
A14	0.9136	2

6.4.8. Entropi Yöntemi ile Ağırlıklandırma

Entropi yöntemiyle belirlenecek kriter ağırlıkları hesaplama adımları aşağıda gösterilmiştir.

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Analiz edilen alternatiflere (ülkelere) ilişkin tüm kriter değerlerini içeren karar matrisi hazırlanmıştır. Toplamda 14 alternatif (A1–A14) ve 9 kriter (C1–C9) bulunmaktadır. Her bir alternatifin kriterler üzerindeki performansı ölçülerek tabloya aktarılmıştır. Bu matris, karar vericilere sistematik bir karşılaştırma imkânı sunar. Tabloda karar matrisini oluşturan ham verilerin yanı sıra standart sapma, maksimum, minimum, maks – min, ortalama ve toplam satırları da bulunmaktadır. Bu satırlar diğer ÇKKV yöntemleri ile sıralama yaparken kullanılacaktır. Karar matrisinin oluşturulması Tablo 45'te gösterilmiştir.

Tablo 45 - Entropi Yöntemi / Karar Matrisi Tablosu

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	84,7	0,8	44,67	24,5	65,6223	64,8	45,47	17,302	19.566
A2	86,4	0,8422	49,54	29	68,4108	64,9	44,51	10,762	19.745
A3	78,6	0,6329	43,2	25,5	66,3715	62	37,02	6,752	19.634
A4	88,7	0,8145	53,15	38,5	77,5180	68,5	60,64	14,912	33.780
A5	73,2	0,7793	49,64	29,2	64,4586	59,2	59,33	13,174	19.482
A6	66,1	0,5988	39,36	20,6	65,0458	54,4	34,09	11,292	11.717
A7	87,8	0,7792	49,3	30,4	70,1365	68,4	46,92	18,384	22.357
A8	95	0,8111	57,88	40,5	80,6902	65,7	71,4	19,764	37.083
A9	84,2	0,7506	51,17	30,6	71,2239	71,5	53,94	20	29.349
A10	80,7	0,785	50,32	30,4	72,9237	62	53,29	17,154	24.967
A11	82	0,707	45,92	29,9	68,5032	61,4	45,12	13,178	21.391
A12	76,4	0,807	44,76	26,7	66,8907	64,8	57,11	16,748	15.894
A13	87,7	0,8618	53,91	32,3	78,1352	62,7	58,49	19,364	26.074
A14	87,5	0,8913	52,65	39	70,5114	56,2	60,63	20	41.888
Standart Sapma	0,2554	0,2792	0,2652	0,2847	0,3180	0,2747	0,2751	0,3084	0,2789
Maksimum	95	0,8913	57,88	40,5	80,6902	71,5	71,4	20	41.888
Minimum	66,1	0,5988	39,36	20,6	64,4586	54,4	34,09	6,752	11.717
Maks – Min	28,9	0,2925	18,52	19,9	16,2316	17,1	37,31	13,248	30.171
Ortalama	82,7857	0,7758	48,9621	30,5071	70,4601	63,3214	51,9971	15,6276	24.494,7857
Toplam	1.159	10,8607	685,47	427,1	986,4417	886,5	727,96	218,786	342.927

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 46, Entropi yöntemi kapsamında ikinci adım olan karar matrisinin normalize edilmesi aşamasını göstermektedir. Normalize etme işlemi, her bir kriterin farklı ölçek ve birimlerde ölçülmesi nedeniyle ortaya çıkan uyumsuzluğu ortadan kaldırmayı amaçlar. Bu bağlamda her bir alternatifin kriter değeri, ilgili kriterin toplamına bölünerek 0 ile 1 arasında bir değere dönüştürülmüştür. Böylece, kriterler arası karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır.

Tablo 46 - Entropi Yöntemi / Normalize Edilmiş Karar Matrisi Tablosu

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0731	0,0737	0,0652	0,0574	0,0665	0,0731	0,0625	0,0791	0,0571
A2	0,0745	0,0775	0,0723	0,0679	0,0694	0,0732	0,0611	0,0492	0,0576

A3	0,0678	0,0583	0,0630	0,0597	0,0673	0,0699	0,0509	0,0309	0,0573
A4	0,0765	0,0750	0,0775	0,0901	0,0786	0,0773	0,0833	0,0682	0,0985
A5	0,0632	0,0718	0,0724	0,0684	0,0653	0,0668	0,0815	0,0602	0,0568
A6	0,0570	0,0551	0,0574	0,0482	0,0659	0,0614	0,0468	0,0516	0,0342
A7	0,0758	0,0717	0,0719	0,0712	0,0711	0,0772	0,0645	0,0840	0,0652
A8	0,0820	0,0747	0,0844	0,0948	0,0818	0,0741	0,0981	0,0903	0,1081
A9	0,0726	0,0691	0,0746	0,0716	0,0722	0,0807	0,0741	0,0914	0,0856
A10	0,0696	0,0723	0,0734	0,0712	0,0739	0,0699	0,0732	0,0784	0,0728
A11	0,0708	0,0651	0,0670	0,0700	0,0694	0,0693	0,0620	0,0602	0,0624
A12	0,0659	0,0743	0,0653	0,0625	0,0678	0,0731	0,0785	0,0765	0,0463
A13	0,0757	0,0794	0,0786	0,0756	0,0792	0,0707	0,0803	0,0885	0,0760
A14	0,0755	0,0821	0,0768	0,0913	0,0715	0,0634	0,0833	0,0914	0,1221

3) Adım: Entropi değerinin hesaplanması:

Tablo 47'de normalize edilmiş karar matrisindeki her bir değer (r_{ij}) için doğal logaritma $ln\ (r_{ij})$ alınarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Entropi yöntemi kapsamında bu işlem, kriterlerin bilgi dağılımını analiz etmek için gereklidir.

Tablo 47 – Entropi Yöntemi / Normalize Edilmiş Değerlerin Logaritması $ln\ (r_{ij})$

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	-2,6162	-2,6083	-2,7308	-2,8583	-2,7102	-2,6160	-2,7732	-2,5373	-2,8637
A2	-2,5963	-2,5569	-2,6273	-2,6897	-2,6686	-2,6144	-2,7945	-3,0121	-2,8546
A3	-2,6909	-2,8426	-2,7643	-2,8183	-2,6988	-2,6601	-2,9788	-3,4783	-2,8603
A4	-2,5701	-2,5903	-2,5570	-2,4064	-2,5436	-2,5604	-2,4853	-2,6859	-2,3176
A5	-2,7621	-2,6345	-2,6253	-2,6828	-2,7281	-2,7064	-2,5071	-2,8098	-2,8680
A6	-2,8641	-2,8980	-2,8574	-3,0317	-2,7190	-2,7909	-3,0612	-2,9640	-3,3765
A7	-2,5803	-2,6346	-2,6322	-2,6426	-2,6437	-2,5619	-2,7418	-2,4766	-2,7304
A8	-2,5014	-2,5945	-2,4717	-2,3557	-2,5035	-2,6022	-2,3219	-2,4042	-2,2244
A9	-2,6221	-2,6720	-2,5950	-2,6360	-2,6283	-2,5176	-2,6024	-2,3924	-2,4583
A10	-2,6646	-2,6272	-2,6117	-2,6426	-2,6047	-2,6601	-2,6145	-2,5459	-2,6200
A11	-2,6486	-2,7319	-2,7032	-2,6592	-2,6672	-2,6699	-2,7809	-2,8095	-2,7745
A12	-2,7193	-2,5996	-2,7288	-2,7724	-2,6910	-2,6160	-2,5453	-2,5698	-3,0716
A13	-2,5814	-2,5339	-2,5428	-2,5820	-2,5357	-2,6489	-2,5214	-2,4247	-2,5766
A14	-2,5837	-2,5002	-2,5664	-2,3935	-2,6383	-2,7584	-2,4855	-2,3924	-2,1025

Bu tabloda, her bir normalize edilmiş karar matrisi değeri (r_{ij}) ile onun doğal logaritması $ln\ (r_{ij})$ çarpılmıştır. Bu hesaplama, kriterlerin Entropi değerlerinin bulunması için gereklidir ve toplamda, her kriterin düzensizlik veya bilgi içeriği ölçüsüne katkıda bulunur.

Tablo 48 - Entropi Yöntemi / $r_{ij} * ln(r_{ij})$ Tablosu

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	-0,1912	-0,1921	-0,1780	-0,1640	-0,1803	-0,1912	-0,1732	-0,2007	-0,1634
A2	-0,1935	-0,1983	-0,1899	-0,1826	-0,1851	-0,1914	-0,1709	-0,1482	-0,1644
A3	-0,1825	-0,1657	-0,1742	-0,1683	-0,1816	-0,1860	-0,1515	-0,1073	-0,1638
A4	-0,1967	-0,1943	-0,1983	-0,2169	-0,1999	-0,1978	-0,2070	-0,1831	-0,2283
A5	-0,1744	-0,1890	-0,1901	-0,1834	-0,1783	-0,1807	-0,2043	-0,1692	-0,1629
A6	-0,1633	-0,1598	-0,1641	-0,1462	-0,1793	-0,1713	-0,1434	-0,1530	-0,1154
A7	-0,1955	-0,1890	-0,1893	-0,1881	-0,1880	-0,1977	-0,1767	-0,2081	-0,1780
A8	-0,2050	-0,1938	-0,2087	-0,2234	-0,2048	-0,1929	-0,2277	-0,2172	-0,2405
A9	-0,1905	-0,1847	-0,1937	-0,1889	-0,1898	-0,2031	-0,1928	-0,2187	-0,2104
A10	-0,1855	-0,1899	-0,1917	-0,1881	-0,1926	-0,1860	-0,1914	-0,1996	-0,1907
A11	-0,1874	-0,1778	-0,1811	-0,1862	-0,1852	-0,1849	-0,1724	-0,1692	-0,1731
A12	-0,1793	-0,1932	-0,1782	-0,1733	-0,1825	-0,1912	-0,1997	-0,1967	-0,1424
A13	-0,1953	-0,2011	-0,2000	-0,1953	-0,2008	-0,1874	-0,2026	-0,2146	-0,1959
A14	-0,1951	-0,2052	-0,1971	-0,2186	-0,1886	-0,1749	-0,2070	-0,2187	-0,2568
Toplam	-2,6353	-2,6337	-2,6343	-2,6231	-2,6366	-2,6365	-2,6206	-2,6042	-2,5860

Tablo 49'da yer alan Entropi katsayısı $k = (\ln(n))^{-1}$, toplam alternatif sayısına (n) bağlı bir normalizasyon sabitidir. Burada k değeri 0,3789 olarak hesaplanmıştır. Entropi katsayısı, tüm kriterlerin Entropi değerlerinin 0–1 aralığına indirgenmesi ve karşılaştırılabilir hâle getirilmesi için kullanılır. Formülde kullanılmak üzere bu katsayının negatif sunulmuştur (−0,3789).

Tablo 49 - Entropi Yöntemi / Entropi Katsayısı Tablosu

k: Entropi Katsayısı $(\ln(n))^{-1}$	-k
0,378923182	-0,378923182

Tablo 50'de her bir kriter için hesaplanan Entropi değeri (e_j) sunulmaktadır. Entropi değeri, kriterin karar sürecine katkıda bulunduğu bilgi miktarının bir ölçüsüdür.

Tablodaki bulgulara göre, C9 (e_j=0,9799) ve C8 (e_j=0,9868) en düşük Entropi değerlerine sahip kriterlerdir. Düşük Entropi, bu kriterlerin yüksek ayırt ediciliğe ve bilgi içeriğine sahip olduğunu; dolayısıyla karar verme sürecinde daha önemli rol oynayacaklarını gösterir.

Tablo 50 - Entropi Yöntemi / Kriterlere Ait Entropi Değeri Tablosu (e_j)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
e_j	0,9986	0,9980	0,9982	0,9940	0,9991	0,9990	0,9930	0,98680	0,9799

4) Adım: Ayırt edicilik derecesinin hesaplanması:

Tablo 51 - Entropi Yöntemi / Kriterlerin Bilgi Miktarı Tablosu (d_j)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
d_j	0,0014	0,0020	0,0018	0,0060	0,0009	0,0010	0,0070	0,0132	0,0201	0,0535

Tablo 51, Entropi yöntemi çerçevesinde her bir kriterin ayırt edicilik derecesini veya bilgi miktarını (d_j) göstermektedir. Bu değerler, her bir kriterin karar sürecine sağladığı bilgilendirici katkıyı ve alternatifler arasında farklılık yaratma potansiyelini ölçmektedir.

5) Adım: Kriter ağırlıklarının belirlenmesi:

Tablo 52, Entropi yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarını (w_j) göstermektedir. Bu ağırlıklar, her bir kriterin karar verme sürecindeki görece önemini ve katkısını belirlemektedir. Entropi yöntemi, her bir kriterin sağladığı bilgi miktarına dayanarak, kriterlerin ne kadar "belirsizlik" taşıdığını hesaplar ve buna göre ağırlıklarını atar. Yüksek bilgi miktarına sahip kriterler, daha fazla ağırlığa sahip olurken, düşük bilgi taşıyan kriterler daha az ağırlık alır.

Tabloda görüldüğü üzere, en yüksek ağırlığa sahip kriter C9 (w_j=0,3763) olup, bu kriterin karar sürecinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Diğer önemli kriterler arasında C8 (w_j=0,2468) ve C7 (w_j=0,1306) yer almaktadır. Bu kriterler, alternatifler arasındaki farkları belirlemede daha fazla bilgi sağlayarak, modelin daha güvenilir ve etkili

sonuçlar üretmesine olanak tanır. C4 kriteri de w_j=0,1127 ile dikkate değer bir ağırlığa sahiptir, bu da onun karar verme sürecindeki önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, C5 (w_j=0,0174) ve C6 (w_j=0,0182) gibi kriterler daha düşük ağırlıklara sahiptir ve alternatiflerin sıralanmasında daha az etkili olacaktır. Bu durum, bu kriterlerin karar süreçlerinde daha az belirleyici olduğunu ve bu kriterlerin ağırlıklarının daha düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 52 - Entropi Yöntemi / Kriterlere Ait Ağırlık Tablosu (w_j)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
w_j	0,0268	0,0378	0,0334	0,1127	0,0174	0,0182	0,1306	0,2468	0,3763	1,0000

Sonuç olarak, bu adımda elde edilen ağırlıklar, karar verme sürecinde hangi kriterlerin daha fazla dikkate alınması gerektiğine dair önemli bir rehber sunar. Yüksek ağırlıklı kriterler, alternatiflerin değerlendirilmesinde ve sıralanmasında ön plana çıkarken, düşük ağırlıklı kriterler karar sürecine daha az etki edecektir.

6.4.9. Entropi Ağırlıklı RAWEC Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'te belirtildiği üzere karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalizasyonu:

Tablo 53, RAWEC yöntemi ile normalize edilmiş karar matrisinin fayda kriterlerini göstermektedir. Bu matris, her bir alternatifin her bir kriterdeki normalize edilmiş değerlerini içermektedir. Normalize etme işlemi, farklı kriterlerin ölçek farklarını ortadan kaldırarak, her bir kriterin karar verme sürecindeki eşit katkısını sağlar. Bu adımda, her bir kriterin fayda değerleri 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir, böylece tüm alternatifler karşılaştırılabilir hale gelmiştir.

Tablo 53 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Fayda Kriteri Tablosu (n_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000
Standart Sapma	0,0777	0,0916	0,0848	0,1399	0,0640	0,0657	0,1438	0,2043	0,2009

Tablo 54, RAWEC yönteminin bir diğer aşaması olan maliyet kriterleri için normalize edilmiş karar matrisini göstermektedir. Bu matris, her bir alternatifin her bir maliyet kriterindeki normalize edilmiş değerlerini içermektedir. Maliyet kriterleri, genellikle en düşük değere sahip olan alternatiflerin daha istenen seçenekler olduğu durumlardır. Bu sebeple, normalizasyon işleminde, her bir kriterin en düşük değeri 0'a, en yüksek değeri ise 1'e dönüştürülür.

Tablo 54 - RAWEC Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Maliyet Kriteri Tablosu (n'_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,7804	0,7485	0,8811	0,8408	0,9823	0,8395	0,7497	0,3902	0,5988
A2	0,7650	0,7110	0,7945	0,7103	0,9422	0,8382	0,7659	0,6274	0,5934
A3	0,8410	0,9461	0,9111	0,8078	0,9712	0,8774	0,9209	1,0000	0,5968
A4	0,7452	0,7352	0,7405	0,5351	0,8315	0,7942	0,5622	0,4528	0,3469
A5	0,9030	0,7684	0,7929	0,7055	1,0000	0,9189	0,5746	0,5125	0,6014
A6	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9910	1,0000	1,0000	0,5979	1,0000
A7	0,7528	0,7685	0,7984	0,6776	0,9190	0,7953	0,7266	0,3673	0,5241

A8	0,6958	0,7383	0,6800	0,5086	0,7988	0,8280	0,4775	0,3416	0,3160
A9	0,7850	0,7978	0,7692	0,6732	0,9050	0,7608	0,6320	0,3376	0,3992
A10	0,8191	0,7628	0,7822	0,6776	0,8839	0,8774	0,6397	0,3936	0,4693
A11	0,8061	0,8470	0,8571	0,6890	0,9410	0,8860	0,7555	0,5124	0,5478
A12	0,8652	0,7420	0,8794	0,7715	0,9636	0,8395	0,5969	0,4032	0,7372
A13	0,7537	0,6948	0,7301	0,6378	0,8250	0,8676	0,5828	0,3487	0,4494
A14	0,7554	0,6718	0,7476	0,5282	0,9142	0,9680	0,5623	0,3376	0,2797
Standart Sapma	0,0778	0,0925	0,0848	0,1318	0,0644	0,0660	0,1469	0,1796	0,1864

3) Adım: Kriter ağırlığından sapmanın hesaplanması:

Tablo 55, RAWEC yönteminde normalize edilmiş fayda verilerinin maksimum değerden sapmalarını gösteren bir tablodur. Bu tablo, her bir alternatifin, her bir kriterdeki maksimum değerle arasındaki farkı $(1 - n_{ij})$ göstermektedir. Buradaki amaç, her bir alternatifin her kriterdeki performansının ne kadar iyi olduğunu görmek, yani maksimum değere ne kadar yakın olduklarını belirlemektir.

Tablo 55 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu $(1 - n_{ij})$

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,1084	0,1024	0,2282	0,3951	0,1867	0,0937	0,3632	0,1349	0,5329
A2	0,0905	0,0551	0,1441	0,2840	0,1522	0,0923	0,3766	0,4619	0,5286
A3	0,1726	0,2899	0,2536	0,3704	0,1775	0,1329	0,4815	0,6624	0,5313
A4	0,0663	0,0862	0,0817	0,0494	0,0393	0,0420	0,1507	0,2544	0,1936
A5	0,2295	0,1257	0,1424	0,2790	0,2012	0,1720	0,1690	0,3413	0,5349
A6	0,3042	0,3282	0,3200	0,4914	0,1939	0,2392	0,5225	0,4354	0,7203
A7	0,0758	0,1258	0,1482	0,2494	0,1308	0,0434	0,3429	0,0808	0,4663
A8	0,0000	0,0900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0811	0,0000	0,0118	0,1147
A9	0,1137	0,1579	0,1159	0,2444	0,1173	0,0000	0,2445	0,0000	0,2993
A10	0,1505	0,1193	0,1306	0,2494	0,0963	0,1329	0,2536	0,1423	0,4040
A11	0,1368	0,2068	0,2066	0,2617	0,1510	0,1413	0,3681	0,3411	0,4893
A12	0,1958	0,0946	0,2267	0,3407	0,1710	0,0937	0,2001	0,1626	0,6206
A13	0,0768	0,0331	0,0686	0,2025	0,0317	0,1231	0,1808	0,0318	0,3775
A14	0,0789	0,0000	0,0904	0,0370	0,1261	0,2140	0,1508	0,0000	0,0000

Tablo 56, RAWEC yönteminde normalize edilmiş maliyet verilerinin maksimum değerden sapmalarını $(1 - n'_{ij})$ gösteren bir tablodur. Bu tablonun amacı, her bir

alternatifin her bir kriterdeki maliyet performansının, kriterdeki maksimum değerden ne kadar uzak olduğunu gözler önüne sermektir. Bu veriler, alternatiflerin maliyet açısından ne kadar verimli olduklarını değerlendirmeye yardımcı olur.

