

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YENİLENEBİLİR ENERJİ DESTEKLİ ÜRETİLEN YEŞİL  
HİDROJEN İÇİN OPTİMAL LOKASYON VE ÜRETİM  
MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ**

**METİN GÜL**

**DOKTORA**

**Jüri Üyeleri :** Doç. Dr. Ersin AKYÜZ (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Mehmet Ziya SÖĞÜT  
Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI  
Doç. Dr. Gülenay Alevay KILIÇ  
Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2026**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Yenilenebilir Enerji Destekli Üretilen Yeşil Hidrojen İçin Optimal Lokasyon ve Üretim Maliyetlerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Metin Gül**

## ÖZET

### YENİLENEBİLİR ENERJİ DESTEKLİ ÜRETİLEN YEŞİL HİDROJEN İÇİN OPTİMAL LOKASYON VE ÜRETİM MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ

#### DOKTORA TEZİ

METİN GÜL

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ERSİN AKYÜZ)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2026

Bu çalışma, yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretim sistemlerinin planlanmasını mekânsal, teknik ve ekonomik boyutları bütünleştiren bir karar çerçevesi içinde ele almaktadır. Çalışmanın temel amacı, hidrojen üretim sistemlerini yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve mekânsal boyutlarıyla birlikte değerlendirebilen, uygulanabilir ve gerçekçi bir model ortaya koymaktır.

Bu doğrultuda Balıkesir için Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılarak yer seçimi analizi gerçekleştirilmiş ve Bandırma en uygun lokasyon olarak öne çıkmıştır. Sistem performansı, 20 yıllık işletme süresini kapsayan ve toplam 175200 saatlik veriye dayanan dinamik simülasyonlarla ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Analizler, güneş ve rüzgâr kaynaklarının zaman içerisinde birbirini dengelediğini göstermesine rağmen, üretim profili ile elektrik fiyatlarının tam olarak örtüşmemesinin ekonomik performansı sınırlayan dikkate değer bir faktör olduğunu ortaya koymuştur.

Sistem tasarımı, maliyetin minimize edilmesi ve yenilenebilir enerji kullanım oranının artırılması hedefleri doğrultusunda NSGA-III ve MOPSO algoritmaları ile optimize edilmiştir. Elde edilen Pareto çözüm kümeleri, tek bir “en iyi” çözümden ziyade farklı tasarım tercihlerini temsil eden alternatifler sunduğunu göstermiştir. Farklı elektrolizör kapasite faktörlerinde seviyelendirilmiş hidrojen maliyeti (LCOH) 5.67–8.0 USD/kg aralığında değişim göstermiştir. Duyarlılık analizleri, LCOH değerinin yatırım maliyetlerine yüksek hassasiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca ekonomik sürdürülebilirlik için gerekli hidrojen başabaş satış fiyatı yaklaşık 7.8–8.0 USD/kg olarak belirlenmiş; karbon kredisi, yatırım teşviki ve benzeri destekleyici politika araçlarının devreye girmesi ile bu fizibilite eşliğini 5.52 USD/kg düzeylerine kadar düşürebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışma, hidrojen üretim sistemlerinin çok boyutlu planlanmasına yönelik farklı coğrafyalara uygulanabilecek bütünleşik bir karar destek çerçevesi sunmaktadır. Gelecekte farklı yenilenebilir kaynaklar, elektrolizör teknolojileri ve hidrojen türevi yakıtlar modele dâhil edilerek yaklaşım genişletilebilir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Çok amaçlı optimizasyon, tekno-ekonomik analiz, yenilenebilir enerji, yer seçimi, yeşil hidrojen

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF OPTIMAL LOCATIONS AND PRODUCTION COSTS FOR RENEWABLE ENERGY–BASED GREEN HYDROGEN**

**PH.D THESIS**

**METİN GÜL**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ERSİN AKYÜZ )**

**BALIKESİR, JUNE - 2026**

This study addresses the planning of renewable energy-based hydrogen production systems within a decision framework that integrates spatial, technical, and economic dimensions. The primary objective of the study was to develop an applicable and realistic model capable of evaluating hydrogen production systems not only from a technical perspective but also by jointly considering their economic and spatial dimensions.

Accordingly, a site selection analysis was conducted for Balıkesir using a Geographic Information System-based multi-criteria decision-making approach, and Bandırma emerged as the most suitable location. System performance was examined in detail through dynamic simulations covering a 20-year operating period and based on a total of 175,200 hours of data. Although the analyses showed that solar and wind resources complement each other over time, the mismatch between the energy production profile and electricity prices was identified as a notable factor limiting economic performance.

The system design was optimized using the NSGA-III and MOPSO algorithms with the objectives of minimizing cost and increasing the renewable energy fraction. The resulting Pareto solution sets demonstrated that, rather than providing a single “best” solution, the optimization process offered a range of alternatives representing different design preferences. At different electrolyzer capacity factors, the levelized cost of hydrogen (LCOH) varied between 5.67 and 8.0 USD/kg. The sensitivity analyses revealed that the LCOH was highly sensitive to investment costs. In addition, the break-even hydrogen selling price required for economic sustainability was determined to be approximately 7.8–8.0 USD/kg, while supportive policy instruments such as carbon credits and investment incentives were found to reduce this feasibility threshold to as low as 5.52 USD/kg.

In conclusion, this study presents an integrated decision-support framework for the multidimensional planning of hydrogen production systems. Future work may extend the approach by incorporating different renewable sources, electrolyzer technologies, and hydrogen-derived fuels.

**KEYWORDS:** : Multi-objective optimization, techno-economic analysis, renewable energy, site selection, green hydrogen

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1 Küresel Enerji Geçişinde Yeşil Hidrojenin Rolü.....	8
2.1.1 Sektörler arası enerji entegrasyonu.....	10
2.1.2 Karbonsuzlaştırılması zor sektörlerde hidrojenin rolü .....	11
2.1.3 Yenilenebilir enerji sistemlerinde uzun süreli depolama ve hidrojen .....	11
2.1.4 Hidrojen ekonomisi ve değer zinciri yaklaşımı .....	12
2.1.5 Derin karbonsuzlaşma senaryolarında hidrojenin rolü.....	13
2.1.6 Hidrojen ekonomisinin gelişiminde politika ve piyasa mekanizmaları.....	14
2.2 Yenilenebilir Enerji Destekli Hidrojen Üretimine Teorik Temelleri .....	15
2.2.1 Ticari tip elektroliz teknolojileri.....	15
2.2.2 Elektroliz teknolojilerinde öğrenme eğrileri ve ölçek ekonomileri.....	21
2.2.3 Elektroliz teknolojilerinde termodinamik verimlilik ve işletme sınırları .....	21
2.2.4 Yenilenebilir enerji-elektrolizör-şebeke esnekliği.....	22
2.2.5 Elektrolizör maliyet dinamikleri ve LCOH projeksiyonları.....	22
2.3 Yer Seçiminin Karar Kuramındaki Yeri .....	23
2.3.1 Yer seçimi problemlerinde çok kriterli karar verme kuramsal çerçevesi .....	24
2.3.2 Yer seçimi problemlerinde telafi edici karar yaklaşımları .....	25
2.3.3 Mekânsal yer seçimi problemlerinde kriterler arası ödünleşme .....	26
2.3.4 Yer seçimi problemlerinde deterministik ve bulanık karar yaklaşımları .....	27
2.3.5 Mekânsal karar karmaşıklığı ve CBS tabanlı ÇKKV .....	28
2.3.6 Yer seçimi literatüründe CBS-ÇKKV entegrasyonu .....	29
2.3.7 Yer seçimi çalışmalarında metodolojik güvenilirlik ve belirsizlik yönetimi	30
2.4 CBS Tabanlı ÇKKV İçin Teorik Çerçeve .....	31
2.4.1 CBS-ÇKKV’de raster tabanlı uygunluk analizi .....	32
2.4.2 Mekânsal veri kuramı: raster-vektör yaklaşımı ve karar modellemesi.....	32
2.4.3 Raster tabanlı uygunluk katmanları ve ölçeklendirme .....	33
2.4.4 Raster overlay analizi ve uygunluk yüzeyinin oluşturulması .....	34
2.4.5 Mekânsal heterojenlik ve bölgesel varyasyonların karar sonuçlarına etkisi .	35
2.4.6 Mekânsal modellemede belirsizlik: kaynaklar, duyarlılık ve çoklu senaryo.	35
2.4.7 Enerji Sistemleri yer seçiminde CBS-ÇKKV yaklaşımının kullanımı.....	36
2.4.8 CBS-ÇKKV analiz süreci ve karar destek yapısı .....	36
2.4.9 CBS-ÇKKV yaklaşımının metodolojik değerlendirmesi .....	37
2.5 Çok Kriterli Karar Vermede Kriter Ağırlıklandırma Yaklaşımları .....	38
2.5.1 Shannon entropisi ile objektif ağırlıklandırma .....	38
2.5.2 AHP ve FAHP ile öznel ağırlıklandırma .....	39
2.5.3 Hibrit kriter ağırlıklandırma yaklaşımları .....	40
2.5.4 Kriter ağırlıklandırmada veri ve uzman bilgisinin rolü.....	40
2.6 Sıralama Temelli ÇKKV Yöntemleri: MOORA, TOPSIS ve VIKOR .....	41
2.6.1 MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin temel ilkeleri.....	42