Tablo 56 - RAWEC Yöntemi / Normalize Edilmiş Fayda Verilerinin Maksimum Değerden Sapma Tablosu($1 - n'_{ij}$)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,2196	0,2515	0,1189	0,1592	0,0177	0,1605	0,2503	0,6098	0,4012
A2	0,2350	0,2890	0,2055	0,2897	0,0578	0,1618	0,2341	0,3726	0,4066
A3	0,1590	0,0539	0,0889	0,1922	0,0288	0,1226	0,0791	0,0000	0,4032
A4	0,2548	0,2648	0,2595	0,4649	0,1685	0,2058	0,4378	0,5472	0,6531
A5	0,0970	0,2316	0,2071	0,2945	0,0000	0,0811	0,4254	0,4875	0,3986
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0090	0,0000	0,0000	0,4021	0,0000
A7	0,2472	0,2315	0,2016	0,3224	0,0810	0,2047	0,2734	0,6327	0,4759
A8	0,3042	0,2617	0,3200	0,4914	0,2012	0,1720	0,5225	0,6584	0,6840
A9	0,2150	0,2022	0,2308	0,3268	0,0950	0,2392	0,3680	0,6624	0,6008
A10	0,1809	0,2372	0,2178	0,3224	0,1161	0,1226	0,3603	0,6064	0,5307
A11	0,1939	0,1530	0,1429	0,3110	0,0590	0,1140	0,2445	0,4876	0,4522
A12	0,1348	0,2580	0,1206	0,2285	0,0364	0,1605	0,4031	0,5968	0,2628
A13	0,2463	0,3052	0,2699	0,3622	0,1750	0,1324	0,4172	0,6513	0,5506
A14	0,2446	0,3282	0,2524	0,4718	0,0858	0,0320	0,4377	0,6624	0,7203

Entropi yöntemi göre elde edilmiş kriterlerin ağırlıkları Tablo 52'de belirtildiği üzere bu aşamada yönteme dâhil edilmiştir.

Tablo 57, RAWEC yöntemine dayalı olarak her bir alternatif için kriter ağırlıklarından kaynaklanan toplam sapmanın hesaplanmasını içermektedir. Bu tablo, her alternatifin her bir kriterdeki sapmalarının, kriterlerin ağırlıkları ile çarpılarak toplam sapma değerlerinin elde edilmesini göstermektedir. Toplam sütunu, her bir alternatifin tüm kriterlerdeki sapmalarının toplamını verir. Bu toplam değer, alternatiflerin genel değerlendirilmesinde kullanılır.

Tablo 57 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0029	0,0039	0,0076	0,0445	0,0032	0,0017	0,0474	0,0333	0,2005	0,3451
A2	0,0024	0,0021	0,0048	0,0320	0,0026	0,0017	0,0492	0,1140	0,1989	0,4077
A3	0,0046	0,0110	0,0085	0,0417	0,0031	0,0024	0,0629	0,1635	0,1999	0,4976
A4	0,0018	0,0033	0,0027	0,0056	0,0007	0,0008	0,0197	0,0628	0,0728	0,1701
A5	0,0061	0,0047	0,0048	0,0315	0,0035	0,0031	0,0221	0,0842	0,2013	0,3613
A6	0,0081	0,0124	0,0107	0,0554	0,0034	0,0044	0,0683	0,1074	0,2710	0,5411
A7	0,0020	0,0048	0,0050	0,0281	0,0023	0,0008	0,0448	0,0199	0,1754	0,2831
A8	0,0000	0,0034	0,0000	0,0000	0,0000	0,0015	0,0000	0,0029	0,0432	0,0510
A9	0,0030	0,0060	0,0039	0,0276	0,0020	0,0000	0,0319	0,0000	0,1126	0,1871
A10	0,0040	0,0045	0,0044	0,0281	0,0017	0,0024	0,0331	0,0351	0,1520	0,2654
A11	0,0037	0,0078	0,0069	0,0295	0,0026	0,0026	0,0481	0,0842	0,1841	0,3695
A12	0,0052	0,0036	0,0076	0,0384	0,0030	0,0017	0,0261	0,0401	0,2335	0,3592
A13	0,0021	0,0013	0,0023	0,0228	0,0006	0,0022	0,0236	0,0078	0,1421	0,2047
A14	0,0021	0,0000	0,0030	0,0042	0,0022	0,0039	0,0197	0,0000	0,0000	0,0351

Tablo 58, RAWEC yöntemi ile hesaplanan ve normalize edilmiş fayda verilerinin maliyet açısından sapmalarını göstermektedir. Bu tablo, her alternatifin belirli kriterlerdeki sapmalarının, ilgili kriter ağırlıkları ile çarpılarak maliyet değerlerinin hesaplandığı bir veri setini sunmaktadır.

Tablo 58 - RAWEC Yöntemi / Kriter Ağırlığından Toplam Sapmanın Hesaplanması Tablosu (v'_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0059	0,0095	0,0040	0,0179	0,0003	0,0029	0,0327	0,1505	0,1509	0,3746
A2	0,0063	0,0109	0,0069	0,0326	0,0010	0,0030	0,0306	0,0920	0,1530	0,3362
A3	0,0043	0,0020	0,0030	0,0217	0,0005	0,0022	0,0103	0,0000	0,1517	0,1957
A4	0,0068	0,0100	0,0087	0,0524	0,0029	0,0038	0,0572	0,1350	0,2458	0,5226
A5	0,0026	0,0088	0,0069	0,0332	0,0000	0,0015	0,0556	0,1203	0,1500	0,3788
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0992	0,0000	0,0994
A7	0,0066	0,0087	0,0067	0,0363	0,0014	0,0037	0,0357	0,1561	0,1791	0,4345
A8	0,0081	0,0099	0,0107	0,0554	0,0035	0,0031	0,0683	0,1625	0,2574	0,5789
A9	0,0058	0,0076	0,0077	0,0368	0,0017	0,0044	0,0481	0,1635	0,2260	0,5015
A10	0,0048	0,0090	0,0073	0,0363	0,0020	0,0022	0,0471	0,1496	0,1997	0,4581
A11	0,0052	0,0058	0,0048	0,0351	0,0010	0,0021	0,0319	0,1203	0,1702	0,3763
A12	0,0036	0,0097	0,0040	0,0258	0,0006	0,0029	0,0527	0,1473	0,0989	0,3455
A13	0,0066	0,0115	0,0090	0,0408	0,0030	0,0024	0,0545	0,1607	0,2072	0,4958
A14	0,0065	0,0124	0,0084	0,0532	0,0015	0,0006	0,0572	0,1635	0,2710	0,5743

4) RAWEC değerinin hesaplanması:

Tablo 59, RAWEC yöntemiyle hesaplanan sonuçları ve alternatiflerin sıralamasını göstermektedir. Bu tablodaki "Q_i" değerleri, her bir alternatifin genel performansını temsil eden skorlardır. RAWEC yöntemi, alternatiflerin belirli kriterlere göre ne kadar iyi performans gösterdiğini değerlendirirken, her bir alternatifin başarı derecesini, toplam fayda ve maliyet sapmalarını dikkate alarak bir skor ile ifade eder. Bu skor, her bir alternatifin göreceli performansını yansıtır ve sıralama yapmaya olanak tanır.

Tablonun "Sıralama" sütunu, her alternatifin "Q_i" değerine göre sıralanmasını göstermektedir. Bu sıralama, alternatiflerin karşılaştırılabilirliğini ve hangi alternatifin daha iyi performans gösterdiğini belirlemeye yardımcı olur.

A14 alternatifi, 0,884770475 skoruyla en yüksek performansı göstererek birinci sırada yer alırken, A8 alternatifi 0,838195976 skoru ile ikinci, A4 alternatifi ise 0,508915072 skoru ile üçüncü sırada yer almıştır.

Diğer yönden A6 alternatifi -0,689674302 skoru ile sonuncu, yani 14. sırada yer almış ve düşük performans sergilemiştir. Bu alternatifi sırası ile -0,435391352 skoru ile A3 13. sırada, -0,096171318 skoruyla A2 12. sırada takip etmişlerdir. Diğer alternatifler de sırasıyla kendi performanslarına göre sıralanmıştır. Bu sıralamalar, karar vericilerin hangi alternatiflerin daha yüksek fayda sağladığını ve daha iyi performans gösterdiğini belirlemeleri açısından önemlidir.

Tablo 59 - RAWEC Yöntemi/ Sonuç ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Q_i	Sıralama
A1	0,040999476	8
A2	-0,096171318	12
A3	-0,435391352	13
A4	0,508915072	3
A5	0,02362153	9
A6	-0,689674302	14
A7	0,211031866	7
A8	0,838195976	2
A9	0,456717047	4
A10	0,266393486	6
A11	0,009233776	10
A12	-0,019463203	11
A13	0,415516034	5
A14	0,884770475	1

6.4.10. Entropi Ağırlıklı EDAS Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'de gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Tüm kriterler için ortalama çözümün belirlenmesi:

Tablo 45'te belirtildiği üzere her bir kritere ait aritmetik ortalama belirlenmiştir.

3) Adım: Ortalamadan pozitif uzaklığı (PDA) ve ortalama matrislerden negatif uzaklığı (NDA) ölçüt türüne (fayda ve maliyet) göre hesaplanması:

Tablo 60'da verilen PDA değerleri, her bir alternatifin ilgili kriterde ortalama performansa kıyasla ne kadar pozitif bir sapma gösterdiğini ortaya koymaktadır. PDA değerleri, özellikle fayda türü kriterler için alternatiflerin üstünlük derecelerini belirlemede önemlidir. Örneğin, A8 alternatifi hemen hemen tüm kriterlerde yüksek PDA değerlerine sahip olup, özellikle C1, C3, C4, C5, C7, C8 ve C9 kriterlerinde dikkat çekici düzeyde pozitif uzaklık sergilemiştir. Bu durum, A8'in ortalama performansın oldukça üzerinde bir başarı sergilediğini göstermektedir. A4 ve A14 alternatifleri de PDA açısından öne çıkarken, A3 ve A6 gibi alternatifler çoğu kriterde sıfır PDA değeriyle ortalamanın altında kalmıştır.

Tablo 60 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Pozitif Uzaklık Tablosu (PDA_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0231	0,0312	0,0000	0,0000	0,0000	0,0234	0,0000	0,1071	0,0000
A2	0,0437	0,0856	0,0118	0,0000	0,0000	0,0249	0,0000	0,0000	0,0000
A3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A4	0,0714	0,0499	0,0855	0,2620	0,1002	0,0818	0,1662	0,0000	0,3791
A5	0,0000	0,0046	0,0138	0,0000	0,0000	0,0000	0,1410	0,0000	0,0000
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A7	0,0606	0,0044	0,0069	0,0000	0,0000	0,0802	0,0000	0,1764	0,0000
A8	0,1475	0,0455	0,1821	0,3276	0,1452	0,0376	0,3732	0,2647	0,5139
A9	0,0171	0,0000	0,0451	0,0030	0,0108	0,1292	0,0374	0,2798	0,1982
A10	0,0000	0,0119	0,0277	0,0000	0,0350	0,0000	0,0249	0,0977	0,0193
A11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A12	0,0000	0,0403	0,0000	0,0000	0,0000	0,0234	0,0983	0,0717	0,0000
A13	0,0594	0,1109	0,1011	0,0588	0,1089	0,0000	0,1249	0,2391	0,0645
A14	0,0569	0,1489	0,0753	0,2784	0,0007	0,0000	0,1660	0,2798	0,7101

Tablo 61'de yer alan NDA değerleri ise, alternatiflerin ortalama performanstan negatif sapmalarını göstermektedir. NDA, özellikle maliyet türü kriterlerde önem taşır ve düşük NDA değerleri genellikle daha iyi performans anlamına gelir. A8 alternatifi, tüm kriterlerde sıfır NDA değeriyle öne çıkarak, negatif sapma göstermeyen tek alternatif olarak dikkat çekmektedir. Bu durum A8'in yalnızca ortalamanın üzerinde performans göstermekle kalmayıp, aynı zamanda negatif yönde hiçbir sapma sergilemediğini ifade eder. Buna karşın, A6 alternatifi, özellikle C1, C2, C3, C4, C6, C7, C8 ve C9 kriterlerinde oldukça yüksek NDA değerleriyle en düşük performans sergileyen alternatiflerden biri olmuştur. A3 ve A12 de belirgin negatif sapmalar sergileyen diğer alternatiflerdir.

Tablo 61 - EDAS Yöntemi / Ortalamadan Negatif Uzaklık Tablosu (NDA_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0000	0,0000	0,0877	0,1969	0,0687	0,0000	0,1255	0,0000	0,2012
A2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0494	0,0291	0,0000	0,1440	0,3113	0,1939
A3	0,0506	0,1842	0,1177	0,1641	0,0580	0,0209	0,2880	0,5679	0,1984
A4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0458	0,0000
A5	0,1158	0,0000	0,0000	0,0428	0,0852	0,0651	0,0000	0,1570	0,2046
A6	0,2016	0,2281	0,1961	0,3247	0,0768	0,1409	0,3444	0,2774	0,5217
A7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0035	0,0046	0,0000	0,0976	0,0000	0,0873
A8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A9	0,0000	0,0324	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A10	0,0252	0,0000	0,0000	0,0035	0,0000	0,0209	0,0000	0,0000	0,0000
A11	0,0095	0,0886	0,0621	0,0199	0,0278	0,0303	0,1323	0,1567	0,1267
A12	0,0771	0,0000	0,0858	0,1248	0,0507	0,0000	0,0000	0,0000	0,3511
A13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0098	0,0000	0,0000	0,0000
A14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1125	0,0000	0,0000	0,0000

4) Adım: Tüm alternatifler için PDA ve NDA'nın ağırlıklı toplamlarının belirlenmesi:

Çalışmada kullanılan kriterlerin karar verme sürecindeki göreli önemlerini yansıtan ağırlıkları Tablo 52'de belirtildiği üzere bu aşamada yönteme eklenmiştir.

Tablo 62, her bir alternatif için hesaplanan ortalamadan pozitif uzaklıkların (PDA) kriter ağırlıklarıyla çarpılarak elde edilen toplam değerleri göstermektedir. Bu değerler, her bir alternatifin ilgili kriterlerde ortalamanın üzerinde gösterdiği performansın, karar verme sürecindeki önem derecelerine göre ağırlıklandırılmış bir ölçüsünü sunmaktadır. Tablo

incelendiğinde, A8 (0,3593) ve A14 (0,3990) alternatiflerinin en yüksek ağırlıklı pozitif uzaklık toplamına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu alternatiflerin performans bakımından diğer alternatiflere kıyasla ortalamanın üzerinde güçlü bir başarı sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, A3, A6 ve A11 gibi alternatifler ise 0 değerine sahip olup, ortalamanın üzerinde herhangi bir katkı sunamamıştır. Bu aşama, karar vericilere hangi alternatiflerin güçlü yönlere sahip olduğunu anlamaları açısından önemli bir içgörü sağlamaktadır.

Tablo 62 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin PDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (SP_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0006	0,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0264	0,0000	0,0287
A2	0,0012	0,0032	0,0004	0,0000	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0053
A3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A4	0,0019	0,0019	0,0029	0,0295	0,0017	0,0015	0,0217	0,0000	0,1426	0,2038
A5	0,0000	0,0002	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0184	0,0000	0,0000	0,0191
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A7	0,0016	0,0002	0,0002	0,0000	0,0000	0,0015	0,0000	0,0435	0,0000	0,0470
A8	0,0039	0,0017	0,0061	0,0369	0,0025	0,0007	0,0487	0,0653	0,1934	0,3593
A9	0,0005	0,0000	0,0015	0,0003	0,0002	0,0024	0,0049	0,0690	0,0746	0,1533
A10	0,0000	0,0004	0,0009	0,0000	0,0006	0,0000	0,0032	0,0241	0,0073	0,0366
A11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A12	0,0000	0,0015	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0128	0,0177	0,0000	0,0325
A13	0,0016	0,0042	0,0034	0,0066	0,0019	0,0000	0,0163	0,0590	0,0243	0,1172
A14	0,0015	0,0056	0,0025	0,0314	0,0000	0,0000	0,0217	0,0690	0,2672	0,3990

Tablo 63, her bir alternatif için hesaplanan ortalamadan negatif uzaklıkların (NDA) kriter ağırlıklarıyla çarpılarak elde edilen toplam değerleri sunmaktadır. Bu değerler, alternatiflerin ilgili kriterlerde ortalamanın altında kalan performanslarının ağırlıklı ölçüsünü temsil etmektedir. Tablo sonuçları incelendiğinde, A6 (0,3708) ve A3 (0,2846) alternatiflerinin en yüksek ağırlıklı negatif uzaklık toplamına sahip olduğu görülmektedir. Bu, söz konusu alternatiflerin birçok kriterde ortalamanın altında performans gösterdiği ve iyileştirme gerektiren yönlerinin bulunduğu anlamına gelmektedir. Öte yandan, A8 (0), A13 (0,0002) ve A14 (0,0021) alternatifleri en düşük NDA toplamlarına sahiptir; bu da onların ortalamanın altında kalan bir performans sergilemediği veya çok düşük düzeyde performans

sergilediği anlamına gelir. Bu analiz, alternatiflerin zayıf yönlerinin belirlenmesine yardımcı olarak, iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Tablo 63 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatifler İçin NDA Ağırlıklı Toplamlarının Belirlenmesi Tablosu (NP_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0000	0,0000	0,0029	0,0222	0,0012	0,0000	0,0164	0,0000	0,0757	0,1184
A2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0056	0,0005	0,0000	0,0188	0,0768	0,0730	0,1747
A3	0,0014	0,0070	0,0039	0,0185	0,0010	0,0004	0,0376	0,1402	0,0747	0,2846
A4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0113	0,0000	0,0113
A5	0,0031	0,0000	0,0000	0,0048	0,0015	0,0012	0,0000	0,0387	0,0770	0,1263
A6	0,0054	0,0086	0,0066	0,0366	0,0013	0,0026	0,0450	0,0685	0,1963	0,3708
A7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0001	0,0000	0,0128	0,0000	0,0328	0,0461
A8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A9	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012
A10	0,0007	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0015
A11	0,0003	0,0033	0,0021	0,0022	0,0005	0,0006	0,0173	0,0387	0,0477	0,1126
A12	0,0021	0,0000	0,0029	0,0141	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0,1321	0,1520
A13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002
A14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0021

5) Adım: Tüm alternatifler için SP ve SN değerlerini normalleştirilmesi:

Tablo 64, her bir alternatifin ağırlıklı pozitif uzaklık (SP_i) ve ağırlıklı negatif uzaklık (SN_i) değerlerinin normalleştirilmiş halini sunmaktadır. Normalizasyon işlemi, farklı ölçeklerdeki verilerin karşılaştırılabilir hale getirilmesini sağlar ve karar verme sürecinde alternatiflerin göreli konumlarının daha net bir biçimde anlaşılmasına yardımcı olur.

Tablo sonuçlarına bakıldığında, A14 (1,000) ve A8 (0,9006) alternatiflerinin normalleştirilmiş pozitif uzaklık (NSP_i) değerlerinde en yüksek performansı sergilediği görülmektedir. Bu, bu iki alternatifin diğerlerine kıyasla ortalamanın üzerinde en yüksek katkıyı sağladığını teyit etmektedir. Buna karşın, A3, A6 ve A11 alternatiflerinin NSP_i değerlerinin 0 olması, bu alternatiflerin ortalamanın üzerinde herhangi bir üstünlük göstermediğini işaret etmektedir.

Normalleştirilmiş negatif uzaklık (NSN_i) açısından değerlendirildiğinde, en yüksek değerler A8 (1,000), A13 (0,9995) ve A9 (0,9967) alternatiflerinde gözlemlenmektedir. Bu

durum belirtilen alternatiflerin ortalamanın altında en az dezavantaja sahip olduğunu ve dolayısıyla daha dengeli ve güçlü bir performans profili sergilediklerini göstermektedir. Öte yandan, A6 (0) ve A3 (0,2325) alternatifleri NSN_i açısından en düşük değerlere sahip olup, bu durum onların görece daha zayıf ve iyileştirmeye açık yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 64 - EDAS Yöntemi / Tüm Alternatiflerin SP ve SN Değerlerinin Normalleştirilmesi Tablosu (NSP_i, NSN_i)

Alternatif	$\boldsymbol{NSP_i}$	$\boldsymbol{NSN_i}$
A1	0,071850489	0,680622398
A2	0,013166661	0,528929446
A3	0	0,232536726
A4	0,510731125	0,969527151
A5	0,047767383	0,659282444
A6	0	0
A7	0,117827309	0,875760092
A8	0,90062164	1
A9	0,384352115	0,996695264
A10	0,091712107	0,99608718
A11	0	0,696352252
A12	0,081422865	0,590096735
A13	0,293874682	0,999517015
A14	1	0,994465106

6) Adım: Tüm alternatifler için değerlendirme puanının (AS) hesaplanması:

Tablo 65, tüm alternatiflerin nihai değerlendirme puanlarını (AS_i) ve buna göre belirlenen sıralamalarını sunmaktadır. EDAS yönteminin bu son aşaması, her bir alternatifin normalize edilmiş pozitif ve negatif uzaklık değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanan AS_i skorlarına dayanmaktadır. Bu skor, alternatiflerin genel performansını ifade etmekte ve karar vericilere en uygun seçeneği belirleme konusunda yol göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek değerlendirme puanı A14 (0,9972) ile kaydedilmiş olup, bu alternatif çalışmada en üstün performansı sergileyerek birinci sırada yer almıştır. İkinci sırada A8 (0,9503) ve üçüncü sırada ise A4 (0,7401) yer almaktadır. Bu sonuçlar, söz konusu alternatiflerin hem pozitif hem de negatif performans kriterlerinde öne çıktığını ve genel başarı düzeylerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, A6 (0,0000), A3 (0,1163) ve A2 (0,2710) alternatifleri en düşük puanları alarak sırasıyla son üç sırayı paylaşmıştır. Bu durum, bu alternatiflerin değerlendirme kriterlerine göre görece daha zayıf bir performans sergilediğini ve geliştirilmesi gereken yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 65 - EDAS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı (AS_i) ve Sıralaması Tablosu

Alternatif	AS_i	Sıralama
A1	0,376236443	8
A2	0,271048053	12
A3	0,116268363	13
A4	0,740129138	3
A5	0,353524914	9
A6	0	14
A7	0,496793701	7
A8	0,95031082	2
A9	0,69052369	4
A10	0,543899643	6
A11	0,348176126	10
A12	0,3357598	11
A13	0,646695848	5
A14	0,997232553	1

6.4.11. Entropi Ağırlıklı MAUT Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'te gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmesi:

Tablo 52'de belirtildiği üzere Entropi Yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

3) Adım: Karar matrisi normalize edilmesi:

Tablo 66'da Entropi ağırlıklı MAUT yöntemi kapsamında oluşturulan karar matrisinin normalize edilmiş hali sunulmaktadır. Normalize işleminde, her kriter için gözlemler, aralarındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla belirli bir aralığa (0-1 arası) dönüştürülmüştür. Böylece, farklı ölçekteki kriterler arasında karşılaştırma yapılabilir hale getirilmiş ve karar verme sürecinde bir ortak dil oluşturulmuştur.

Tablo 66 - MAUT Yöntemi / Karar Matrisinin Normalize Tablosu (u_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,6436	0,6879	0,2867	0,1960	0,0717	0,6082	0,3050	0,7963	0,2602
A2	0,7024	0,8321	0,5497	0,4221	0,2435	0,6140	0,2793	0,3027	0,2661
A3	0,4325	0,1166	0,2073	0,2462	0,1179	0,4444	0,0785	0,0000	0,2624
A4	0,7820	0,7374	0,7446	0,8995	0,8046	0,8246	0,7116	0,6159	0,7313
A5	0,2457	0,6171	0,5551	0,4322	0,0000	0,2807	0,6765	0,4848	0,2574
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0362	0,0000	0,0000	0,3427	0,0000
A7	0,7509	0,6168	0,5367	0,4925	0,3498	0,8187	0,3439	0,8780	0,3527
A8	1,0000	0,7258	1,0000	1,0000	1,0000	0,6608	1,0000	0,9822	0,8407
A9	0,6263	0,5190	0,6377	0,5025	0,4168	1,0000	0,5320	1,0000	0,5844
A10	0,5052	0,6366	0,5918	0,4925	0,5215	0,4444	0,5146	0,7852	0,4392
A11	0,5502	0,3699	0,3542	0,4673	0,2492	0,4094	0,2956	0,4851	0,3206
A12	0,3564	0,7118	0,2916	0,3065	0,1498	0,6082	0,6170	0,7545	0,1384
A13	0,7474	0,8991	0,7856	0,5879	0,8426	0,4854	0,6540	0,9520	0,4759
A14	0,7405	1,0000	0,7176	0,9246	0,3729	0,1053	0,7113	1,0000	1,0000

4) Adım: Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri bulunması:

Tablo 67, Entropi ağırlıklı MAUT yöntemiyle yapılan analizde, her alternatifin dokuz kritere göre aldığı ağırlıklı fayda değerlerini ve bu değerlerin toplamını göstermektedir. Bu tabloda, normalize edilmiş karar matrisine Entropi yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları uygulanarak her bir alternatif için nihai fayda puanları hesaplanmıştır.

Tablo 67 - MAUT Yöntemi /Fayda Değeri Tablosu (U_x)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0172	0,0260	0,0096	0,0221	0,0012	0,0111	0,0398	0,1965	0,0979	0,4215
A2	0,0188	0,0314	0,0184	0,0476	0,0042	0,0112	0,0365	0,0747	0,1001	0,3429
A3	0,0116	0,0044	0,0069	0,0278	0,0020	0,0081	0,0103	0,0000	0,0987	0,1698
A4	0,0209	0,0279	0,0249	0,1014	0,0140	0,0150	0,0930	0,1520	0,2751	0,7242
A5	0,0066	0,0233	0,0186	0,0487	0,0000	0,0051	0,0884	0,1196	0,0968	0,4071
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0000	0,0000	0,0846	0,0000	0,0852
A7	0,0201	0,0233	0,0179	0,0555	0,0061	0,0149	0,0449	0,2167	0,1327	0,5322
A8	0,0268	0,0274	0,0334	0,1127	0,0174	0,0121	0,1306	0,2424	0,3163	0,9191
A9	0,0168	0,0196	0,0213	0,0566	0,0072	0,0182	0,0695	0,2468	0,2199	0,6760
A10	0,0135	0,0240	0,0198	0,0555	0,0091	0,0081	0,0672	0,1938	0,1652	0,5563
A11	0,0147	0,0140	0,0118	0,0527	0,0043	0,0075	0,0386	0,1197	0,1206	0,3840
A12	0,0095	0,0269	0,0097	0,0346	0,0026	0,0111	0,0806	0,1862	0,0521	0,4133
A13	0,0200	0,0340	0,0263	0,0663	0,0146	0,0089	0,0854	0,2349	0,1790	0,6694
A14	0,0198	0,0378	0,0240	0,1042	0,0065	0,0019	0,0929	0,2468	0,3763	0,9102

5) Adım: Alternatiflerin her bir kritere göre aldığı fayda değerleri toplamı alınarak toplam fayda değerleri hesaplanması:

Tablo 68'e her alternatifin kriterlere göre elde ettiği toplam fayda değerlerini ve bu değerlere dayalı sıralamasını göstermektedir. Toplam fayda değerleri, Tablo 67'deki her alternatif için hesaplanan kriter bazlı fayda değerlerinin toplanması yoluyla elde edilmiştir. Bu sonuçlar, alternatiflerin genel performansını ve sıralamadaki yerini belirlemektedir.

Tabloya bakıldığında en yüksek toplam fayda değerine sahip alternatifin A8 olduğu görülmektedir (0,9191 puan, 1. sıra). Bu sonuç, A8'in çok yönlü güçlü bir performans sergilediğini ve analiz edilen kriterler arasında en üstün alternatif olduğunu göstermektedir. A8, önceki analizlerde de öne çıktığı gibi, özellikle C1, C3, C4, C5, C7, C8 ve C9 kriterlerinde yüksek başarı sağlamıştır. İkinci sırada yer alan A14 alternatifi (0.9102 puan), A8'e oldukça yakın bir performans sergilemiş, özellikle C2, C4, C7, C8 ve C9 kriterlerindeki güçlü performansıyla üst sıralarda yer almıştır. Üçüncü sırada A4 (0,7242) yer almakta, bu alternatif özellikle C4, C7, C8 ve C9 kriterlerinde sağladığı yüksek katkılarla öne çıkmaktadır.

Düşük performans sergileyen alternatifler ise A6 (0,0852 puan, 14.sıra), A6 (0,1698 puan, 13.sıra), A6 (0,3429 puan, 12.sıra) şeklinde sıralanmıştır.

Tablo 68 - MAUT Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Puanlama	Sıralama
A1	0.421482923	8
A2	0.342928101	12
A3	0.169817801	13
A4	0.724214221	3
A5	0.407119978	10
A6	0.085197895	14
A7	0.53215949	7
A8	0.919132481	1
A9	0.67599295	4
A10	0.556270956	6
A11	0.383985537	11
A12	0.413326038	9
A13	0.669421886	5
A14	0.910180014	2

6.4.12. Entropi Ağırlıklı CRADIS Yöntemi ile Sıralama

1) Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'te gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 69'da yer alan normalize karar matrisi, 14 alternatif (A1–A14) ve 9 kritere (C1–C9) ilişkin değerler normalize edilerek 0 ile 1 aralığına dönüştürülmüştür. Normalizasyon süreci, farklı ölçeklerdeki kriterlerin karşılaştırılabilir hâle getirilmesini sağlamış ve böylece her bir alternatifin kriterler bazında göreli başarım düzeyi ortaya konmuştur. Tabloda dikkat çeken ilk unsur, A8 alternatifinin birçok kriterde maksimum normalize değeri olan 1,0000'e ulaşmış olmasıdır. Özellikle C1, C3, C4, C5, C7, C8 ve C9 kriterlerinde en yüksek performansa sahip olan A8, bu yönüyle ideal alternatife en yakın

aday olarak öne çıkmaktadır. Benzer şekilde, A13 ve A14 alternatifleri de birçok kriterde yüksek değerler sergilemiş ve özellikle C2, C4, C5 ve C9 gibi stratejik kriterlerde öne çıkmıştır. Bu durum, söz konusu alternatiflerin genel sıralamada üst basamaklarda yer alacaklarına işaret etmektedir.

Öte yandan, A6 alternatifi birçok kriterde düşük normalize değerleriyle dikkat çekmektedir. Özellikle C1, C2, C4 ve C9 gibi belirleyici kriterlerde 0.70'in altında kalan bu alternatifin, göreli zayıf bir performans sergilediği görülmektedir. Bu bulgu, A6'nın ideal çözüme olan uzaklığının fazla olacağına ve dolayısıyla sıralamada alt sıralarda yer alabileceğine işaret etmektedir. Ayrıca C9 kriteri incelendiğinde, yalnızca A14 ve A8'in 0,90 üzeri değerlere ulaştığı, diğer alternatiflerin ise görece düşük değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu durum, C9'un yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğunu ve karar verme sürecinde kritik rol oynayabileceğini göstermektedir. Tüm bu veriler ışığında, normalize karar matrisi hem alternatifler arasındaki göreli başarı düzeylerini hem de kriterlerin ayırt edicilik seviyelerini ortaya koymakta, böylece CRADIS yönteminin ilerleyen adımları için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 69 - CRADIS Yöntemi / Karar Matrisi Normalize Tablosu (n_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000

3) Adım: Normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması:

Tablo 52'de belirtildiği üzere Entropi Yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

Tablo 70'te sunulan veriler, bir önceki adımda elde edilen normalize edilmiş karar matrisinin, Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıklarıyla çarpılması sonucunda elde edilmiştir. Bu işlem sayesinde, her bir alternatifin her bir kritere göre ağırlıklı performansı sayısal olarak ifade edilmiştir.

Tablo 70 - CRADIS Yöntemi / Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırma Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0239	0,0339	0,0258	0,0682	0,0141	0,0165	0,0832	0,2135	0,1758
A2	0,0243	0,0357	0,0286	0,0807	0,0147	0,0166	0,0814	0,1328	0,1774
A3	0,0221	0,0268	0,0250	0,0710	0,0143	0,0158	0,0677	0,0833	0,1764
A4	0,0250	0,0345	0,0307	0,1072	0,0167	0,0175	0,1109	0,1840	0,3034
A5	0,0206	0,0330	0,0287	0,0813	0,0139	0,0151	0,1086	0,1626	0,1750
A6	0,0186	0,0254	0,0227	0,0573	0,0140	0,0139	0,0624	0,1393	0,1052
A7	0,0247	0,0330	0,0285	0,0846	0,0151	0,0175	0,0858	0,2268	0,2008
A8	0,0268	0,0344	0,0334	0,1127	0,0174	0,0168	0,1306	0,2439	0,3331
A9	0,0237	0,0318	0,0296	0,0852	0,0153	0,0182	0,0987	0,2468	0,2636
A10	0,0227	0,0333	0,0291	0,0846	0,0157	0,0158	0,0975	0,2117	0,2243
A11	0,0231	0,0300	0,0265	0,0832	0,0148	0,0157	0,0826	0,1626	0,1921
A12	0,0215	0,0342	0,0259	0,0743	0,0144	0,0165	0,1045	0,2067	0,1428
A13	0,0247	0,0365	0,0311	0,0899	0,0168	0,0160	0,1070	0,2389	0,2342
A14	0,0246	0,0378	0,0304	0,1085	0,0152	0,0143	0,1109	0,2468	0,3763

4) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümün belirlenmesi:

Tablo 71'de sunulan maksimum ve minimum değerler, bir önceki adımda elde edilen ağırlıklı normalize karar matrisinden türetilmiştir. Her bir kriterin sütununda yer alan maksimum değerler ideal çözümü (t_i), minimum değerler ise anti-ideal çözümü (t_{ai}) temsil etmektedir.

Tablo 71 - CRADIS Yöntemi / v_{ij} Maksimum ve Minimum Değerler Tablosu (t_i, t_{ai})

Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Maksimum	0,0268	0,0378	0,0334	0,1127	0,0174	0,0182	0,1306	0,2468	0,3763
Minimum	0,0186	0,0254	0,0227	0,0573	0,0139	0,0139	0,0624	0,0833	0,1052

5) Adım: İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmaların hesaplanması:

Bu adımda her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanmıştır. Karar matrisindeki ağırlıklandırılmış ve normalize edilmiş değerlerin referans çözümlere ne kadar yakın ya da uzak olduğunu sayısal olarak ortaya koymaktadır. Bu kapsamda Tablo 72, ideal çözümden sapma değerlerini (d^+), Tablo 73 ise anti-ideal çözümden sapma değerlerini (d^-) içermektedir.

Tablo 72'de yer alan her bir değer, ilgili alternatifin her bir kritere göre ideal çözüme ne kadar uzak olduğunu göstermektedir. Daha düşük değerler, alternatifin ilgili kriterde ideal çözüme daha yakın olduğunu ifade eder.

Tablo 72 - CRADIS Yöntemi / İdeal Çözümden Sapma Tablosu (d^+)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0029	0,0039	0,0076	0,0445	0,0032	0,0017	0,0474	0,0333	0,2005
A2	0,0024	0,0021	0,0048	0,0320	0,0026	0,0017	0,0492	0,1140	0,1989
A3	0,0046	0,0110	0,0085	0,0417	0,0031	0,0024	0,0629	0,1635	0,1999
A4	0,0018	0,0033	0,0027	0,0056	0,0007	0,0008	0,0197	0,0628	0,0728
A5	0,0061	0,0047	0,0048	0,0315	0,0035	0,0031	0,0221	0,0842	0,2013
A6	0,0081	0,0124	0,0107	0,0554	0,0034	0,0044	0,0683	0,1074	0,2710
A7	0,0020	0,0048	0,0050	0,0281	0,0023	0,0008	0,0448	0,0199	0,1754
A8	0,0000	0,0034	0,0000	0,0000	0,0000	0,0015	0,0000	0,0029	0,0432
A9	0,0030	0,0060	0,0039	0,0276	0,0020	0,0000	0,0319	0,0000	0,1126
A10	0,0040	0,0045	0,0044	0,0281	0,0017	0,0024	0,0331	0,0351	0,1520
A11	0,0037	0,0078	0,0069	0,0295	0,0026	0,0026	0,0481	0,0842	0,1841
A12	0,0052	0,0036	0,0076	0,0384	0,0030	0,0017	0,0261	0,0401	0,2335
A13	0,0021	0,0013	0,0023	0,0228	0,0006	0,0022	0,0236	0,0078	0,1421
A14	0,0021	0,0000	0,0030	0,0042	0,0022	0,0039	0,0197	0,0000	0,0000

Tablo 73'te her bir alternatifin anti-ideal çözüme ne kadar uzak olduğu hesaplanmıştır. Yüksek sapma değerleri, alternatifin kötü (anti-ideal) çözüme uzak, yani daha iyi durumda olduğunu göstermektedir.

Tablo 73 - CRADIS Yöntemi / Anti-İdeal Çözümden Sapma Tablosu (d^-)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0052	0,0085	0,0031	0,0109	0,0003	0,0027	0,0208	0,1302	0,0705
A2	0,0057	0,0103	0,0059	0,0234	0,0009	0,0027	0,0191	0,0495	0,0721
A3	0,0035	0,0014	0,0022	0,0136	0,0004	0,0019	0,0054	0,0000	0,0711
A4	0,0064	0,0091	0,0080	0,0498	0,0028	0,0036	0,0486	0,1007	0,1982
A5	0,0020	0,0077	0,0059	0,0239	0,0000	0,0012	0,0462	0,0792	0,0697
A6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0560	0,0000
A7	0,0061	0,0076	0,0057	0,0273	0,0012	0,0036	0,0235	0,1435	0,0956
A8	0,0081	0,0090	0,0107	0,0554	0,0035	0,0029	0,0683	0,1606	0,2279
A9	0,0051	0,0064	0,0068	0,0278	0,0015	0,0044	0,0363	0,1635	0,1584
A10	0,0041	0,0079	0,0063	0,0273	0,0018	0,0019	0,0351	0,1283	0,1190
A11	0,0045	0,0046	0,0038	0,0259	0,0009	0,0018	0,0202	0,0793	0,0869
A12	0,0029	0,0088	0,0031	0,0170	0,0005	0,0027	0,0421	0,1233	0,0375
A13	0,0061	0,0111	0,0084	0,0326	0,0029	0,0021	0,0446	0,1556	0,1290
A14	0,0060	0,0124	0,0077	0,0512	0,0013	0,0005	0,0486	0,1635	0,2710

Alternatifler arasında dikkat çeken performans karşıtlığı A8 ve A6 arasında görülmektedir. A8 hem ideal çözüme olan yakınlığı hem de anti-ideal çözüme olan uzaklığı ile güçlü bir aday iken; A6 bu iki parametrede zıt bir eğilim sergileyerek düşük performans ortaya koymuştur. A14 ve A4 de benzer şekilde güçlü alternatifler arasında yer almakta; özellikle düşük d^+ ve yüksek d^- değerleri ile karar vericiler için öncelikli alternatifler olarak öne çıkmaktadırlar.