## İÇİNDEKİLER (devam)

2.6.2	MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin karar mantıkları .....	42
2.6.3	MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin duyarlılık profili .....	43
2.6.4	MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin kuramsal karşılaştırması .....	43
2.7	Belirsizlik Altında Dayanıklı Karar Verme ve Enerji Altyapısı Planlaması .....	45
2.8	Yeşil Hidrojen Sistemlerinde Tekno-Ekonomik Analiz .....	49
2.9	Enerji geçişinde karbon fiyatlandırması ve teşvikler.....	52
2.10	Enerji Sistemlerinde Çok Amaçlı Optimizasyonun Teorik Arka Planı .....	55
2.11	NSGA-III: Kuramsal Temel ve Enerji Sistemleri Uygulamaları.....	58
2.12	MOPSO Algoritması: Kuramsal Temel ve Enerji Sistemleri Uygulamaları .....	60
2.13	NSGA-III ve MOPSO' nun enerji sistemleri optimizasyonunda karşılaştırılması	63
2.14	Pareto Ön Yüzü Analizi ve Sonuçlandırma Kararları: Teorik Çerçeve.....	67
2.14.1	Pareto ön yüzünün karar verme sürecindeki rolü .....	67
2.15	Mekânsal, tekno-ekonomik ve optimizasyon tabanlı hidrojen çalışmaları.....	70
2.16	Tezin Metodolojik Yaklaşımı ve Karar Çerçevesi .....	73
<b>3.</b>	<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>77</b>
3.1	CBS ve ÇKKV Tabanlı Mekânsal Uygunluk ve Yer Seçimi Metodolojisi.....	77
3.1.1	Çalışma alanının tanımı, coğrafı ve enerji potansiyeli özellikleri .....	79
3.1.2	Kriter setinin tanımlanması ve hiyerarşik yapılandırılması.....	81
3.1.3	Veri kaynakları, veri ön-işleme ve CBS çalışma ortamı .....	83
3.1.4	Alternatif planlama birimlerinin oluşturulması (eş alanlı ızgara yaklaşımı). 85	
3.1.5	Kriter ağırlıklarının belirlenmesi .....	96
3.1.5.1	Entropi tabanlı nesnel ağırlıklandırma.....	97
3.1.5.2	FAHP tabanlı öznel ağırlıklandırma (Chang genişlik analizi) .....	98
3.1.5.3	Hibrit (Entropi-FAHP) ağırlıklandırma ve birleştirme kuralı.....	104
3.1.6	Çok kriterli karar verme modelleri ile alternatiflerin sıralanması .....	105
3.1.6.1	TOPSIS yöntemi.....	105
3.1.6.2	MOORA yöntemi .....	107
3.1.6.3	VIKOR yöntemi.....	108
3.1.6.4	Tutarlılık, uzlaşa ve sağlamlık analizleri.....	109
3.1.7	CBS entegrasyonu ve uygunluk haritalarının üretilmesi.....	111
3.2	Yeşil Hidrojen Üretim Sisteminin Teknik Modellemesi .....	112
3.2.1	Yeşil hidrojen üretim sisteminin fiziksel ve dinamik modellemesi .....	114
3.2.1.1	Fotovoltaik (PV) güç üretim modeli.....	116
3.2.1.2	Rüzgâr türbini güç üretim modeli.....	120
3.2.1.3	Meteorolojik girdi parametreleri ve zaman serisi yapısı .....	122
3.2.1.4	PEM elektrolizör tabanlı hidrojen üretim modeli.....	124
3.2.1.5	Sistem performans kaybı (degradasyon) modellemesi .....	132
3.2.1.6	Hidrojen depolama seçenekleri.....	134
3.2.1.7	Hibrit sistem enerji yönetimi ve şebeke entegrasyonu .....	139
3.3	Yeşil Hidrojen Üretim Sisteminin Uzun Dönem Ekonomik Modeli.....	142
3.3.1	Ekonomik modelin matematiksel çerçevesi .....	142
3.3.1.1	Uzun dönem nakit akışı yapısı ve yıllık segmentasyon metodolojisi... 143	
3.3.1.2	Seviyelendirilmiş hidrojen maliyeti.....	144
3.3.1.3	Toplam indirgenmiş maliyet (NPC) .....	145
3.3.1.4	Oksijen satış geliri .....	145
3.3.1.5	Yıllık net nakit akışı (CF <sub>t</sub> ) .....	146
3.3.1.6	Vergi yükü (tax).....	146
3.3.1.7	Toplam hidrojen üretimi .....	146

## İÇİNDEKİLER (devam)

3.3.1.8	Net bugünkü değer (NPV) .....	146
3.3.1.9	İç kârlılık oranı (IRR) .....	146
3.3.1.10	Geri ödeme süresi (PB) .....	147
3.3.2	Maliyet bileşenleri ve ekonomik göstergeler.....	147
3.3.3	Politika tabanlı tekno-ekonomik senaryolar .....	149
3.4	Optimizasyon ve Karar Destek Çerçevesi .....	151
3.4.1	Elektrolizör çalışma parametrelerinin optimizasyonu.....	155
3.4.1.1	Elektrolizör çalışma parametrelerinin tanımlanması .....	157
3.4.1.2	Amaç fonksiyonlarının tanımlanması.....	157
3.4.1.3	Parametre uzayının latin hiper küp örnekleme ile taranması.....	158
3.4.1.4	Pareto analizi ve diz noktasının belirlenmesi .....	158
3.4.1.5	Ağırlıklı normalizasyon ile tekil optimum nokta seçimi .....	159
3.4.2	Tekno-ekonomik model için boyut optimizasyonu.....	159
3.4.2.1	Veri setinin oluşturulması ve ön işleme aşamaları .....	159
3.4.2.2	Vekil model geliştirilmesi.....	160
3.4.2.3	Problemin matematiksel tanımı .....	162
3.4.2.4	MOPSO (multi-objective particle swarm optimization) yöntemi .....	163
3.4.2.5	Non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III) yöntemi .....	165
3.4.2.6	Pareto cephesi analizi ve karar verme .....	167
<b>4.</b>	<b>BULGULAR.....</b>	<b>171</b>
4.1	Yeşil Hidrojen Tesisleri İçin Yer Seçimi Bulguları.....	171
4.1.1	Mekânsal kriterlerin istatistiksel özellikleri .....	172
4.1.2	Kriter dağılımları ve mekânsal ayrışma.....	174
4.1.3	Kriterler arası ilişkilerin değerlendirilmesi.....	176
4.1.4	İstatistiksel sağlamlık ve model geçerliliği .....	178
4.1.5	Ağırlıklandırma-ÇKKV sonuçları ve kararlılık analizi .....	179
4.1.6	Uzman görüşlerine dayalı fahp ikili karşılaştırma yapısı .....	180
4.1.7	Kriter ağırlıklarının farklı yöntemlerle hesaplanması ve karşılaştırılması ..	181
4.1.8	ÇKKV yöntem sonuçları .....	183
4.1.8.1	En uygun alternatiflerde yöntem-ağırlıklandırma duyarlılığı.....	183
4.1.8.2	ÇKKV yöntemleri arası sıralama tutarlılığı ve benzerlik analizi .....	185
4.1.9	Alternatiflerin kararlılıklarının ve performanslarının değerlendirilmesi.....	187
4.1.9.1	Farklı ÇKKV senaryoları altında sıralama kararlılığı .....	187
4.1.9.2	Borda puanı ile kararlılık indeksi ilişkisi ve birleşik skor yaklaşımı....	188
4.1.9.3	Borda, kararlılık ve birleşik skor arasındaki korelasyonlar .....	190
4.1.10	ÇKKV yöntemlerinin cbs tabanlı mekânsal tutarlılık analizi.....	191
4.1.10.1	Yöntem bazlı mekânsal uygunluk dağılımlarının karşılaştırılması ....	191
4.1.10.2	Kararlılık indeksine dayalı mekânsal karar güvenilirliği analizi.....	197
4.1.10.3	Performans ve kararlılık entegrasyonu: birleşik skor yaklaşımı.....	200
4.2	Yenilenebilir destekli hidrojen üretiminin tekno-ekonomik analiz .....	203
4.2.1	Balıkesir lokasyonu için 8760 saatlik kaynak ve piyasa verilerinin analizi	203
4.2.1.1	2024 yılı EÜAŞ PPA elektrik fiyatının saatlik değişimi .....	204
4.2.1.2	Balıkesir lokasyonu için pv sisteminin 8760 saatlik performansı .....	205
4.2.1.3	Balıkesir lokasyonu için 8760 saatlik rüzgâr türbini performansı.....	206
4.2.2	PEM elektrolizörün kısmi yük performans analizi.....	207
4.2.3	Elektrolizör işletme parametrelerinin parametrik etkisi .....	209
4.2.4	Elektrolizör çalışma parametrelerinin çok amaçlı optimizasyon sonuçları.	212
4.2.5	Karar uzayında LCOH ve yenilenebilir enerji oranının (RenF) dağılımı....	215