6) Adım: Her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma dereceleri sırasıyla hesaplanması:

Tablo 74'te yer alan s_i^+ değerleri, alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklıklarını gösterirken; s_i^- değerleri, alternatiflerin anti-ideal çözüme olan uzaklıklarını göstermektedir. Karar verici bakış açısından ideal bir alternatif, s_i^+ değeri düşük ve s_i^- değeri yüksek olan

alternatif olacaktır. Bu durum, alternatifin hem en iyi senaryoya yakın hem de en kötü senaryodan uzak olduğunu göstermektedir.

Tablo 74 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin İdeal ve Anti-İdeal Çözümden Sapma Dereceleri Tablosu (s_i^+, s_i^-)

Alternatif	s_i^+	s_i^-
A1	0,3451	0,2521
A2	0,4077	0,1895
A3	0,4976	0,0997
A4	0,1701	0,4272
A5	0,3613	0,2359
A6	0,5411	0,0561
A7	0,2831	0,3141
A8	0,0510	0,5463
A9	0,1871	0,4102
A10	0,2654	0,3319
A11	0,3695	0,1629
A12	0,3592	0,1981
A13	0,1182	0,2927
A14	0,0864	0,3245

7) Adım: Optimum alternatiflerden sapmalara ilişkin olarak her bir alternatif için fayda fonksiyonunun hesaplanması:

Tablo 75, her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözüme göre ne derece sapma gösterdiğini ve bu sapmalar doğrultusunda elde edilen fayda fonksiyonu değerlerini içermektedir. Bu tabloda dört temel sütun bulunmaktadır. Bunlar; K_i^+ (İdeal çözüme yakınlık düzeyi), K_i^- (Anti-ideal çözüme uzaklık düzeyi), s_0^+ (Minimum sapma değeri – ideal), s_0^- (Maksimum sapma değeri – anti-ideal) şeklindedir.

K_i^+ sütununa göre en yüksek değeri alan alternatif A14 (1,000) olup ideal çözüme en yakın alternatif olarak belirlenmiştir. Bu değere çok yakın bir diğer alternatif olan A8 (K_i^+ = 0.6891) de güçlü bir performans göstermektedir. Bu iki alternatif, değerlendirilen kriterler doğrultusunda en yüksek başarıya ulaşmış ülkelerdir. Diğer öne çıkanlar arasında A4 (0,2064), A9 (0,1877) ve A13 (0,1715) bulunmaktadır. Bu alternatifler, ideal çözüme göre belirli bir yakınlık sergilemekte, ancak A14 ve A8'e göre daha geride kalmaktadır.

K_i^- sütununa göre en yüksek değeri yine A14 (1,000) almıştır; bu da A14'ün aynı zamanda anti-ideal çözüme en uzak alternatif olduğunu göstermektedir. A8 (0,9718), A10 (0,5904) ve A7 (0,5589) gibi alternatifler de anti-ideal çözümden uzaklıklarıyla dikkat çekmektedir. Bu, onların kötü performans gösteren değerlere karşı mesafeli olduklarını ve tercih edilebilirliklerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 75 - CRADIS Yöntemi / Optimum Alternatiften Sapmalara İlişkin Fayda Fonksiyonu Tablosu

Alternatif	K_i^+	K_i^-	s_0^+	s_0^-
A1	0,101733093	0,448476165	0,0351	0,5621
A2	0,086110878	0,33708687		
A3	0,0705646	0,17727734		
A4	0,206445038	0,759899151		
A5	0,097178552	0,419699991		
A6	0,064890907	0,099881742		
A7	0,124033524	0,558867011		
A8	0,689090622	0,971817558		
A9	0,187707802	0,72969686		
A10	0,132318353	0,590398577		
A11	0,095033437	0,405191414		
A12	0,097735644	0,423363733		
A13	0,171493955	0,698235604		
A14	1	1		

8) Adım: Alternatiflerin fayda derecelerinden ortalama sapmaları hesaplanarak alternatiflerin sıralanması:

Tablo 76, her alternatifin hesaplanan değerlendirme puanını ve buna göre aldığı sıralamayı göstermektedir. Burada, Q_i puanı ne kadar yüksekse, alternatifin performansı o kadar iyidir ve sıralamadaki yeri o kadar üstte olur.

Tabloda, A14 alternatifi 1,000 puan ile en yüksek Q_i değerine sahip olup açık ara birinci sırada yer almaktadır. Bu durum, A14'ün tüm kriterlerde en dengeli ve güçlü performansı gösterdiğini teyit etmektedir. İkinci sırada A8 (0,8305 puan) yer almakta olup, bu alternatif de güçlü performansıyla dikkat çekmektedir. Üçüncü ve dördüncü sıralar ise sırasıyla A4 (0,4832) ve A9 (0,4587) tarafından paylaşılmıştır. Bu alternatifler, yüksek puanları ile karar vericiler için tercih edilebilir seçenekler olarak öne çıkmaktadır.

Diğer taraftan, A6 (0,0824), A3 (0,1239) ve A2 (0,2116) gibi alternatifler, en düşük puanlara sahip olarak son üç sırada yer almakta ve göreceli olarak daha düşük performans sergiledikleri ortaya çıkmaktadır.

Tablo 76 - CRADIS Yöntemi / Alternatiflerin Değerlendirme Puanı ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Q_i	Sıralama
A1	0,275104629	8
A2	0,211598874	12
A3	0,12392097	13
A4	0,483172094	3
A5	0,258439272	10
A6	0,082386324	14
A7	0,341450267	7
A8	0,83045409	2
A9	0,458702331	4
A10	0,361358465	6
A11	0,250112425	11
A12	0,260549688	9
A13	0,43486478	5
A14	1	1

6.4.13. Entropi Ağırlıklı ARAS Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'te gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Her kriter için optimal performansın belirlenmesi:

Tablo 45'te belirtildiği üzere karar matrisinden maksimum kriter değerleri yönteme eklenmiştir.

3) Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 77'de yer alan normalize karar matrisi, her alternatifin kriterlere göre standartlaştırılmış performanslarını göstermektedir. Tablo 77'ye baktığımızda, her alternatifin farklı kriterler bazında normalize edilmiş değerleri yer almakta ve bu değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir. Örneğin, A8 alternatifi, C1'den C9'a kadar birçok kriterde diğer alternatiflere göre yüksek normalize değerler alarak öne çıkmaktadır. Özellikle C4 (0,0948), C7 (0,0981) ve C9 (0,1081) gibi kritik kriterlerde yüksek performans sergilemiştir. Benzer şekilde, A14 alternatifi de C4 (0,0913), C8 (0,0914) ve C9 (0,1221) kriterlerinde dikkat çekici yüksek değerlere sahiptir.

Tablo 77 - ARAS Yöntemi / Normalize Karar Matris Tablosu (r_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0731	0,0737	0,0652	0,0574	0,0665	0,0731	0,0625	0,0791	0,0571
A2	0,0745	0,0775	0,0723	0,0679	0,0694	0,0732	0,0611	0,0492	0,0576
A3	0,0678	0,0583	0,0630	0,0597	0,0673	0,0699	0,0509	0,0309	0,0573
A4	0,0765	0,0750	0,0775	0,0901	0,0786	0,0773	0,0833	0,0682	0,0985
A5	0,0632	0,0718	0,0724	0,0684	0,0653	0,0668	0,0815	0,0602	0,0568
A6	0,0570	0,0551	0,0574	0,0482	0,0659	0,0614	0,0468	0,0516	0,0342
A7	0,0758	0,0717	0,0719	0,0712	0,0711	0,0772	0,0645	0,0840	0,0652
A8	0,0820	0,0747	0,0844	0,0948	0,0818	0,0741	0,0981	0,0903	0,1081
A9	0,0726	0,0691	0,0746	0,0716	0,0722	0,0807	0,0741	0,0914	0,0856
A10	0,0696	0,0723	0,0734	0,0712	0,0739	0,0699	0,0732	0,0784	0,0728
A11	0,0708	0,0651	0,0670	0,0700	0,0694	0,0693	0,0620	0,0602	0,0624
A12	0,0659	0,0743	0,0653	0,0625	0,0678	0,0731	0,0785	0,0765	0,0463
A13	0,0757	0,0794	0,0786	0,0756	0,0792	0,0707	0,0803	0,0885	0,0760
A14	0,0755	0,0821	0,0768	0,0913	0,0715	0,0634	0,0833	0,0914	0,1221

4) Ağırlıklı normalize karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 52'de belirtildiği gibi Entropi Yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

Tablo 78, alternatiflerin her kriter için ağırlıklı normalize edilmiş performans değerlerini göstermektedir. Tablo 78'e bakıldığında, ağırlıklandırma sonucunda kriterlerin göreceli önemleri karar matrisindeki değerlere yansıtılmıştır. Örneğin, C8 ve C9 kriterleri diğerlerine göre daha yüksek ağırlıklara sahip olduğundan, bu sütunlardaki normalize

değerler daha etkili hale gelmiştir. A8 alternatifi C8 ve C9 sütunlarında sırasıyla 0,0223 ve 0,0407 gibi yüksek ağırlıklı değerlere sahipken, A14 alternatifi C9'da en yüksek değer olan 0,0460'ı almıştır. Bu durum, söz konusu kriterlerin alternatiflerin genel değerlendirmesindeki etkisini artırmaktadır. Ayrıca, her alternatifin ağırlıklı performans değerleri kriterlerin önemine göre dengelenmiş olup, bu sayede karar sürecinde daha objektif ve hassas bir sıralama yapılmasına olanak tanınmıştır. Maksimum değer satırı, her bir kriter için ağırlıklı normalize değerlerin en yükseğini göstererek, ideal çözümün belirlenmesinde referans noktası olarak kullanılmaktadır.

Tablo 78 - ARAS Yöntemi / Kriterlerin Ağırlıklandırılmış Normalize Değer Tablosu (v_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,0020	0,0028	0,0022	0,0065	0,0012	0,0013	0,0082	0,0195	0,0215
A2	0,0020	0,0029	0,0024	0,0077	0,0012	0,0013	0,0080	0,0121	0,0217
A3	0,0018	0,0022	0,0021	0,0067	0,0012	0,0013	0,0066	0,0076	0,0215
A4	0,0020	0,0028	0,0026	0,0102	0,0014	0,0014	0,0109	0,0168	0,0371
A5	0,0017	0,0027	0,0024	0,0077	0,0011	0,0012	0,0106	0,0149	0,0214
A6	0,0015	0,0021	0,0019	0,0054	0,0011	0,0011	0,0061	0,0127	0,0129
A7	0,0020	0,0027	0,0024	0,0080	0,0012	0,0014	0,0084	0,0207	0,0245
A8	0,0022	0,0028	0,0028	0,0107	0,0014	0,0014	0,0128	0,0223	0,0407
A9	0,0019	0,0026	0,0025	0,0081	0,0013	0,0015	0,0097	0,0226	0,0322
A10	0,0019	0,0027	0,0025	0,0080	0,0013	0,0013	0,0096	0,0193	0,0274
A11	0,0019	0,0025	0,0022	0,0079	0,0012	0,0013	0,0081	0,0149	0,0235
A12	0,0018	0,0028	0,0022	0,0070	0,0012	0,0013	0,0102	0,0189	0,0174
A13	0,0020	0,0030	0,0026	0,0085	0,0014	0,0013	0,0105	0,0218	0,0286
A14	0,0020	0,0031	0,0026	0,0103	0,0012	0,0012	0,0109	0,0226	0,0460
Maksimum	0,0022	0,0031	0,0028	0,0107	0,0014	0,0015	0,0128	0,0226	0,0460

5) Adım: Optimallik fonksiyon değerleri hesaplanması:

Tablo 79'da alternatiflerin S_i değerleri yer almakta olup, bu değerler, alternatiflerin genel performansını yansıtmaktadır. Tablo 79'a göre, A14 alternatifi 0,0998 ile en yüksek optimallik fonksiyon değerine sahip olup, maksimum değer olan S_0 = 0,1030'a en yakın sonucu vermektedir. Bu da A14'ün kriterler doğrultusunda en uygun alternatif olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, A6 alternatifi 0,0449 değeri ile en düşük optimallik fonksiyonuna sahip olup, bu alternatifin kriterlerde diğerlerine kıyasla daha düşük performans sergilediği anlaşılmaktadır. S_i değerleri, her alternatifin güçlü ve zayıf yönlerini

dikkate alarak kriterlerin ağırlıklı etkisini bir araya getirdiği için, karar vericilere kapsamlı ve dengeli bir sıralama imkanı sunar. Maksimum S_0 referans alınarak alternatiflerin göreli başarımı ölçülür ve böylece sıralama aşamasına geçilir.

Tablo 79 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Optimallik Fonksiyon Değerleri Tablosu (S_i)

Alternatif / Kriter	Toplam ($\boldsymbol{S_i}$)
A1	0,0650
A2	0,0593
A3	0,0511
A4	0,0852
A5	0,0638
A6	0,0449
A7	0,0715
A8	0,0971
A9	0,0823
A10	0,0739
A11	0,0634
A12	0,0629
A13	0,0798
A14	0,0998
Maksimum	0,1030 (S_0)

6) Adım: En Uygun Alternatifin Belirlenmesi:

ARAS yönteminin son aşamasında, alternatiflerin optimallik fonksiyon değerlerinin maksimum değere (S_0 = 0,1030) oranlanmasıyla fayda değerleri (K_i) hesaplanmış ve nihai sıralama Tablo 80'de sunulmuştur. Bu aşama, alternatiflerin göreli performanslarını net bir şekilde karşılaştırmaya olanak sağlamış ve karar verme sürecinde sıralama açısından kesinlik kazandırmıştır.

Tablo 80'e göre, A14 alternatifi 0,9684 ile en yüksek fayda değerine sahiptir ve 1. sırada yer almaktadır. A8 alternatifi 0,9424 ile ikinci sırada, A4 alternatifi ise 0,8267 değeriyle üçüncü sırada yer almaktadır. Buna karşılık, A6 alternatifi 0,4362 ile en düşük fayda değerine sahip olup 14. yani son sırada bulunmaktadır. A3 alternatifi 0,4960 ve A2 alternatifi ise 0,5758 ile 13. ve 12. sıralarda yer almaktadır.

Tablo 80 - ARAS Yöntemi / Alternatiflerin Fayda Değerleri (K_i) ve Sıralaması

Alternatif	Toplam (K_i)	Sıralama
A1	0,631041226	8
A2	0,575813173	12
A3	0,495976442	13
A4	0,826703889	3
A5	0,61889398	9
A6	0,436197279	14
A7	0,693923083	7
A8	0,942379927	2
A9	0,798732145	4
A10	0,71763269	6
A11	0,615211387	10
A12	0,610417108	11
A13	0,774431824	5
A14	0,968444732	1

6.4.14. Entropi Ağırlıklı SAW Yöntemi ile Sıralama

1) Adım: Karar matrisinin oluşturulması:

Tablo 45'te gösterildiği gibi karar matrisi oluşturulmuştur.

2) Adım: Karar matrisinin normalize edilmesi:

Tablo 81'de verilen normalize değerler, alternatiflerin farklı kriterlerdeki göreli güçlerini ortaya koymaktadır. Örneğin, A8 alternatifi C1, C3, C4 ve C5 kriterlerinde 1,0'a çok yakın veya tam 1,0 değerleri ile en iyi performansa sahiptir. Bu, A8'in bu kriterlerde diğer alternatiflere kıyasla en yüksek değere sahip olduğunu gösterir. Öte yandan, A6 gibi bazı alternatiflerin normalize değerleri genellikle daha düşük, örneğin C9 kriterinde 0,2797 gibi bir değerde seyretmektedir; bu da performansının o kritere göre zayıf olduğunu işaret eder. Genel olarak, bu normalize matris her alternatifin farklı kriterler bazında göreli

üstünlük ve zayıflıklarını net biçimde ortaya koyarak, sonraki adımda kriter ağırlıkları ile çarpılarak toplam fayda puanlarının hesaplanmasına olanak sağlar.

Tablo 81 - SAW Yöntemi / Normalize Karar Matrisi Tablosu (r_{ij})

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,8916	0,8976	0,7718	0,6049	0,8133	0,9063	0,6368	0,8651	0,4671
A2	0,9095	0,9449	0,8559	0,7160	0,8478	0,9077	0,6234	0,5381	0,4714
A3	0,8274	0,7101	0,7464	0,6296	0,8225	0,8671	0,5185	0,3376	0,4687
A4	0,9337	0,9138	0,9183	0,9506	0,9607	0,9580	0,8493	0,7456	0,8064
A5	0,7705	0,8743	0,8576	0,7210	0,7988	0,8280	0,8310	0,6587	0,4651
A6	0,6958	0,6718	0,6800	0,5086	0,8061	0,7608	0,4775	0,5646	0,2797
A7	0,9242	0,8742	0,8518	0,7506	0,8692	0,9566	0,6571	0,9192	0,5337
A8	1,0000	0,9100	1,0000	1,0000	1,0000	0,9189	1,0000	0,9882	0,8853
A9	0,8863	0,8421	0,8841	0,7556	0,8827	1,0000	0,7555	1,0000	0,7007
A10	0,8495	0,8807	0,8694	0,7506	0,9037	0,8671	0,7464	0,8577	0,5960
A11	0,8632	0,7932	0,7934	0,7383	0,8490	0,8587	0,6319	0,6589	0,5107
A12	0,8042	0,9054	0,7733	0,6593	0,8290	0,9063	0,7999	0,8374	0,3794
A13	0,9232	0,9669	0,9314	0,7975	0,9683	0,8769	0,8192	0,9682	0,6225
A14	0,9211	1,0000	0,9096	0,9630	0,8739	0,7860	0,8492	1,0000	1,0000

3) Adım: Karar matrisinden hesaplanan tüm kriter değerleri pozitif olmalıdır. Eğer negatif değerler varsa bu değerler pozitif değerlere dönüştürülmesi:

Karar matrisindeki tüm veriler pozitif olduğu için bu adım uygulanmamıştır.

4) Adım: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Oluşturulması ve Toplam Skorların Hesaplanması:

Tablo 52'de belirtildiği üzere Entropi Yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları bu aşamada yönteme eklenmiştir.

Tablo 82'de verilen ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi, her alternatifin kriterlere göre normalize edilmiş değerlerinin Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir. Bu işlem, her kriterin alternatifin toplam tercih skoruna katkısını ölçmek için yapılmıştır. Alternatiflerin her bir kriter için hesaplanan ağırlıklı değerleri toplandığında, alternatiflerin genel performansını gösteren toplam tercihler ortaya çıkar.