## İÇİNDEKİLER (devam)

4.2.6	Tekno-ekonomik analizlerin çok amaçlı optimizasyon sonuçları .....	217
4.2.6.1	Vekil modelin doğrulanması ve güvenilirliği .....	217
4.2.6.2	Lokasyon bazlı çok amaçlı optimizasyon sonuçları .....	219
4.2.7	Bandırma için duyarlılık analizi ve ekonomik kırılabilirlik değerlendirmesi	228
4.2.7.1	PV+RT+şebeke konfigürasyonu (baz LCOH = 5.467 USD/kg H <sub>2</sub> ) ....	228
4.2.7.2	PV+şebeke konfigürasyonu (baz LCOH = 5.608 USD/kg H <sub>2</sub> ) .....	230
4.2.7.3	RT+şebeke konfigürasyonu (baz LCOH = 3.484 USD/kg H <sub>2</sub> ) .....	231
4.2.7.4	Sadece şebeke konfigürasyonu (baz LCOH = 5.923 USD/kg H <sub>2</sub> ) .....	232
4.2.7.5	Senaryolar arası genel değerlendirme.....	233
4.2.8	Ölçek etkileri ve ölçek ekonomileri.....	234
4.2.9	Elektrolizör dur-kalk stratejisinin LCOH üzerindeki etkisi .....	236
4.2.10	Su kaynağı seçiminin ekonomik analiz üzerindeki etkisi.....	238
4.2.11	Hidrojen depolama seçeneklerinin karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizi	240
4.2.11.1	Depolamasız referans senaryo .....	241
4.2.11.2	Sıkıştırılmış hidrojen (350 bar ve 700 bar).....	241
4.2.11.3	LOHC (sıvı organik hidrojen taşıyıcı).....	242
4.2.11.4	Kriyojenik sıvı hidrojen (LH <sub>2</sub> ).....	242
4.2.11.5	Depolama senaryoları için genel değerlendirme .....	243
4.2.12	Hidrojen satış fiyatına bağlı ekonomik performans analizi.....	243
4.2.13	Politika duyarlılığı ve mali senaryo değerlendirmesi .....	245
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>249</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>252</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>290</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Hidrojen üretim yöntemlerinin renk temelli sınıflandırması. ....	7
Şekil 2.2: Elektroliz Prensipleri ve Hücre Teknolojileri a) Alkalin b) PEM c) katı oksit elektroliz (IEA, 2024).....	16
Şekil 2.3: PEM elektrolizör membran–elektrot düzeneği (MEA) mimarisi (Global Green Growth Institute (GGGI), 2023). ....	17
Şekil 2.4: PEM elektrolizör proses akış diyagramı (Hydrogen Energy Engineering Sources, 2021). ....	18
Şekil 2.5: Yenilenebilir enerji tabanlı yeşil hidrojen üretimi ve hidrojen temelli kimyasal ürün değer zinciri (Tuluhong and others, 2024). ....	19
Şekil 2.6: SOEL elektrolizör proses akış diyagramı (Ferrete et al., 2025). ....	20
Şekil 2.7: Çalışmanın metodolojik çerçevesi ve araştırma akışı. ....	77
Şekil 3.1: Yeşil hidrojen tesisi yer seçimine yönelik mekânsal modelleme ve çok kriterli karar verme sürecinin akış şeması. ....	79
Şekil 3.2: Türkiye haritası üzerinde çalışma alanının konumu (EEA, 2020). ....	81
Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan değerlendirme kriterlerinin faktör gruplarına göre sınıflandırılması ve hiyerarşik gösterimi. ....	83
Şekil 3.4: Dışlama kriterleri uygulanması sonrasında Balıkesir ili içerisinde hidrojen üretim tesisleri için uygun bulunan potansiyel alanların mekânsal dağılımı....	87
Şekil 3.5: Arazi kullanım türlerine göre hidrojen üretim tesisleri için uygunluk haritası... 88	
Şekil 3.6: Yerleşim alanlarına uzaklık kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası..... 89	
Şekil 3.7: Kıyı çizgisine olan mesafeye bağlı olarak oluşturulan hidrojen üretim tesisleri için uygunluk haritası. ....	90
Şekil 3.8: Küresel yatay ışınım (GHI) verilerine göre hidrojen üretim tesisleri için oluşturulan mekânsal uygunluk haritası. ....	91
Şekil 3.9: Balıkesir ili için arazi eğimi (°) verilerine dayalı topoğrafik uygunluk haritası. 92	
Şekil 3.10: Balıkesir ilinde aktif fay hatlarına uzaklık (m) kriterine göre elde edilen uygunluk sınıflarının mekânsal dağılımı. ....	93
Şekil 3.11: Balıkesir ilinde doğalgaz şebekesine uzaklık (m) kriterine göre altyapı erişim uygunluk haritası. ....	94
Şekil 3.12: Balıkesir ilinde organize sanayi bölgelerine uzaklık kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası. ....	95
Şekil 3.13: Balıkesir ilinde ortalama rüzgâr hızı (m/s) kriterine göre oluşturulan rüzgâr enerjisi potansiyeli uygunluk haritası. ....	96
Şekil 3.14: Balıkesir ilinde yol ağına uzaklık kriterine göre oluşturulan ulaşım erişim uygunluk haritası. ....	97
Şekil 3.15: Uzman görüşleri ile birleşik FAHP ağırlıkları arasındaki korelasyon ve ortalama sapma değerleri. ....	103
Şekil 3.16: Uzman değerlendirmeleri sonucunda oluşturulan 13 kriterlik ikili karşılaştırma matrisi. ....	104
Şekil 3.17: Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemi için dinamik Simulink modellemesi ve çok amaçlı optimizasyon iş akışının genel şeması. ....	112
Şekil 3.18: PV Panelin Tek Diyot Eşdeğer Devresi (Villalva et al., 2009b). ....	116
Şekil 3.19: PV-Simulink Modeli-1. ....	118
Şekil 3.20: PV-Simulink Modeli-2. ....	119
Şekil 3.21: Rüzgâr Türbininin Simulink Modeli-1. ....	120

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 3.22: Rüzgâr Türbininin Simulink Modeli-2. ....	121
Şekil 3.23: Mersin, Çeşme ve Bandırma lokasyonlarında saatlik verilerden elde edilen aylık ortalama güneş ışınımı ve sıcaklık dağılımları. ....	122
Şekil 3.24: a) Bandırma, b) Çeşme ve c) Mersin bölgeleri için aylık ve saatlik ortalama rüzgâr hızı dağılımları. ....	123
Şekil 3.25: Optimizasyon iş akışı. ....	153
Şekil 3.26: Elektrolizör çalışma parametrelerinin belirlenmesine yönelik çok amaçlı optimizasyon sürecini gösteren yönetsel akış diyagramı. ....	156
Şekil 3.27: MOPSO algoritması akış diyagramı. ....	165
Şekil 3.28: NSGA-III algoritması akış diyagramı. ....	167
Şekil 4.1: Mekânsal değerlendirme kriterlerinin 10 ha planlama birimleri bazında ortalama değerleri ve standart sapmaları. ....	173
Şekil 4.2: Çok kriterli karar verme analizinde kullanılan mekânsal değişkenlerin dağılım karakteristikleri (ham veri histogramları). ....	175
Şekil 4.3: Kriterlerin çarpıklık ve basıklık değerlerinin karşılaştırılması. ....	176
Şekil 4.4: Mekânsal karar verme modelinde kullanılan kriterler arasındaki doğrusal bağımlılıkların Pearson korelasyon katsayıları ile incelenmesi. ....	177
Şekil 4.5: FAHP yöntemi görelî önem matrisi. ....	180
Şekil 4.6: En iyi 25 alternatifin 9 farklı ÇKKV yöntemine göre sıralama değerleri. ....	184
Şekil 4.7: ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma senaryoları arasındaki sıralama benzerliğini gösteren Spearman korelasyon matrisi. ....	185
Şekil 4.8: ÇKKV yöntemleri arasında ilk 50 alternatifin örtüşme matrisi. ....	186
Şekil 4.9: ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma senaryoları altında alternatif bazlı sıralama standart sapması dağılımı. ....	188
Şekil 4.10: Borda puanı ve kararlılık indeksi arasındaki ilişki. ....	189
Şekil 4.11: VIKOR yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	192
Şekil 4.12: VIKOR yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	193
Şekil 4.13: VIKOR yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	193
Şekil 4.14: MOORA yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	194
Şekil 4.15: MOORA yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	195
Şekil 4.16: MOORA yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	195
Şekil 4.17: TOPSIS yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	196
Şekil 4.18: TOPSIS yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	197
Şekil 4.19: TOPSIS yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	197
Şekil 4.20: Kararlılık indeksi en yüksek ilk 100 alternatifin mekânsal dağılımı. ....	198
Şekil 4.21: Kararlılık indeksi en düşük ilk 100 alternatifin (1. bölüm) mekânsal dağılımı. ....	199