Tablo 82 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercih Tablosu (V_i)

Alternatif / Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Toplam
A1	0,0239	0,0339	0,0258	0,0682	0,0141	0,0165	0,0832	0,2135	0,1758	0,6549
A2	0,0243	0,0357	0,0286	0,0807	0,0147	0,0166	0,0814	0,1328	0,1774	0,5923
A3	0,0221	0,0268	0,0250	0,0710	0,0143	0,0158	0,0677	0,0833	0,1764	0,5024
A4	0,0250	0,0345	0,0307	0,1072	0,0167	0,0175	0,1109	0,1840	0,3034	0,8299
A5	0,0206	0,0330	0,0287	0,0813	0,0139	0,0151	0,1086	0,1626	0,1750	0,6387
A6	0,0186	0,0254	0,0227	0,0573	0,0140	0,0139	0,0624	0,1393	0,1052	0,4589
A7	0,0247	0,0330	0,0285	0,0846	0,0151	0,0175	0,0858	0,2268	0,2008	0,7169
A8	0,0268	0,0344	0,0334	0,1127	0,0174	0,0168	0,1306	0,2439	0,3331	0,9490
A9	0,0237	0,0318	0,0296	0,0852	0,0153	0,0182	0,0987	0,2468	0,2636	0,8129
A10	0,0227	0,0333	0,0291	0,0846	0,0157	0,0158	0,0975	0,2117	0,2243	0,7346
A11	0,0231	0,0300	0,0265	0,0832	0,0148	0,0157	0,0826	0,1626	0,1921	0,6305
A12	0,0215	0,0342	0,0259	0,0743	0,0144	0,0165	0,1045	0,2067	0,1428	0,6408
A13	0,0247	0,0365	0,0311	0,0899	0,0168	0,0160	0,1070	0,2389	0,2342	0,7953
A14	0,0246	0,0378	0,0304	0,1085	0,0152	0,0143	0,1109	0,2468	0,3763	0,9649

Tablo 83, her alternatifin toplam tercih puanını ve buna göre yer aldığı sıralamayı göstermektedir. Burada, toplam puanı ne kadar yüksekse, alternatifin performansı o kadar iyidir ve sıralamadaki yeri o kadar üstte olur.

Buna göre, A14 alternatifi en yüksek toplam tercihe (0,9649) sahip olarak birinci sırada yer almaktadır. Onu takip eden A8 (0,9490) ve A4 (0,8299) alternatifleri sırasıyla ikinci ve üçüncü en yüksek toplam skorlarla öne çıkmaktadır. Diğer yandan, A6 alternatifi en düşük toplam tercih puanına (0,4589) sahip olup son sırada kalmıştır. A3 alternatifi 0,5024 ve A2 alternatifi ise 0,5922 ile 13. ve 12. sıralarda yer almaktadır.

Tablo 83 - SAW Yöntemi / Alternatiflerin Toplam Tercihi ve Sıralama Tablosu

Alternatif	Toplam	Sıralama
A1	0,654868492	8
A2	0,592254819	12
A3	0,502423372	13
A4	0,829924245	3
A5	0,638692953	10

A6	0,45891809	14
A7	0,716920921	7
A8	0,949046911	2
A9	0,812947063	4
A10	0,734645309	2
A11	0,630537453	11
A12	0,640752399	9
A13	0,795262197	5
A14	0,964888704	1

6.4.15. Spearman Korelasyon Analizi

Bu bölümde analiz sonucunda elde edilen verilerin korelasyon seviyeleri ölçülmüştür.

Tablo 84'te CRITIC ve Entropi yöntemleri kullanılarak elde edilen kriter ağırlıklandırmaları doğrultusunda farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin (RAWEC, EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS, SAW) sonuçları arasındaki ilişkisellik Spearman korelasyon analizi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen korelasyon katsayıları, her iki ağırlıklandırma yönteminin sonuçları arasında oldukça yüksek bir uyum olduğunu göstermektedir.

Tablo 84'te görülen korelasyon değerleri 0,88 ile 0,98 arasında değişmekte olup, bu da kullanılan ağırlıklandırma tekniklerinin yöntemlerin sıralama performansları üzerinde benzer etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Özellikle RAWEC, EDAS, ARAS ve SAW yöntemlerinde CRITIC ve Entropi ağırlıkları ile hesaplanan sonuçların korelasyonu %97'nin üzerinde seyretmektedir. Bu durum, farklı ağırlık belirleme yöntemlerinin kullanılması halinde bile çok kriterli karar verme yöntemlerinin sıralama sonuçlarının büyük ölçüde tutarlı kaldığını göstermektedir.

Tablo 84 - CRITIC ve Entropi Yöntemlerine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Kendi İçinde Korelasyon Tablosu

E -RAWEC / C-RAWEC	E-EDAS / C-EDAS	E-MAUT / C-MAUT	E-CRADIS / C-CRADIS	E-ARAS / C-ARAS	E-SAW / C-SAW
0,974142185	0,981394393	0,94384831	0,883840139	0,974543973	0,971981632

Tablo 85'te, CRITIC yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin birbirleriyle olan korelasyon seviyeleri incelenmiştir. Analiz sonucunda, yöntemler arasındaki korelasyon katsayılarının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan yöntemlerin sıralama sonuçlarının birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir.

Özellikle RAWEC, EDAS, ARAS ve SAW yöntemleri arasında %99'un üzerinde güçlü bir pozitif korelasyon bulunması, bu yöntemlerin karar verme sürecinde benzer sonuçlar ürettiğine işaret etmektedir. MAUT yöntemi de diğer yöntemlerle %97'nin üzerinde korelasyon göstererek uyumlu sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. CRADIS yöntemi diğerlerine kıyasla biraz daha düşük, ancak yine de güçlü bir korelasyon sergilemiş ve %93 ila %95 arasında değerler elde edilmiştir.

Tablo 85 - CRITIC Yöntemine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Birbirleriyle Olan Korelasyon Tablosu

CRITIC KORELASYON						
	RAWEC	**EDAS**	**MAUT**	**CRADIS**	**ARAS**	**SAW**
RAWEC	1	0,988339369	0,988759639	0,931771773	0,993390118	0,996214692
EDAS	0,988339369	1	0,977035254	0,959400207	0,99911021	0,99684319
MAUT	0,988759639	0,977035254	1	0,931155204	0,981524703	0,987319428
CRADIS	0,931771773	0,959400207	0,931155204	1	0,951557656	0,947526125
ARAS	0,993390118	0,99911021	0,981524703	0,951557656	1	0,998985217
SAW	0,996214692	0,99684319	0,987319428	0,947526125	0,998985217	1

Bu yüksek korelasyonlar, CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılan kriterler kullanıldığında farklı yöntemlerin sıralama ve tercih sonuçlarında tutarlılık sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla, karar vericiler açısından hangi yöntemin tercih edildiği büyük oranda sıralama sonuçlarını değiştirmemekte, bu da analizlerin güvenilirliğini ve karar destek sürecinin sağlamlığını artırmaktadır.

Tablo 86, Entropi yöntemi ile ağırlıklandırılan kriterlere dayalı olarak farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin birbirleriyle olan korelasyon seviyelerini göstermektedir. Elde edilen korelasyon katsayıları genel olarak çok yüksek olup, bu da yöntemler arasında güçlü bir uyum ve tutarlılık olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 86 - Entropi Yöntemine Göre Ağırlıklandırılmış Yöntemlerin Birbirleriyle Olan Korelasyon Tablosu

Entropi KORELASYON						
	RAWEC	**EDAS**	**MAUT**	**CRADIS**	**ARAS**	**SAW**
RAWEC	1	0,992701257	0,995085615	0,921358794	0,990939917	0,99307459
EDAS	0,992701257	1	0,997274223	0,945613375	0,999837552	0,999074458
MAUT	0,995085615	0,997274223	1	0,931640532	0,996509177	0,998688386
CRADIS	0,921358794	0,945613375	0,931640532	1	0,950337134	0,942734143
ARAS	0,990939917	0,999837552	0,996509177	0,950337134	1	0,998740169
SAW	0,99307459	0,999074458	0,998688386	0,942734143	0,998740169	1

Özellikle RAWEC, EDAS, MAUT, ARAS ve SAW yöntemleri arasında %99'un üzerinde neredeyse mükemmele yakın korelasyon değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, bu yöntemlerin Entropi ağırlıklandırması kullanıldığında oldukça benzer sıralama sonuçları ürettiğini göstermektedir. CRADIS yöntemi ise diğer yöntemlere kıyasla biraz daha düşük, ancak yine de güçlü sayılabilecek %92 ile %95 arasında korelasyonlar sergilemiştir.

Bu yüksek korelasyon değerleri, Entropi yönteminin kullandığı kriter ağırlıklarının farklı karar verme yöntemlerinin sonuçlarını genel olarak benzer şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, karar verme süreçlerinde hangi yöntemin seçildiği, sıralama ve tercih sonuçlarında büyük farklılıklara yol açmamaktadır. Buda, Entropi

ağırlıklandırmasının çok kriterli karar verme analizlerinde güvenilir ve tutarlı bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

Bu tablo, farklı ağırlıklandırma yöntemlerinin aynı çok kriterli karar verme yöntemine uygulandığında büyük ölçüde tutarlı ve uyumlu sonuçlar verdiğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, karar destek süreçlerinde CRITIC ve Entropi ağırlıklandırmalarının birbirlerinin yerine kullanılabileceği veya birlikte değerlendirilerek sağlam kararlar alınabileceği söylenebilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, Küresel İnovasyon Endeksi'nde (KİE) yer alan ve 2024 yılında üst-orta gelir grubunda bulunan 14 ülkenin (Arnavutluk, Ermenistan, Bosna Hersek, Bulgaristan, Kolombiya, El Salvador, Gürcistan, Malezya, Mauritius, Meksika, Kuzey Makedonya, Peru, Sırbistan ve Türkiye) Endüstri 4.0 düzeylerini değerlendirmek ve ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini sıralama amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada, Endüstri 4.0'ın çok boyutlu yapısını yansıtabilmek için dokuz farklı kriter seçilmiş ve bu kriterler, ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerini analiz etmekte temel bir çerçeve oluşturmuştur. Kriterler şunlardır: Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Küreselleşme Endeksi, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi, Küresel Siber Güvenlik Endeksi, Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla.

Çalışmanın metodolojik yaklaşımında, kriter ağırlıkları için CRITIC ve Entropi yöntemleri kullanılmış, ülkelerin performans sıralamaları ise RAWEC yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıralamaların tutarlılığının test edilmesi için EDAS, MAUT, CRADIS, ARAS ve SAW yöntemleriyle ek analizler yapılmış ve sonuçlar arasındaki korelasyonlar yüksek bulunmuştur. Spearman Korelasyon Analizi, farklı ÇKKV yöntemleri ile yapılan sıralamalar arasında yüksek bir uyum ve tutarlılık olduğunu göstermiştir (korelasyon katsayıları 0,85'in üzerinde çıkmıştır). Bu durum, analiz sonuçlarının güvenilirliğini ve metodolojik yaklaşımın sağlamlığını kanıtlamaktadır.

Malezya (A8) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 1,42'dir. Yapılan analizde tüm yöntemler ve ağırlıklandırma teknikleri dikkate alındığında en yüksek performans gösteren ülke olmuştur. Ülkenin Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Küresel Siber Güvenlik Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla gibi göstergelerdeki güçlü performansı, Malezya'nın dijitalleşme, inovasyon kapasitesi ve ekonomik kalkınma konularında bölgesel ve küresel ölçekte rekabetçi bir konumda olduğunu ortaya koymaktadır.

Ancak, yüksek bir performans seviyesine ulaşmış olmasına rağmen, Malezya'nın mevcut başarıyı sürdürülebilir kılmak ve potansiyel zayıf alanlarını güçlendirmek için atabileceği stratejik adımlar bulunmaktadır.

Malezya için öneriler:

- Mevcut dijitalleşme ve teknoloji yatırımlarının sürdürülebilirliğinin sağlanması için uzun vadeli dijital stratejilerin güncellenmesi ve kamu-özel sektör iş birliklerinin artırılması gereklidir.
- Yüksek teknolojili sektörlerde derinleşme ve Ar-Ge faaliyetlerinin daha fazla teşvik edilmesi, Malezya'nın küresel inovasyon liderliği yolculuğunu güçlendirecektir.
- İnsan sermayesinin geliştirilmesine yönelik olarak dijital beceriler, yapay zekâ, veri bilimi ve ileri teknoloji alanlarında mesleki eğitim programlarının yaygınlaştırılması, mevcut iş gücünün teknoloji odaklı ekonomiye uyum sağlamasını kolaylaştıracaktır.
- Küresel iş birlikleri ve uluslararası Ar-Ge projelerine daha aktif katılım sağlanarak inovasyon ekosisteminin güçlendirilmesi, Malezya'nın küresel değer zincirlerindeki stratejik konumunu daha da pekiştirecektir.
- Siber güvenlik alanında elde edilen başarıların korunması ve daha ileriye taşınması için sürekli iyileştirme süreçleri oluşturulması, gelişen tehditlere karşı dinamik bir siber güvenlik altyapısının sürdürülebilirliğini sağlayacaktır.
- Ekonomik çeşitliliğin artırılması ve dijital ekonominin farklı sektörlere entegre edilmesi, sadece bilgi teknolojileri değil, tarım, sağlık ve enerji gibi sektörlerde de dijitalleşme ile değer yaratılmasını destekleyecektir.

Sonuç olarak, Malezya'nın mevcut güçlü performansını sürdürmesi, bunu daha da ileriye taşıması ve kapsayıcı kalkınma hedefleriyle bütünleştirmesi için yenilikçi stratejiler geliştirmesi ve uygulamaya koyması kritik öneme sahiptir. Bu yaklaşım, ülkenin yalnızca bölgesel bir lider olarak değil, küresel ölçekte de rekabetçi ve sürdürülebilir bir dijital ekonomi modeli oluşturmasına katkı sağlayacaktır.

Türkiye (A14) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 1,83'tür. Türkiye, yapılan analizde genel sıralamada ikinci sırada yer almış ve özellikle Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYİH), Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi (KİE) ve Küresel Siber Güvenlik Endeksi gibi kritik alanlarda üstün bir performans sergilemiştir. Bunun yanı sıra, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi dışındaki tüm kriterlerde ortalamanın üzerinde bir başarı göstererek güçlü bir genel performans ortaya koymuştur. Türkiye'nin bu başarısında, özellikle yüksek teknoloji üretim kapasitesine yaptığı yatırımlar, Ar-Ge harcamalarının artışı, savunma sanayiindeki ilerlemeler ve

teknoloji geliştirme bölgelerinin yaygınlaştırılması gibi unsurlar belirleyici bir rol oynamaktadır.

Türkiye için öneriler:

- Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi kapsamında özellikle hukukun üstünlüğü, mülkiyet haklarının korunması ve girişimcilik ortamının desteklenmesi gibi alanlarda iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu sayede yatırım ortamı daha cazip hale getirilebilir ve küresel sermaye akışından daha fazla pay alınabilir.
- Ar-Ge ve inovasyon ekosisteminin daha da güçlendirilmesi, teknoloji geliştirme bölgelerinin sektörel çeşitlilik ve bölgesel dengeyi gözeterek yaygınlaştırılması ve üniversite-sanayi iş birliklerinin artırılması önerilmektedir.
- Savunma sanayi dışındaki yüksek katma değerli sektörlerde de teknoloji üretiminin yaygınlaştırılması, özellikle sağlık teknolojileri, yeşil enerji, yapay zekâ ve biyoteknoloji gibi stratejik alanlarda yetkinliğin artırılması önemlidir.
- Siber güvenlik alanındaki güçlü performansın sürdürülebilirliği için ulusal siber güvenlik stratejilerinin güncellenmesi, sektörel risk analizlerinin yapılması ve siber güvenlik farkındalığının tüm toplumsal kesimlerde artırılması gereklidir.
- Kişi başına düşen gelir düzeyinin daha da yükseltilmesi için yüksek teknolojili ürün ihracat oranlarının artırılması, Türkiye'nin küresel tedarik zincirlerindeki konumunu güçlendirecektir.
- Küreselleşme Endeksi kapsamında dış ticaretin daha da çeşitlendirilmesi, stratejik pazarlara yönelik ticaret ve yatırım anlaşmalarının artırılması ve küresel entegrasyonun güçlendirilmesi önerilmektedir.
- Yapay zekâ, büyük veri, nesnelerin interneti ve ileri üretim teknolojileri gibi alanlarda nitelikli iş gücü yetiştirilmesine odaklanılması, bu alanlarda uygulamalı eğitim ve sertifikasyon programlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, Türkiye, Endüstri 4.0 yolculuğunda önemli bir ivme kazanmış ve özellikle teknoloji, inovasyon ve siber güvenlik alanlarında dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Mevcut başarının sürdürülebilirliği için politika yapıcılar, özel sektör ve akademi dünyasının iş birliği içinde dijital dönüşümü hızlandıran, ekonomik özgürlükleri destekleyen ve yüksek teknolojili üretim kapasitesini artıran bir kalkınma stratejisi izlemesi kritik öneme sahiptir.

Bulgaristan (A4) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 2,92'dir. Bulgaristan, yapılan analizde genel sıralamada üçüncü sırada yer almış ve Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi, Küreselleşme Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) kriterlerinde güçlü bir profil ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, Küresel Siber Güvenlik Endeksi dışındaki tüm kriterlerde ortalamanın üzerinde bir performans sergilemiştir. Bu durum, Bulgaristan'ın ekonomik özgürlükler, küresel entegrasyon ve ekonomik büyüme alanlarında belirli bir olgunluk seviyesine ulaştığını göstermektedir. Ancak, teknoloji ve dijitalleşme odaklı kriterlerde (örneğin Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi) orta düzeyde bir performans sergilenmesi, ülkenin dijital ekonomi ve Endüstri 4.0 süreçlerine entegrasyon kapasitesinin henüz tam anlamıyla gelişmediğini göstermektedir.

Bulgaristan için öneriler:

- Bilgi iletişim teknolojileri altyapısının güçlendirilmesi ve dijitalleşmenin tüm sektörlerde yaygınlaştırılması, dijital dönüşüm sürecinin hızlandırılmasına katkı sağlayacaktır. Özellikle kırsal ve dezavantajlı bölgelerde dijital erişimin artırılması önem arz etmektedir.
- Küresel Siber Güvenlik Endeksi'ndeki düşük performansın iyileştirilmesi amacıyla ulusal bir siber güvenlik stratejisi hazırlanmalı, kurumsal kapasitenin geliştirilmesi ve sektörel risk analizlerinin yapılması gerekmektedir.
- Teknoloji odaklı kriterlerde ilerleme sağlanabilmesi için Ar-Ge yatırımlarının artırılması, özellikle üniversite-sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi ve yenilikçi girişimcilik ekosisteminin desteklenmesi önerilmektedir.
- Küresel İnovasyon Endeksi ve Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi'nde daha üst sıralara yükselebilmek için yenilikçi ürün ve hizmetlerin ticarileştirilmesine yönelik destek mekanizmalarının geliştirilmesi gereklidir.
- Yüksek teknolojili üretim kapasitesinin artırılması amacıyla sektör bazlı teşviklerin sağlanması, bilgi ve iletişim teknolojileri, biyoteknoloji, yapay zekâ ve ileri üretim sistemleri gibi alanlarda yatırım ortamının iyileştirilmesi önemlidir.
- Mevcut ekonomik özgürlükler ortamının korunarak daha fazla uluslararası yatırım çekilmesi, Bulgaristan'ın küresel değer zincirlerinde daha rekabetçi bir konuma gelmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Bulgaristan mevcut ekonomik potansiyelini daha ileriye taşıyabilmek için dijitalleşme ve inovasyona dayalı bir kalkınma vizyonu benimsemeli, teknoloji odaklı yatırımlarını artırarak Endüstri 4.0'ın sunduğu fırsatları daha etkin şekilde değerlendirmelidir.

Mauritius (A9) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 4,42'dir. Mauritius, analizde genel sıralamada dördüncü sırada yer almış ve Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi dışında kalan tüm kriterlerde ortalamanın üzerinde bir performans sergilemiştir. Özellikle Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi ve Küresel Siber Güvenlik Endeksi'ndeki güçlü performansı, Mauritius'un iş yapma ortamı, hukuki çerçevesi ve siber güvenlik altyapısı açısından avantajlı bir konumda olduğunu göstermektedir. Bu başarı, ülkenin küresel ölçekte rekabet gücünü artırırken, dijitalleşme ve teknoloji odaklı dönüşüm süreçlerinde önemli bir potansiyel barındırdığını da ortaya koymaktadır.

Mauritius için öneriler:

- E-devlet altyapısının güçlendirilmesi amacıyla kamu hizmetlerinin dijitalleşme süreçleri hızlandırılmalı, vatandaşların dijital hizmetlere erişimini kolaylaştıran çözümler geliştirilmelidir. Özellikle kullanıcı dostu arayüzler, dijital vatandaşlık uygulamaları ve mobil hizmet çözümleri yaygınlaştırılmalıdır.
- Ekonomik özgürlükler ve siber güvenlik alanındaki güçlü performansın korunması ve geliştirilmesi, yatırım ortamının daha cazip hale gelmesi için kritik önemdedir. Bunun için regülasyon süreçlerinin şeffaflığı artırılmalı, yasal çerçeveler inovasyon dostu bir perspektifle güncellenmelidir.
- Dijital becerilerin geliştirilmesine yönelik eğitim programlarının yaygınlaştırılması, teknoloji ve inovasyon alanlarındaki iş gücü kapasitesini artıracaktır. Bu doğrultuda özellikle genç nüfusa yönelik programlar, dijital girişimcilik destekleri ve yetenek geliştirme merkezleri teşvik edilmelidir.
- Bilgi ve iletişim teknolojileri altyapısının daha da güçlendirilmesi ve özellikle kırsal bölgelerde dijital erişimin artırılması, dijital uçurumun azaltılmasına katkı sağlayacaktır.
- Küresel İnovasyon Endeksi ve Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi gibi alanlarda daha yüksek performans gösterebilmek için Ar-Ge yatırımları artırılmalı, yenilikçi girişimcilik desteklenmeli ve üniversite-sanayi iş birlikleri yaygınlaştırılmalıdır.

- Siber güvenlik alanında kazanılan başarıların sürdürülebilirliği için sürekli eğitim, farkındalık çalışmaları ve sektörel risk analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, Mauritius, güçlü yönlerini korurken özellikle e-devlet altyapısının geliştirilmesi, dijitalleşmenin kamu sektörüne entegrasyonu ve inovasyon kapasitesinin güçlendirilmesi yönünde atacağı adımlarla Endüstri 4.0 ekosisteminde daha üst sıralara yükselebilir ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine daha etkin bir şekilde ulaşabilir.

Sırbistan (A13) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 4,42'dir. Sırbistan, yapılan analizde dördüncülüğü Mauritius ile paylaşmış ve özellikle Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi ve Küreselleşme Endeksi gibi alanlarda orta-üst düzeyde performans göstermiştir. Bununla birlikte, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi dışındaki tüm kriterlerde ortalamanın üzerinde bir başarı sergilemesi, ülkenin genel olarak dijitalleşme, teknoloji ve inovasyon alanlarında umut vaat eden bir konumda olduğunu ortaya koymaktadır.

Sırbistan için öneriler:

- Ekonomik özgürlüklerin artırılması ve iş ortamının iyileştirilmesi, özellikle girişimcilik ekosisteminin desteklenmesi ve bürokratik engellerin azaltılması açısından önceliklendirilmelidir. Böylece yenilikçi girişimlerin önü açılarak, yabancı yatırım çekme potansiyeli artırılabilir.
- Dijital altyapının güçlendirilmesi ve geniş bant erişiminin yaygınlaştırılması, özellikle kırsal ve az gelişmiş bölgelerde dijital uçurumun azaltılmasına yönelik politikalar geliştirilmelidir.
- Ar-Ge ve inovasyon kapasitesinin artırılması için üniversite-sanayi iş birliklerinin teşvik edilmesi, teknoloji geliştirme bölgelerinin sayısının ve etkinliğinin artırılması gerekmektedir.
- Küresel Siber Güvenlik Endeksi performansının güçlendirilmesi, ulusal siber güvenlik stratejilerinin güncellenmesi ve sektörel farkındalık programlarının yaygınlaştırılmasıyla desteklenmelidir.
- Yapay zekâ, büyük veri, nesnelerin interneti gibi ileri teknoloji alanlarında nitelikli iş gücünün yetiştirilmesi, bu alanlardaki eğitim ve sertifikasyon programlarının çeşitlendirilmesi ve yaygınlaştırılması önem taşımaktadır.

- Küreselleşme Endeksi'nde gösterilen olumlu performansın sürdürülebilir kılınması ve dış ticaretin çeşitlendirilmesi, ülkenin küresel tedarik zincirlerindeki rekabet gücünü artıracaktır.
- Kişi başına düşen gelir düzeyini yükseltmek amacıyla yüksek katma değerli üretim ve hizmet sektörlerinin desteklenmesi önceliklendirilmelidir.

Sonuç olarak, Sırbistan, mevcut performansını dijitalleşme ve inovasyona dayalı politikalarla pekiştirerek, Endüstri 4.0 dönüşüm sürecinde önemli bir oyuncu konumuna yükselebilir. Bu hedef doğrultusunda kamu, özel sektör ve akademi iş birliğiyle bütüncül ve stratejik adımlar atılması kritik önemdedir.

Gürcistan (A7) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 6,50'dir. Gürcistan, yapılan analizde genel sıralamada 6. sırada yer almış ve özellikle Küreselleşme Endeksi ile Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi kriterlerinde göze çarpan bir performans sergilemiştir. Ancak, Küresel İnovasyon Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) gibi önemli kriterlerde düşük skorlar elde etmiştir. Bu durum, ülkenin küresel ekonomik entegrasyon ve özgürlükler açısından belli avantajları bulunsa da teknoloji, inovasyon ve ekonomik büyüme alanlarında gelişme kaydetme ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Gürcistan için öneriler:

- Dijital altyapının güçlendirilmesi ve yaygınlaştırılması, özellikle yüksek hızlı internet erişimi ve dijital hizmetlere erişimde yaşanan kısıtlamaların giderilmesi, dijital dönüşüm sürecinin temel taşlarından biri olmalıdır.
- Ar-Ge yatırımlarının artırılması, ulusal inovasyon kapasitesinin geliştirilmesi için kamu ve özel sektör iş birliğiyle stratejik destek programları oluşturulmalıdır. Özellikle yenilikçi teknolojiler ve yüksek katma değerli sektörlerde Ar-Ge'ye ayrılan kaynakların artırılması kritik öneme sahiptir.
- İnovasyon ekosisteminin desteklenmesi, start-up'ların, teknoloji firmalarının ve araştırma kurumlarının iş birliğini teşvik eden politikalar geliştirilmelidir. İnovasyon kuluçka merkezleri, teknoparklar ve finansal destek mekanizmaları yaygınlaştırılmalıdır.
- Yapay zekâ ve dijital becerilerin geliştirilmesi, eğitim programlarının ve mesleki eğitimlerin bu alanlarda yoğunlaştırılması, nitelikli insan kaynağı yetiştirilmesine katkı sağlayacaktır.

- Küresel İnovasyon Endeksi'nde daha iyi sonuçlar elde etmek için fikri mülkiyet haklarının korunması ve yenilikçi faaliyetlerin teşvik edilmesi, yasal ve kurumsal altyapının güçlendirilmesi gerekmektedir.
- GSYİH büyümesini desteklemek üzere yüksek teknolojili üretim ve hizmet sektörlerinin geliştirilmesi stratejik öncelik olarak benimsenmelidir.

Sonuç olarak, Gürcistan, mevcut avantajlarını dijitalleşme, inovasyon ve Ar-Ge yatırımları ile pekiştirerek Endüstri 4.0 dönüşümünü hızlandırabilir ve bölgesel rekabet gücünü artırabilir. Bu sürecin başarılı olabilmesi için bütüncül ve çok paydaşlı bir yaklaşımla politikaların tasarlanması gerekmektedir.

Meksika (A10) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 6,50'dir. Meksika, analizlerde 6. sırada yer almakla birlikte, genel olarak kriterlerin çoğunda orta düzeyde performans göstermiştir. Özellikle Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küreselleşme Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi, Küresel Siber Güvenlik Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla gibi önemli kriterlerde ortalamanın üzerinde bir performans sergilemektedir. Buna karşın, Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi ve Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi alanlarında ortalamanın altında kalması, dijital dönüşüm ve yenilikçilik süreçlerinde eksiklikler bulunduğunu göstermektedir.

Meksika için öneriler:

- Bilgi iletişim teknolojileri altyapısının güçlendirilmesi, özellikle dijital erişim ve bağlantı kalitesinin artırılması, kırsal ve az gelişmiş bölgelerde dijital uçurumun azaltılması gerekmektedir.
- İnovasyon kapasitesinin artırılması için Ar-Ge yatırımlarının desteklenmesi, yenilikçi girişimcilik ekosisteminin güçlendirilmesi ve fikri mülkiyet haklarının etkin korunması kritik önemdedir.
- Ekonomik özgürlüklerin ve iş yapma kolaylığının iyileştirilmesi, bürokratik süreçlerin sadeleştirilmesi ve yatırım ortamının cazip hale getirilmesi, yerli ve yabancı yatırımların artmasına katkı sağlayacaktır.
- Yapay zekâ ve ileri teknoloji alanlarında insan kaynağı yetiştirilmesine yönelik eğitim ve sertifikasyon programlarının yaygınlaştırılması, iş gücünün dijital dönüşüme adaptasyonunu hızlandıracaktır.

- Kamu dijitalleşme politikalarının etkinleştirilmesi, e-devlet hizmetlerinin yaygınlaştırılması ve vatandaş odaklı dijital çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sanayi 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi ve yaygınlaştırılması için kamu-özel sektör iş birlikleri artırılmalı, teknoloji transferi ve pilot uygulama projeleri desteklenmelidir.

Sonuç olarak, Meksika mevcut ekonomik potansiyelini dijitalleşme ve inovasyonla destekleyerek, Endüstri 4.0 dönüşümünü daha etkin bir şekilde gerçekleştirebilir ve uluslararası rekabet gücünü artırabilir. Bu hedefe ulaşmak için kapsamlı ve çok aktörlü stratejilerin benimsenmesi önem taşımaktadır.

Arnavutluk (A1) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 8,58'dir. Arnavutluk, genel sıralamada 8. sırada yer almakta olup, özellikle Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi ve Küresel Siber Güvenlik Endeksi kriterlerinde ortalamanın üzerinde performans göstermektedir. Ancak, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Küreselleşme Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla kriterlerinde ortalamanın altında kalması, ülkenin dijitalleşme ve ekonomik büyüme alanlarında geliştirilmesi gereken yönlerinin olduğunu göstermektedir.

Arnavutluk için öneriler:

- Şebekeleşmiş hazır bulunuşluk altyapısının güçlendirilmesi, özellikle geniş bant erişiminin yaygınlaştırılması ve bağlantı kalitesinin artırılması öncelikli hedefler arasında olmalıdır.
- İnovasyon kapasitesinin artırılması, Ar-Ge yatırımlarının teşvik edilmesi ve yenilikçi girişimcilik ekosisteminin desteklenmesi gerekmektedir. Fikri mülkiyet haklarının korunması ve teknoloji transferine yönelik politikalar geliştirilmelidir.
- Küreselleşme endeksinde daha yüksek performans için uluslararası iş birliklerinin artırılması, ticaret ve yatırım ortamının iyileştirilmesi önem arz etmektedir.
- Yapay zekâ alanında hazırlık seviyesinin yükseltilmesi, bu alanda eğitim ve teknik altyapı yatırımlarının artırılması yoluyla mümkün olabilir.

- Kişi başına düşen gelir düzeyinin artırılması için yüksek katma değerli sektörlerin geliştirilmesi ve istihdamın çeşitlendirilmesi stratejik öncelikler arasında yer almalıdır.
- Kamu hizmetlerinde dijital dönüşümün hızlandırılması, e-devlet uygulamalarının erişilebilirlik ve etkinliğinin artırılmasıyla desteklenmelidir.
- Ulusal dijital güvenlik politikalarının güncellenmesi ve siber güvenlik farkındalığının artırılması, küresel Siber Güvenlik Endeksi performansının daha da iyileştirilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Arnavutluk mevcut güçlü yönlerini pekiştirirken, dijital altyapı, inovasyon ve ekonomik büyüme alanlarında yapacağı stratejik yatırımlarla Endüstri 4.0 dönüşümünde daha rekabetçi bir konuma gelebilir. Bu süreçte çok paydaşlı bir yaklaşım ve uzun vadeli planlamalar kritik öneme sahiptir.

Peru (A12) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 9,08'dir. Peru, analizde 9. sırada yer almış ve ortalama bir performans sergilemiştir. Ülkenin Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi ve Küresel Siber Güvenlik Endeksi gibi alanlarda ortalamanın üzerinde bir performans sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, Peru'nun dijitalleşme ve kamu yönetiminde modernleşme süreçlerine uyum sağlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Küreselleşme Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla gibi göstergelerde ortalamanın altında kalan performansı, ülkenin dijital altyapı yatırımları, inovasyon ekosistemi geliştirme çalışmaları ve küresel rekabet gücünü artırmaya yönelik reformlar konusunda daha fazla çaba sarf etmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Peru için öneriler:

- Bilgi ve iletişim teknolojileri altyapısını geliştirmeye yönelik yatırımlarını artırması, özellikle kırsal ve az gelişmiş bölgelerde dijitalleşmenin yaygınlaştırılması amacıyla kapsayıcı projeler geliştirmesi önerilmektedir.
- Küresel inovasyon kapasitesini artırmak için Ar-Ge faaliyetlerini destekleyici teşvik politikaları oluşturması, üniversite-sanayi iş birliğini güçlendirmesi ve yenilikçi girişimlerin önünü açacak bir ekosistem inşa etmesi önem arz etmektedir.

- Küreselleşme düzeyini yükseltmek amacıyla dış ticaret hacmini artıracak, ihracat çeşitliliğini genişletecek ve yabancı yatırımları teşvik edecek stratejiler geliştirmesi, küresel pazarlara entegrasyonunu güçlendirecek adımlar olarak değerlendirilmektedir.
- Kişi başına düşen gelir düzeyini yükseltecek sosyal ve ekonomik kalkınma programları uygulaması, istihdam olanaklarını genişletecek politikalarla desteklenmelidir. Bu kapsamda, iş gücü piyasasının dijital dönüşüme uyumunu kolaylaştıracak mesleki eğitim ve yeniden beceri kazandırma programları kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, Peru'nun güçlü olduğu alanları daha da geliştirerek ve zayıf olduğu göstergelerde stratejik iyileştirmeler yaparak, dijitalleşme ve yenilikçilik odaklı kalkınma yolculuğunu daha sürdürülebilir bir şekilde ilerletebileceği değerlendirilmektedir.

Kolombiya (A5) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 10,17'dir. Kolombiya, genel sıralamada 10. sırada yer almış ve ortalamanın altında bir performans sergilemiştir. Ülkenin Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi ve Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi gibi alanlarda ortalamanın üzerinde bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, Kolombiya'nın dijitalleşme süreçlerine yönelik politika uygulamalarında ve kamu hizmetlerinin dijitalleşmesinde belirli bir ilerleme kaydettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi, Küresel Siber Güvenlik Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Küreselleşme Endeksi ve Kişi Başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla gibi kritik göstergelerde ortalamanın altında kalan performansı, Kolombiya'nın dijital ekonomi ve inovasyon odaklı kalkınma stratejilerini güçlendirmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Kolombiya için öneriler:

- Bilgi iletişim teknolojileri altyapısını güçlendirmek amacıyla yatırımların artırılması ve özellikle kırsal bölgelerde erişilebilirliği artıracak projelerin hayata geçirilmesi, dijital uçurumun azaltılması için önemlidir.
- Ekonomik özgürlükler alanında reformlar yapılması, yatırım ortamının iyileştirilmesi ve girişimciliğin desteklenmesi, özel sektörün dijitalleşme sürecine aktif katılımını teşvik edebilir.

- Küresel siber güvenlik kapasitesinin güçlendirilmesi amacıyla ulusal bir siber güvenlik stratejisi oluşturulması, kurumsal kapasitenin artırılması ve kamu-özel sektör iş birliğinin geliştirilmesi önerilmektedir.
- İnovasyon ekosisteminin geliştirilmesi için Ar-Ge yatırımlarına yönelik teşviklerin artırılması, üniversite-sanayi iş birliği modellerinin yaygınlaştırılması ve girişimcilik destek programlarının güçlendirilmesi gereklidir.
- Küreselleşme düzeyinin artırılması için dış ticareti kolaylaştırıcı düzenlemelerin yapılması, ihracat kapasitesinin çeşitlendirilmesi ve uluslararası pazarlara entegrasyonu kolaylaştıracak iş birliklerinin kurulması önerilmektedir.
- Kişi başına düşen gelir düzeyinin artırılması amacıyla dijital ekonomi odaklı istihdam politikaları geliştirilmesi ve yüksek katma değerli sektörlerin desteklenmesi, Kolombiya'nın ekonomik kalkınmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Kolombiya'nın dijitalleşme ve e-devlet alanlarındaki mevcut potansiyelini koruyarak, bilgi teknolojileri altyapısını güçlendirmesi, inovasyon kapasitesini artırması ve küresel rekabet gücünü iyileştirmesi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda kritik bir öneme sahiptir.

Ermenistan (A2) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 11'dir. Ermenistan, yapılan analizde genel sıralamada 11. sırada yer almış ve ortalamanın altında bir performans sergilemiştir. Ülkenin Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi ve Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi gibi göstergelerde ortalamanın üzerinde bir performans sergilemesi, dijital altyapı ve e-devlet uygulamaları alanında belirli bir ilerleme kaydettiğini göstermektedir. Bu alanlarda elde edilen başarılar, Ermenistan'ın dijitalleşme sürecinde temel bir kapasite oluşturduğunu ve bilgi toplumuna geçişte önemli adımlar attığını göstermektedir.

Ermenistan için öneriler:

- İnovasyon kapasitesinin artırılması amacıyla Ar-Ge yatırımlarına öncelik verilmesi, yenilikçi girişimlerin desteklenmesi ve üniversite-sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi önem arz etmektedir.
- Küreselleşme seviyesinin artırılabilmesi için dış ticaret ve yatırım ortamının iyileştirilmesine yönelik düzenlemeler yapılması, ihracat sektörlerinin

çeşitlendirilmesi ve uluslararası ticaret anlaşmalarına daha etkin bir şekilde katılım sağlanması önerilmektedir.

- Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık düzeyinin geliştirilmesi için ulusal bir yapay zekâ stratejisi oluşturulması, ilgili altyapı yatırımlarının yapılması ve insan kaynağı kapasitesinin artırılması gereklidir.
- Küresel siber güvenlik kapasitesinin güçlendirilmesi için siber güvenlik alanında kurumsal yapılanmaların desteklenmesi, ulusal düzeyde farkındalık çalışmaları yürütülmesi ve siber güvenlik ekosisteminin güçlendirilmesi önerilmektedir.
- Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla düzeyinin artırılabilmesi için yüksek katma değerli sektörlere yatırım yapılması, teknoloji odaklı girişimcilik faaliyetlerinin desteklenmesi ve nitelikli iş gücünün yetiştirilmesine yönelik eğitim programlarının uygulanması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, Ermenistan'ın dijitalleşme ve ekonomik özgürlükler alanlarındaki mevcut kapasitesini koruyarak, inovasyon, yapay zekâ ve siber güvenlik gibi stratejik öneme sahip alanlarda ilerleme sağlaması, ülkenin küresel rekabet gücünü artırarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacaktır.