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 4.22: Kararlılık indeksi en düşük ilk 100 alternatifin (2. bölüm) mekânsal dağılımı. .....	200
Şekil 4.23: Borda sayım yöntemi ile elde edilen performans temelli ilk 100 alternatifin mekânsal dağılımı.....	201
Şekil 4.24: Borda–Kararlılık birleşik skoru altında belirlenen en iyi 100 alternatifin mekânsal dağılımı.....	202
Şekil 4.25: Birleşik karar çerçevesi altında nihai optimum (Top-25) alternatiflerin mekânsal yoğunlaşma deseni.....	203
Şekil 4.26: 8760 Saatlik PPA Elektrik Fiyatı Profili. ....	205
Şekil 4.27: Balıkesir lokasyonu için 1 MW kurulu güce sahip fotovoltaik (PV) sisteminin 8760 saatlik performansının özetlenmesi: (a) temsili bir haftada ışınım ve PV çıkışı değişimi, (b) aylık–saatlik ortalama PV üretim dağılımı, (c) ışınım ile PV çıkışı arasındaki ilişki (renk: PV modül sıcaklığı), (d) aylık ortalama PV verimi.....	206
Şekil 4.28: Balıkesir lokasyonu için 1 MW kurulu güce sahip rüzgâr türbininin performansının özetlenmesi: (a) temsili bir haftada rüzgâr hızı ve türbin güç çıkışı değişimi, (b) aylık–saatlik ortalama rüzgâr türbini güç üretim dağılımı, (c) rüzgâr hızı ile güç çıkışı arasındaki doğrusal olmayan ilişki (güç eğrisi), (d) aylık ortalama kapasite faktörü değişimi.....	207
Şekil 4.29: PEM elektrolizörde elektrik tüketimine bağlı verim ve hidrojen üretiminin değişimi.....	209
Şekil 4.30: 1 MW PEM elektrolizör için parametrik tarama sonuçları: (a) çıkış gücü–verim ilişkisi, (b) çalışma sıcaklığı–verim ilişkisi, (c) çıkış gücü–verim dağılımının çalışma sıcaklığına göre renklendirilmiş gösterimi. ....	210
Şekil 4.31: PEM elektrolizör için işletme sıcaklığı ve basınca bağlı verim (eff_out) kontur haritası.....	211
Şekil 4.32: PEM elektrolizör için işletme sıcaklığı ve basınca bağlı çıkış gücü (P_out) kontur haritası. ....	212
Şekil 4.33: Latin Hiper Küp Örnekleme (LHS) yöntemi kullanılarak oluşturulan 2000 adet elektrolizör çalışma parametresinin (T_anode, T_coolant, P_cat ve T_ope) dağılımı ve parametreler arası örnekleme dengesi. ....	214
Şekil 4.34: Verimin maksimize edilmesi ve güç tüketiminin minimize edilmesi hedefleri için elde edilen Pareto cephesi, Pareto-dominant çözümler ve diz noktası...	215
Şekil 4.35: PV ve RT kurulu güçlerine bağlı olarak elde edilen LCOH ve RenF değerlerinin karar uzayı üzerindeki dağılımı. Minimum LCOH ve maksimum RenF noktaları işaretlenmiştir.....	217
Şekil 4.36: Eğitilmiş yapay sinir ağı modelinin örnekleme dışı LCOH tahmin hatası yüzeyi. .....	219
Şekil 4.37: LCOH ve Yenilenebilir enerji oranına göre a) Bandırma, b) Çeşme ve c) Mersin lokasyonlarına ait Pareto ön yüzleri. ....	222
Şekil 4.38: Bandırma için PV+RT+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin $\pm\%20$ değişiminin LCOH üzerindeki etkisini gösteren duyarlılık (tornado) diyagramı. .....	230
Şekil 4.39: Bandırma için PV+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin $\pm\%20$ değişiminin LCOH üzerindeki etkisi. ....	232

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

<b>Şekil 4.40:</b> Bandırma için RT+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin $\pm\%20$ değişiminin LCOH üzerindeki etkisi. ....	233
<b>Şekil 4.41:</b> Bandırma için Sadece Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin $\pm\%20$ değişiminin LCOH üzerindeki etkisi. ....	234
<b>Şekil 4.42:</b> Bandırma’da dört sistem konfigürasyonu için LCOH mutlak yüzde duyarlılıklarının karşılaştırmalı ısı haritası. ....	235
<b>Şekil 4.43:</b> Bandırma, Çeşme ve Mersin için elektrolizör kapasitelerine (1–50 MW) göre LCOH ve MW başına yatırım maliyeti. ....	236
<b>Şekil 4.44:</b> Hidrojen üretim sisteminde günlük kesinti süresi ve başlangıç zamanının LCOH üzerindeki etkisi. ....	239
<b>Şekil 4.45:</b> Bandırma bölgesi için hidrojen depolama seçeneklerinin karşılaştırmalı teknolojik analiz. ....	243
<b>Şekil 4.46:</b> Karlılık ölçütleri ile hidrojen alım fiyatı arasındaki ilişki (Bandırma örneği). ....	246

## ÖNSÖZ

Bu doktora çalışmasının yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde, engin akademik birikimi, bilimsel vizyonu ve titiz rehberliği ile her aşamada yol gösterici olan tez danışmanımın katkıları, çalışmanın bilimsel niteliğinin şekillenmesinde belirleyici olmuş; aynı zamanda araştırma yetkinliğimin gelişimine ve akademik perspektifimin olgunlaşmasına dikkate değer ölçüde yön vermiştir. Bu kapsamda, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ersin AKYÜZ'e,

Tez çalışmalarım boyunca tecrübeleriyle katkıda bulunup, beni destekleyen kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Gülenay Alevay KILIÇ ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Tuğrul AKYOL'a,

Coğrafi bilgi sistemleri hakkındaki bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. İsa CÜREBAL'a,