Kuzey Makedonya (A11) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 11,17'dir. Kuzey Makedonya, yapılan analizde genel sıralamada 12. sırada yer almış ve çalışmada yer alan tüm kriterlerde düşük performans sergilemiştir. Bu durum, ülkenin dijitalleşme, inovasyon, ekonomik özgürlükler ve küresel rekabet gücü gibi çok boyutlu kalkınma göstergelerinde yapısal zorluklarla karşı karşıya olduğunu ve bütüncül bir kalkınma stratejisine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Kuzey Makedonya için öneriler:

- Dijital altyapı yatırımlarının artırılması ve bilgi iletişim teknolojilerinin yaygınlaştırılması, özellikle kırsal ve dezavantajlı bölgelerde dijitalleşme sürecinin hızlandırılması için kamu-özel sektör iş birliklerinin geliştirilmesi gereklidir.
- E-devlet uygulamalarının yaygınlaştırılması ve kamu hizmetlerinin dijitalleştirilmesi, vatandaşların dijital hizmetlere erişimini kolaylaştırarak kamu yönetiminde etkinlik ve şeffaflığı artırabilir.
- İnovasyon ve Ar-Ge ekosisteminin geliştirilmesi amacıyla ulusal bir inovasyon stratejisinin hazırlanması, araştırma merkezleri, üniversiteler ve sanayi

arasındaki iş birliklerinin teşvik edilmesi ve yenilikçi girişimlerin desteklenmesi önem taşımaktadır.

- Küresel pazarlara entegrasyonu artırmak için ihracat teşviklerinin sağlanması, dış ticaret hacmini artıracak stratejik sektörlerin belirlenmesi ve uluslararası iş birliklerinin güçlendirilmesi önerilmektedir.
- Ekonomik özgürlüklerin artırılmasına yönelik olarak yatırım ortamının iyileştirilmesi, bürokratik engellerin azaltılması ve girişimciliğin desteklenmesi, ülkenin sürdürülebilir ekonomik büyüme hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacaktır.
- Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla düzeyinin yükseltilmesi için yüksek katma değerli sektörlerin desteklenmesi, mesleki eğitim ve dijital beceri geliştirme programlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir.
- Siber güvenlik kapasitesinin artırılması için ulusal düzeyde siber güvenlik stratejileri oluşturulması, ilgili kurumsal altyapının güçlendirilmesi ve bu alandaki insan kaynağı eksikliğinin giderilmesi önemlidir.

Sonuç olarak, Kuzey Makedonya'nın dijitalleşme, inovasyon ve ekonomik kalkınma süreçlerinde daha kapsayıcı, uzun vadeli ve bütüncül bir yaklaşım benimsemesi, ülkenin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik bir öneme sahiptir.

Bosna Hersek (A3) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 13'tür. Bosna-Hersek, yapılan analizde genel sıralamada 13. sırada yer almış ve incelenen tüm kriterlerde düşük performans sergilemiştir. Bu durum, ülkenin dijitalleşme, inovasyon kapasitesi, küresel rekabet gücü, ekonomik özgürlükler ve sürdürülebilir kalkınma gibi çok boyutlu göstergelerde temel yapısal zorluklar yaşadığını ve sistematik bir reform ihtiyacının bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bosna-Hersek'in düşük performansı, bilgi iletişim teknolojileri altyapısından inovasyon kapasitesine, e-devlet uygulamalarından siber güvenlik düzeyine kadar pek çok alanda kapsamlı iyileştirmeler yapılması gerektiğini göstermektedir.

Bosna Hersek için öneriler:

- Dijital altyapı yatırımlarının artırılması ve geniş bant internet erişiminin yaygınlaştırılması, kırsal ve dezavantajlı bölgelerde dijital uçurumun azaltılması için kritik bir öneme sahiptir.

- E-devlet uygulamalarının geliştirilmesi ve kamu hizmetlerinin dijitalleşmesi, kamu yönetiminde verimliliği artırarak vatandaşların dijital hizmetlere erişimini kolaylaştıracaktır.
- Bilgi iletişim teknolojileri sektörüne yönelik teşviklerin artırılması, girişimcilik destek programlarının geliştirilmesi ve Ar-Ge yatırımlarının artırılması, inovasyon ekosisteminin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.
- Ekonomik özgürlüklerin artırılması amacıyla yasal ve bürokratik engellerin azaltılması, yatırım ortamının iyileştirilmesi ve yabancı yatırımcılar için cazip bir ekonomik iklimin oluşturulması önerilmektedir.
- Küreselleşme düzeyinin artırılması amacıyla dış ticaret stratejilerinin geliştirilmesi, ihracat kapasitesinin çeşitlendirilmesi ve küresel değer zincirlerine entegrasyonun sağlanması önem taşımaktadır.
- Siber güvenlik kapasitesinin geliştirilmesi için ulusal bir siber güvenlik stratejisi oluşturulması, ilgili kurumlar arasında iş birliğinin güçlendirilmesi ve insan kaynağı kapasitesinin artırılması gereklidir.
- Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla düzeyinin artırılması için yüksek katma değerli sektörlere öncelik verilmesi, nitelikli iş gücünün yetiştirilmesine yönelik mesleki eğitim ve dijital beceri geliştirme programlarının yaygınlaştırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, Bosna-Hersek'in sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi için çok boyutlu bir dijital dönüşüm stratejisi benimsemesi ve bu stratejiyi kamu-özel sektör iş birliği çerçevesinde uzun vadeli kalkınma planlarına entegre etmesi büyük önem taşımaktadır.

El Salvador (A6) alternatifinin tüm yöntemlerden elde ettiği sıralamaların aritmetik ortalaması 14'tür. El Salvador, yapılan analizde genel sıralamada son sırada yer almış ve özellikle teknoloji ve inovasyon kriterlerinde en düşük performansı sergileyen ülke olmuştur. Bu durum, El Salvador'un dijitalleşme, inovasyon kapasitesi, ekonomik özgürlükler ve küresel rekabet gücü gibi alanlarda derin yapısal zorluklar yaşadığını ve bu alanlarda bütüncül bir kalkınma stratejisine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Özellikle Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi, Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi, Küresel İnovasyon Endeksi, Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi, Küresel Siber Güvenlik Endeksi ve Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi gibi teknoloji ve dijitalleşme odaklı kriterlerde gösterilen zayıf performans, ülkenin dijitalleşme sürecinde

oldukça geride kaldığını ve rekabetçi bir dijital ekonomi oluşturmak için kapsamlı bir yol haritasına ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır.

El Salvador için öneriler:

- Dijital dönüşüm sürecinin hızlandırılması amacıyla ulusal bir dijitalleşme stratejisi oluşturulması, bilgi iletişim teknolojileri altyapısına yönelik yatırımların artırılması ve özellikle kırsal bölgelerde dijital erişim imkanlarının genişletilmesi gerekmektedir.
- E-devlet uygulamalarının geliştirilerek kamu hizmetlerinin dijitalleştirilmesi, vatandaşların kamu hizmetlerine erişimini kolaylaştıracak ve şeffaflığı artıracaktır.
- İnovasyon ekosisteminin desteklenmesi amacıyla Ar-Ge faaliyetlerine yönelik teşviklerin artırılması, üniversiteler, araştırma merkezleri ve özel sektör arasındaki iş birliklerinin güçlendirilmesi önem arz etmektedir.
- Yapay zekâ ve ileri dijital teknolojiler alanında insan kaynağı kapasitesinin artırılması amacıyla eğitim programlarının yaygınlaştırılması, teknoloji alanında çalışan uzman sayısının artırılması ve bu alandaki girişimciliğin teşvik edilmesi önerilmektedir.
- Siber güvenlik kapasitesinin güçlendirilmesi için ulusal bir siber güvenlik politikası oluşturulması, kurumsal altyapının güçlendirilmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması önemlidir.
- Kişi başına Gayrisafi Yurtiçi Hasıla düzeyinin artırılması için yüksek katma değerli sektörlerin desteklenmesi, teknoloji tabanlı girişimcilik faaliyetlerinin yaygınlaştırılması ve iş gücü niteliklerini artırmaya yönelik eğitim ve beceri geliştirme programlarının uygulanması gerekmektedir.
- Küresel rekabet gücünün artırılması amacıyla dış ticaretin çeşitlendirilmesi ve ihracat odaklı sektörlerin geliştirilmesi, El Salvador'un küresel değer zincirlerine entegrasyonunu destekleyecektir.

Sonuç olarak, El Salvador'un sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi için teknoloji ve inovasyon odaklı kalkınma stratejilerine öncelik vermesi ve dijitalleşmeyi ekonomik büyümenin itici gücü haline getirmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda atılacak adımlar, ülkenin uzun vadeli rekabet gücü ve toplumsal refah düzeyini artırmada kritik bir rol oynayacaktır.

Analiz sonuçları, üst-orta gelirli ülkeler için dijitalleşme ve Endüstri 4.0'a adaptasyon sürecinin tamamlanması açısından politika reformlarına ve uzun vadeli stratejilere ihtiyaç duyulduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Ülkelerin Endüstri 4.0 Düzeylerinin Yükseltilmesi İçin Politika ve Strateji Önerileri:

- Endüstri 4.0 stratejilerinin ulusal kalkınma planlarına entegrasyonu sağlanmalı; bu kapsamda her ülkenin kendi dijitalleşme yol haritası oluşturulmalıdır.
- Dijital altyapı yatırımlarına öncelik verilmelidir. Fiber optik ağlar, 5G teknolojisi ve geniş bant internet erişimi tüm ülke geneline yaygınlaştırılmalıdır.
- AR-GE ve inovasyon faaliyetlerine yönelik teşvik programları artırılmalı, özellikle yapay zekâ, siber güvenlik, IoT ve büyük veri alanlarında uzman insan kaynağı yetiştirilmelidir.
- Siber güvenlik alanında ulusal stratejiler geliştirilerek, kritik altyapıların korunmasına yönelik düzenlemeler ve standartlar oluşturulmalıdır.
- Eğitim reformlarıyla dijital yetkinlik odaklı müfredatlar hazırlanmalı, öğretmen eğitimi programları desteklenmeli ve mesleki eğitim merkezleri yaygınlaştırılmalıdır.
- Uluslararası iş birlikleri ve teknoloji transfer programları geliştirilerek, Endüstri 4.0 teknolojilerinin ülkelere hızlı entegrasyonu sağlanmalıdır.
- KOBİ'lerin dijitalleşme süreçleri desteklenmeli, finansal teşvikler ve danışmanlık hizmetleri ile dijital dönüşüm kapasiteleri artırılmalıdır.
- Firmalar için sektörel Endüstri 4.0 olgunluk modelleri geliştirilmeli ve bu doğrultuda dijitalleşme seviyeleri ölçülerek yol haritaları hazırlanmalıdır.
- Siber güvenlik yatırımları, işletmelerin öncelikli yatırım alanlarından biri olmalıdır; personel eğitimleri, yazılım güncellemeleri ve veri koruma protokolleri yaygınlaştırılmalıdır.
- Endüstri 4.0 teknolojilerinin pilot uygulamaları (örneğin, yapay zeka tabanlı üretim planlaması, dijital ikiz uygulamaları) yaygınlaştırılmalı ve başarı hikayeleri paylaşılmalıdır.
- Bu çalışma, üst-orta gelirli ülkelere odaklanmıştır; gelecek araştırmalarda farklı gelir gruplarındaki ülkeler veya belirli sektörler (örneğin otomotiv, sağlık, tarım) için detaylı analizler yapılabilir.
- Zaman serisi analizleri ile ülkelerin Endüstri 4.0 düzeylerindeki değişim ve gelişim süreçleri incelenebilir.

- Nitel analizler (örneğin, vaka çalışmaları, uzman görüşleri) ile ÇKKV yöntemlerinden elde edilen bulgular zenginleştirilebilir.
- Endüstri 4.0 bileşenleri ile sürdürülebilirlik göstergeleri arasındaki ilişkiler araştırılarak, dijital dönüşümün çevresel ve sosyal etkileri daha kapsamlı olarak değerlendirilebilir.
- Makine öğrenmesi ve yapay zekâ destekli karar destek sistemleri kullanılarak daha esnek ve dinamik analizler yapılabilir.

Sonuç olarak hem CRITIC hem de Entropi yöntemlerinin kriter ağırlıklandırmasında güvenilir ve tutarlı sonuçlar verdiği söylenebilir. Spearman korelasyon katsayılarının yüksekliği, bu iki yöntemin karar verme sürecindeki tercih sonuçlarını etkileyen faktörler konusunda benzer bilgi sağladığını desteklemektedir. Bu durum, çok kriterli karar verme analizlerinde ağırlık belirleme yöntemleri arasında seçim yaparken esneklik sağlamakta ve çalışmanın genel güvenilirliğini artırmaktadır.

Çalışmada değerlendirmeye alınan kriterlere ilave olarak Endüstri 4.0 yapısına uygun yeni kriterler belirlenebilir ve bu şekilde farklı yapıdaki ülkeler birbirleri arasında karşılaştırılabilir. Ayrıca bu çalışma farklı ÇKKV teknikleri ve ağırlıklandırma yöntemleriyle analiz edilebilir ve bulgular çıkan sonuçlara göre yorumlanabilir.

8. KAYNAKLAR

1. AB Market Otomasyon. (2024). Endüstri 4.0'da Yatay ve Dikey Entegrasyon. https://abmarketotomasyon.com/endustri-4-0da-yatay-ve-dikey-entegrasyon/ adresinden 15 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.
2. Agazade, R. (2022). *Sanayi 4.0 ve Başarılı Ülke Örnekleri* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi].
3. Ak, A. E., ve Kağnıcıoğlu, C. H. (2021). Endüstri 4.0'in Etkisiyle Gelişen Lojistik 4.0: Sistematik Bir Literatür İncelemesi. *Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences*, 7(44), 3439–3454.
4. Aka, D. Ç. (2024). Evaluation of The Change in Perspectıves of SME Executives Towards The Industry 4.0 Process and Opportunities in Digital Transformation with The SWARA Method. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (67), 45-53.
5. Akıllı Fabrika. (2024). *Endüstri 4.0 ve Sistem Entegrasyonları*. https://www.akillifabrika.org/Endustri_4.0_ve_Sistem_Entegrasyonlari,cnt-6 adresinden 12 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.
6. Asar, A. ve Esen, E. (2021). Dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0. İstanbul: Beta Yayınları.
7. Asker, V. (2024). COVID-19 salgınının katılım bankacılığı sektörüne etkisi: MEREC temelli CRADIS uygulaması. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(3), 144–166.
8. Aygün, D., ve Satı, Z. E. *Türkiye'deki Kobi'lerin Endüstri 4.0 Faaliyetleri Açısından ERP Kullanım Düzeylerini Etkileyen Faktörlerin Analizi* [Doktora Tezi, İstanbul Üniveritesi].
9. Balkan, D. (2020). Endüstri 4.0 sürecinde Electree yöntemi ile enerji tesis yer seçiminin gerçekleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9*(1), 238-253.
10. Bayrak, L. (2025). *Çin'in "Yapay Zekâ 2030 Planı": Küresel Teknoloji Liderliğine Giden Yol*. ASKWEB: https://askweb.com.tr/cinin-yapay-zeka-2030-plani-kuresel-teknoloji-liderligine-giden-yol/ adresinden 05 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

11. Bektaş, S. (2022). Türk sigorta sektörünün 2002-2021 dönemi için MEREC, LOPCOW, COCOSO, EDAS ÇKKV yöntemleri ile performansının değerlendrilmesi. *BDDK Bankacılık ve Finansal Piyasalar Dergisi*, *16*(2), 247-283.

12. Bıçakçı, A. (2019). *Endüstriyel otomasyonda otonom robot sistemleri.* Teknik Yayınlar.

13. Bostancı, S., ve Ocakçı, M. (2009). Entropi yöntemi ile kentsel tasarım kararlarının değerlendirilmesi. *Mimarlık Dergisi, 12*(1), 31-45.

14. Cerrahoğlu, S. (2022). Tatil Pazarlamasında Seyahat Acentelerinin Sosyal Medya Tercihinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Belirlenmesi [Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi].

15. CFR. (2025). *What Happened When China Joined the WTO?* CFR Education: https://education.cfr.org/learn/reading/what-happened-when-china-joined-wto adresinden 05 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

16. Chen, M., Mao, S., ve Liu, Y. (2021). Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 19(2), 171-209.

17. Churchman, C. W., & Ackoff, R. L. (1954). An approximate measure of value. *Journal of the Operations Research Society of America*, *2*(2), 172-187.

18. Churchman, C. W., ve Ackoff, R. L. (1954). An approximate measure of value. *Journal of the Operations Research Society of America*, *2*(2), 172-187.

19. Cornell University, INSEAD, ve WIPO. (2023). *Global Innovation Index 2023: Innovation in the face of uncertainty*. WIPO.

20. Çelen, S. (2017). Sanayi 4.0 ve simülasyon. *International journal of 3D printing technologies and digital industry*, *1*(1), 9-26.

21. Demirel, B. E., Tınmaz, G., Güven, E., ve Eren, T. (2024). Türk Savunma Sanayiinde Dijital Olgunluk Seviyelerinin Karşılaştırılması. *Verimlilik Dergisi, 58(4)*, 555-572.

22. Deringöz, A., Danışan, T., ve Eren, T. (2021). Endüstriyel giyilebilir teknolojilerin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmesi ve seçimi. *Ergonomi, 4*(1), 10-21.

23. Diakoulaki, D., Mavrotas, G., ve Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers ve Operations Research*, *22*(7), 763-770.

24. Doğan, E., ve Şengül, Ü. (2023). A novel hybrid multi-criteria decision-making approach for evaluating smart city performance: An application of CRITIC and RAWEC methods. *Sustainable Cities and Society, 92*, 104506.

25. Durak, İ. (2024). Çok Kriterli Karar Verme: Temel Yöntemler, Süreçler ve Hibrit Yaklaşımı. *Bütünleşik Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*, 1.

26. Durmaz, Z., ve Aksakal, E. (2023). Endüstri 4.0 Temelinde Online Alışveriş Sitelerinin Seçiminde Dikkate Alınacak Kriterlerin Dematel Yöntemi İle Değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26*(Özel Sayı), 1147-1155.

27. Dutta, S., Lanvin, B., ve Wunsch-Vincent, S. (2022). *Global Innovation Index 2022: What is the future of innovation-driven growth?* WIPO. https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-2000-2022-section5-en-special-theme-global-innovation-index-2022-15th-edition.pdf adresinden 15 Şubat 2025 tarihinde alınmıştır.

28. Eğilmez, Ö., ve Koca, G. (2018). Gelişmekte olan ekonomilerde sürdürülebilir tedarik zinciri için Endüstri 4.0 girişimlerine yönelik güçlüklerin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 23*(Endüstri 4.0 ve Örgütsel Değişim Özel Sayısı), 1521-1536.

29. Endüstri 4.0 Siber (2025). *Endüstri 4.0 ve siber güvenlik*. https://endustri40siber.com.tr/ adresinden 02 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

30. Endüstri40-1 (2023). Yatay ve dikey entegrasyon nedir? https://endustri40.com/yatay-ve-dikey-entegrasyon-nedir/ adresinden 02 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

31. Endüstri40-2 (2023). *Türkiye'nin Dijital Dönüşüm Yol Haritası*. https://endustri40.com/dijital-turkiye-yol-haritasi-yayinlandi/ adresinden 02 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

32. Erdem, M. B., ve Koska, A. (2023). Endüstri 4.0 Kapsamında Robot Seçimi: SWARA ve Bulanık TOPSIS Yöntemlerinin Entegrasyonuyla Metal Mutfak Eşyası İmalatında Bir Uygulama. *Business ve Management Studies: An International Journal, 11(3),* 752-771.

33. Erdem, M. B., ve Koska, A. (2023). Endüstri 4.0 kapsamında robot seçimi: SWARA ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonuyla metal mutfak eşyası imalatında bir

uygulama. *Business ve Management Studies: An International Journal*, *11*(3), 752-771.

34. Ersöz, S. (2019). Büyük veri ve iş zekâsı ilişkisi üzerine bir inceleme. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, *12*(2), 113–121.

35. Eşiyok, S., & Demircioğlu, M. (2022). OECD ülkelerinin endüstri 4.0 düzeylerinin CRITIC ve CODAS yöntemleri ile değerlendirilmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *21*(43), 377-398.

36. Eşiyok, S., ve Demircioğlu, M. (2022). OECD ülkelerinin endüstri 4.0 düzeylerinin CRITIC ve CODAS yöntemleri ile değerlendirilmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 21*(43), 377-398.

37. Gedik. (2023). *Eklemeli imalat (WAAM) nedir?* https://gedik.com.tr/blog/eklemeli-imalat-waam-nedir adresinden 14 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

38. Gök-Kısa, A. C., ve Perçin, S. (2018). Bütünleşik Entropi ağırlık-Vıkor yöntemi ile bilişim teknolojisi sektöründe performans ölçümü. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 14*(1), 1-13.

39. Götz, M., ve Jankowska, B. (2017). Clusters and Industry 4.0 – do they fit together? *European Planning Studies, 25*(9), 1633-1653.

40. Greenix. (2024). *Endüstri 4.0 Döneminde Siber Güvenlik*. https://greenix.com.tr/blog/endustri-4-0-doneminde-siber-guvenlik adresinden 21 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

41. Gtech. (2021). *Veri analitiği ve büyük veri çözümleri*. https://www.gtech.com.tr adresinden 12 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

42. Gürsoy, U.T., Akçay Kasapoğlu, Ö., Gürler, C. ve Bozkurt Uzan, Ş. (2019). Endüstri 4.0 Bileşenlerinin AHP ve Dematel Yöntemleri ile İncelenmesi, *International Social Sciences Studies Journal, 5*(52): 7121-7132.

43. Hermann, M., Pentek, T., ve Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE.

44. Ilgın, M. A., Urkan, B., ve Kurtul, E. (2021). Türk imalat sanayinin endüstri 4.0'a geçiş sürecini olumsuz etkileyen faktörlerin kalite evi ve çok kriterli karar verme teknikleri ile analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 591-599.

45. Infosec. (2024). *Endüstri 4.0 çağında siber güvenlik*. https://www.infosec.com.tr/endustri-4-0-caginda-siber-guvenlik/ 03 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

46. International Federation of Robotics. (2024). *World Robotics Report 2024: Industrial Robots*. https://ifr.org/worldrobotics adresinden 03 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

47. ITU. (2023). *ICT Development Index*. Measuring digital development: https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2023-2/ adresinden 09 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

48. ITU. (2024). *ICT Development Index.* Measuring digital development: https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ict-development-index-by-country adresinden 09 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

49. ITU-2. (2024). *Global Cybersecurity Index.* International Telecommunication Union: https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Documents/GCIv5/2401416_1b_Global-Cybersecurity-Index-E.pdf adresinden 09 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

50. Kagermann, H., Wahlster, W. ve Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0.* National Academy of Science and Engineering.

51. Kahreman, Y. (2024). Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma ve alt boyut performanslarının LOPCOW-CRADIS yöntemi ile belirlenmesi. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi, 13*(4), 1411–1426.

52. Kamble, S. S., Gunasekaran, A., ve Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection, 117,* 408-425.

53. Karakoç, N., Eren, T., & Özcan, E. (2020). Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi için Endüstri 4.0'daki Zorluklarin Değerlendirilmesi. *Endüstri Mühendisliği, 31*(2), 215-233.

54. Karami, A., ve Johansson, R. (2014). Entropy-based weighting in multi-criteria decision analysis. *Journal of Systems Science, 45*(5), 523-534.

55. Kaya, T., ve Gündoğdu, F. K. (2022). Evaluation of renewable energy alternatives using the integrated CRITIC and RAWEC methods. *Energy Reports, 8,* 1234–1245.

56. Keleş, N. (2023). Lopcow ve Cradis yöntemleriyle G7 ülkelerinin ve Türkiye'nin yaşanabilir güç merkezi şehirlerinin değerlendirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *16*(3), 727–747.

57. Keshavarz Ghorabaee, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., ve Turskis, Z. (2015). *Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). Informatica, 26*(3), 435-451.

58. KFactory. (2023). *The Industrial Revolution: A Short History of Manufacturing.* https://kfactory.eu/the-industrial-revolution-short-history-of-manufacturing/ adresinden 14 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

59. Khairul, S. M. ve Siahaan, A.P. U.(2016). Decision support system in selecting the appropriate laptop using simple additive weighting. *December IJRTER,* 2 (12), 215-222.

60. Kılıç, R. (2023). Sanayi devrimlerinin serüveni: endüstri 1.0'dan endüstri 5.0'a. *Takvim-i Vekayi, 11*(2), 276-291.

61. KOF Swiss Economic Institute. (2024). *KOF Globalisation Index.* ETH Zurich: https://kof.ethz.ch/en/forecasts-and-indicators/indicators/kof-globalisation-index.html adresinden 11 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

62. Konuşkan, Ö., Mühendisliği, A. E., ve UYGUN, Ö. (2014). Çok Nitelikli Karar Verme (Maut) Yöntemi ve bir Uygulamasi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi: Niğde, Turkey*.

63. Koştı, M. (2020). *Akıllı üretim sistemleri ve Endüstri 4.0*. Mühendislik Yayınları.

64. Kökümer, Z. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Beyaz Eşya Sektöründe Endüstri 4.0 Dijital Dönüşüm Yetkinlik Analizi [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi].

65. Kromas. (2023). *Eklemeli üretim nedir?* https://www.kromas.com.tr/eklemeli_uretim.asp#:~:text=Eklemeli%20imalat%2C%203%20boyutlu%20nesnelerin adresinden 18 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

66. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., ve Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering, 6*(4), 239–242

67. Lee, J., Bagheri, B., ve Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters, 3,* 18-23.

68. Lee, J., Bagheri, B., ve Kao, H. A. (2021). A digital twin-driven approach for smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems, 58*, 1-12.

69. Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and sustainable energy reviews, 11*(7), 1584-1595.

70. Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., ve Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications–a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, *28*(1), 516-571.

71. Marşap, B., ve Kablan, A. (2022). BIST Otomotiv Sektöründe Listelenen Şirketlerin Finansal Performanslarinin Endüstri 4.0 ve Covid 19 Kapsaminda COPRAS Yöntemi ile Analizi. *Muhasebe ve Denetime Bakış*, *22*(67), 41-56.

72. McKinsey ve Company. (2023). *What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR?* https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir adresinden 21 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

73. Mercan, T. (2024). Endüstri 4.0 Unsurlarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi: Bir Üretim İşletmesi Araştırması [Doktora tezi. İstanbul Üniversitesi].

74. Michigan Technological University. (2025). *The fourth industrial revolution and cybersecurity*. https://www.mtu.edu/globalcampus/fourth-industrial-revolution-and-cybersecurity/ adresinden 21 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

75. Milvus Robotics. (2023). *Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalarda otonom mobil robotlar*. https://milvusrobotics.com/tr/blog/endustri40-akilli-fabrikalar-otonom-mobil-robotlar adresinden 20 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

76. MTU Global Campus. (2024). *The Fourth Industrial Revolution and Cybersecurity.* https://www.mtu.edu/globalcampus/fourth-industrial-revolution-and-cybersecurity/ adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

77. Nebati, E. E. (2024). Tekstil Sektöründe Endüstri 4.0 Perspektifinde Dijital Teknoloji Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 25*(3), 417-429.

78. NTT Data Solutions. (2023). *Artırılmış gerçeklik nedir? Sanal gerçeklikten farkı nedir?* https://nttdata-solutions.com/tr/blog/artirilmis-gerceklik-nedir-sanal-gerceklikten-farki-nedir/ adresinden 28 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

79. OECD. (2023). *Digital Economy Outlook 2023: Industry 4.0 Readiness Indicators*.

80. Oktay, U. (2021). *Türk savunma sanayisi için endüstri 4.0 olgunluk modeli geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).

81. Oxford Insights. (2024). *The Government AI Readiness Index.* https://staging2.oxfordinsights.com/wp-content/uploads/2024/12/2024-Government-AI-Readiness-Index.pdf adresinden 05 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

82. Ömürbek, N., Karaatlı, M., ve Balcı, H. F. (2016). Entropi temelli MAUT ve SAW yöntemleri ile otomotiv firmalarının performans değerlemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *31*(1), 227-255.

83. Ömürgönülşen, M., Çekiç, B., ve Ar, İ. M. (2020). Lojistik Firmalarında Endüstri 4.0 Uyum Sürecinde Dikkate Alınacak Faktörlerin Bulanık Dematel Yöntemi ile Değerlendirilmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 167-184.

84. Öz, A. Ö., ve Tanç, Ş. G. (2024). Endüstri 4.0 Kapsamında Lojistik 4.0'ın İncelenmesine Yönelik Teorik Bir Çalışma. *The Journal Of Academic Social Science*, (110), 460-469.

85. Özkaya, A., Gür, Ş., ve Eren, T. (2019). Endüstri 4.0'a geçiş sürecinin analitik ağ süreci ile değerlendirilmesi. *Başkent Üniversitesi Ticari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3*(2), 59-74.

86. Pirobotik. (2021). *Otonom robot teknolojilerinin gelişimi*. Otomasyon Yayınları.

87. Portulans Institute. (2023). *Network Readiness Index 2023: Methodology report.* https://download.networkreadinessindex.org/reports/data/2023/nri-2023.pdf adresinden 28 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

88. Puška, A., Božanić, D., Nedeljković, M., ve Janošević, M. (2022). Green supplier selection in an uncertain environment in agriculture using a hybrid MCDM model: Z-Numbers–Fuzzy LMAW–Fuzzy CRADIS model. *Axioms, 11*(9), 427.

89. Puška, A., Štilić, A., Pamučar, D., Božanić, D., ve Nedeljković, M. (2024). Introducing a Novel multi-criteria Ranking of Alternatives with Weights of Criterion (RAWEC) model. *MethodsX*, 102628.

90. Saçak, R., Gür, Ş., ve Eren, T. (2019). AHP ve DEMATEL yöntemleri ile nesnelerin internetinin işletmelerde yapılan uygulamalarının analizi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *8*(2), 82-95.

91. Sağbaş, A., ve Dermenci, M. S. (2023). Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences, 6(2),* 74-85.

92. Salman, S., ve Peker, İ. (2021). Savunma Sanayi Ar-Ge Merkezlerinin Performanslarının Entropive Aras Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, *7*(1), 51-73.

93. Sarı, T. (2020). *Dijital fabrikalar ve akıllı üretim*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

94. Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution.* World Economic Forum.

95. Seyrek, S. (2025). *Makineler 2025 Yılına Kadar Tüm İşlerin Yarısını Yapabilir*. endustri40.com: https://endustri40.com/makineler-2025-yilina-kadar-tum-islerin-yarisini-yapabilir/ adresinden 08 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

96. Siemens. (2021). Digital Enterprise: The Siemens portfolio for Industry 4.0. Siemens AG.

97. Siemens. (2023). Digital Twins and Simulation for Industry 4.0. https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/industry/industry-4-0/ adresinden 03 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

98. Smith, J. ve Johnson, M. (2022). Modern Decision Analysis Methodologies. Operations Research Quarterly.

99. Soylu, B. (2018). *Endüstri 4.0 ve akıllı üretim sistemleri.* Dora Yayınları.

100. Stimson. (2023). *Global Governance Innovation Report*. The Global Governance Innovation Network: https://ggin.stimson.org/wp-content/uploads/2023/06/GGIR_2023_6.19.23_V5.pdf adresinden 02 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

101. Sulzberger, C. (2024). *Pearl Street Station*. Engineering and Technology History https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station,_1882 adresinden 02 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

102. Şahin, C. (2019). *Ülkelerin endüstri 4.0 düzeylerinin COPRAS yöntemi ile analizi: G-20 ülkeleri ve Türkiye* [Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi].

103. Tao, F., Cheng, Y., Da Xu, L., Zhang, L., ve Li, B. H. (2018). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, *4*(5), 614-623.

104. Taşcı, M. Z. (2023). MEREC ve CRADIS yöntemlerini içeren entegre bir ÇKKV modeli ile DASK özelinde bir uygulama. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, *25*(1), 35–53.

105. Taşkın, E., Gezik, N., Yumuşak, R., ve Eren, T. (2022). Depo Yönetiminde Endüstri 4.0 Uygulaması: Bir İşletme İçin Rfıd Teknoloji Seçimi. *Endüstri Mühendisliği*, *33*(1), 194-211.

106. Terzi, S., Gür, Ş., ve Eren, T. (2020). Sürdürülebilir tedarik zincirine endüstri 4.0 etkisinin çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *25*(1), 511-528.

107. The Heritage Foundation. (2024). *Index of Economic Freedom.* Heritage Foundation: https://www.heritage.org/index/pages/all-country-scores adresinden 13 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

108. Togay, A., Düzgün, E., ve Kayhan, S. (2019). *Artırılmış gerçeklik teknolojileri ve uygulama alanları*. Bilişim Yayınları.

109. Tonga, M. Y., ve Tonga, M. (2022). Endüstri 4.0'a genel bir bakış: Sanayinin geleceği. *GÜ İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi*, *6*(6), 40–60.

110. Turan, G. (2015). Çok Kriterli Karar Verme, (Yıldırım, F. ve Önder, E.), *Çok kriterli karar verme yöntemleri,* Dora Yayıncılık, 2. Baskı, Bursa, 15-19.

111. UN. (2022). *E-Government Survey*. United Nations: https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2022-09/Web%20version%20E-Government%202022.pdf adresinden 08 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

112. UNDESA. (2024). *E-Government Development Index.* UNDESA: https://publicadministration.un.org/egovkb/Data-Center adresinden 25 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

113. USLU, B., GÜR, Ş., ve EREN, T. (2019). Endüstri 4.0 Uygulaması İçin Stratejilerin Aas Ve Topsıs Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Eskişehir Technical University Journal of Science ve Technology B-Theoretical Sciences, 7*(1).

114. Virtocommerce. (2023). *Vertical vs Horizontal Integration*. https://virtocommerce.com/blog/vertical-vs-horizontal-integration adresinden 13 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

115. Wang, Y., ve Lee, H. (2009). A generalized entropy method for multi-criteria decision making. *European Journal of Operational Research, 198*(3), 8982-8989.

116. WIPO. (2023). Global Innovation Index. World Intellectual Property Organization: https://www.wipo.int/documents/d/global-innovation-index/docs-en-wipo-pub-2000-2023-en-main-report-global-innovation-index-2023-16th-edition.pdf adresinden 08 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

117. WIPO. (2024). Global Innovation Index. World Intellectual Property Organization: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/assets/67729/2000%20Global%20Innovation%20Index%202024_WEB3lite.pdf adresinden 08 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

118. WIPO. (2024). Global Innovation Index. World Intellectual Property Organization: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/assets/67729/2000%20Global%20Innovation%20Index%202024_WEB3lite.pdf adresinden 08 Nisan 2025 tarihinde alınmıştır.

119. World Bank. (2023). *World Development Report 2023: Digital Dividends*. World Bank Publications.

120. World Bank. (2024). *GDP per capita, PPP (current international $)*

121. World Economic Forum. (2023). The future of jobs report 2023. https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2023 adresinden 10 Şubat 2025 tarihinde alınmıştır.

122. World Economic Forum-2. (2023). Cybersecurity and resilience in manufacturing. https://www.weforum.org/reports/cybersecurity-and-resilience-in-manufacturing adresinden 10 Şubat 2025 tarihinde alınmıştır.

123. World Population Review. (2024). *ICT Development Index by Country 2023.* https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ict-development-index-by-country adresinden 14 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.

124. Wu, J. (2011). Entropy methods in environmental sustainability analysis. *Energy Policy, 39*(10), 5163-5170.

125. Xu, L. D., Xu, E. L., ve Li, L. (2018). Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. *International Journal of Production Research, 56*(8), 2941-2962.

126. Yalcıner, A. Y., ve Çaylak, İ. (2020). Türkiye'de dijital dönüşüme başlangıç için AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sektörel sıralama. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, *8*(2), 258-265.

127. Yalçınkaya, M. (2019). Büyük verinin sektörel etkileri ve uygulamaları. *Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi*, *14*(2), 75–88.

128. Yazıcı, O. (2016). *Robotik sistemlerin endüstriyel uygulamaları*. Endüstri Yayınları.

129. Yılmaz, H., ve Kabak, Ö. (2020). Prioritizing distribution centers in humanitarian logistics using type-2 fuzzy MCDM approach. *Journal of Enterprise Information Management*, *33*(5), 1199-1232.

130. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., ve Kildienė, S. (2014*). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods.* Technological and Economic Development of Economy, 20(1), 165-179.

131. Zavadskas, E. K., ve Podvezko, V. (2016). Integrated determination of objective criteria weights in MCDM. *International Journal of Information Technology ve Decision Making*, *15*(02), 267-283.

132. Zavadskas, E. K., ve Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and economic development of economy*, *16*(2), 159-172.

133. Zhang, L., Chen, Y., ve Zhao, Q. (2011). Entropy-based applications in economic decision-making. *Journal of Economic Studies, 38*(4), 444-456.

Kriter Kaynakları:

Bilgi İletişim Teknolojileri Gelişme Endeksi : https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ict-development-index-by-country

Birleşmiş Milletler E-Devlet Kalkınma Endeksi : https://publicadministration.un.org/egovkb/Data-Center

Şebekeleşmiş Hazır Bulunuşluk Endeksi : https://networkreadinessindex.org/countries/

Küresel İnovasyon Endeksi : https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/gii-2024-at-a-glance.html

Küreselleşme Endeksi : https://kof.ethz.ch/en/forecasts-and-indicators/indicators/kof-globalisation-index.html

Dünya Ekonomik Özgürlükler Endeksi : https://www.heritage.org/index/pages/all-country-scores

Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi : https://staging2.oxfordinsights.com/wp-content/uploads/2024/12/2024-Government-AI-Readiness-Index.pdf

Küresel Siber Güvenlik Endeksi : https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Documents/GCIv5/2401416_1b_Global-Cybersecurity-Index-E.pdf

(GSYİH) / (SAGP)$, (GDP per capita, PPP$) : https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/gii-2024-at-a-glance.html

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Emrah AĞIRBAŞ
Doğum Yeri ve Yılı	: Ankara- 1988
Lisans Öğrenimi	:
	Karadeniz Teknik Üniversitesi / Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmenliği (Mezuniyet: 2013)
	Anadolu Üniversitesi / İşletme (Mezuniyet: 2022)
Bildiği Yabancı Diller	: İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar	:

AĞIRBAŞ, E. (2025). ENDÜSTRİ 4.0 PERSPEKTİFİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ: BİR LİTERATÜR TARAMASI. P. D. TALAS içinde, Nicel Karar Yöntemleri Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler (s. 1-22). ANKARA: GECE KİTAPLIĞI.

Meslek	: Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmeni (2014-Halen)
ORCID No	: 0009-0000-9692-2664