Akademik yolculuğuma adım atmamda en büyük teşvik ve desteği sağlayan, akademik birikimiyle çalışmama değerli katkılar sunan ve her aşamada gösterdiği anlayış, sabır ve destek ile bu sürecin en güçlü dayanaklarından biri olan değerli eşim Doç. Dr. Gülşah ÇELİK GÜL'e; ayrıca bu yoğun süreçte gösterdikleri sevgi, sabır ve anlayış ile bana her zaman güç veren kıymetli çocuklarım Gülin ve Melikşah'a,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2026**

**Metin Gül**

# 1. GİRİŞ

Küresel enerji sektörü, iklim değişikliğiyle mücadele, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve yüzyıl ortasına kadar karbon nötrlüğe ulaşma hedefleri doğrultusunda tarihsel bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan hidrojen, özellikle Avrupa Birliği'nin 2050 yılına yönelik karbon nötrlüğü hedefleri kapsamında, giderek daha etkili bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır (Evangelopoulou et al., 2019). Bu durum, hidrojenin hem yakıt hem de enerji taşıyıcısı olarak sahip olduğu çok yönlü kullanım potansiyelinden kaynaklanmakta olup, onu iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir araç haline getirmektedir (Caldeira and Infante-Moro, 2025). Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda enerji sektöründe köklü dönüşümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir; zira toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %75'i doğrudan enerji üretimi ve tüketiminden kaynaklanmaktadır. Bu çerçevede hidrojenin, gelecekte ulaşım sektörünün %20–50'sini ve sanayi sektörünün %5–20'sini karşılayabileceği öngörülmekte, bu da onun enerji sistemleri içerisindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır (Genovese et al., 2023).

Bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi için hidrojenin mevcut üretim yapısının, kullanım alanlarının ve özellikle yeşil hidrojen üretiminin ölçeklenmesine yönelik teknolojik ve ekonomik yolların kapsamlı biçimde anlaşılması gerekmektedir (Ziobrowski and Rotkegel, 2024). Nitekim günümüzde hidrojen, yalnızca bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunda dikkate değer bir depolama ve dengeleme unsuru olarak da değerlendirilmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, hidrojenin Avrupa Birliği enerji dönüşümünde iklim nötr bir çözüm olarak önemini ortaya koymakta; üretim miktarları, üretim yöntemleri ve özellikle yenilenebilir kaynaklara dayalı hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır (Pranckevičius et al., 2023).

Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, 2023 yılı itibarıyla yıllık hidrojen üretiminin yaklaşık 95 milyon ton seviyesine ulaştığı bilinmektedir. Ancak bu üretimin büyük bir kısmı halen doğal gazdan buhar metan reformasyonu (SMR) yöntemiyle gerçekleştirilmekte olup, bu süreç yüksek karbon emisyonları ile karakterizedir (IEA, 2024). Dolayısıyla mevcut üretim yapısı, hidrojenin temiz enerji taşıyıcısı olma potansiyelini dikkate değer ölçüde sınırlamaktadır. Avrupa özelinde durum daha da belirgindir; 2022 yılında üretilen hidrojenin

yaklaşık %96'sı yine fosil yakıt temelli yöntemlerle elde edilmiş ve bu durum belirgin CO<sub>2</sub> emisyonlarına yol açmıştır (Rosén et al., 2024).

Bu noktada, yenilenebilir elektrik kullanılarak suyun elektroliziyle üretilen yeşil hidrojen, giderek daha güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Batarya teknolojilerinin çoğunlukla kısa süreli dengeleme ihtiyaçlarına yanıt verebildiği düşünüldüğünde, hidrojenin uzun vadeli ve mevsimsel enerji depolama imkânı sunması dikkate değer bir avantaj sağlamaktadır. Dahası, sektörler arası entegrasyon kapasitesi sayesinde hidrojen, fazla yenilenebilir enerjinin sanayi, ulaşım, ısıtma ve kimyasal üretim gibi karbon azaltımının zor olduğu alanlara aktarılmasına olanak tanımaktadır (Algburi et al., 2025; Angelico et al., 2025). Ekonomik projeksiyonlar, günümüzde yaklaşık 4–8 USD/kg aralığında olan seviyelendirilmiş yeşil hidrojen maliyetinin (Levelized cost of hydrogen, LCOH), elektrolizör teknolojilerindeki gelişmeler ve yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüşle birlikte 2040 yılına kadar yaklaşık 2 USD/kg seviyesine gerileyebileceğini göstermektedir (Ali Mohammed Elaibi, 2026). Bununla birlikte, bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi yalnızca teknolojik ilerlemelere değil, aynı zamanda hidrojen üretim sistemlerinin doğru ve bütüncül bir şekilde planlanmasına bağlıdır.

Yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim sistemlerinin planlanması, doğası gereği çok boyutlu bir karar problemidir. Öncelikle, yeterli yenilenebilir kaynak potansiyeline sahip, talep merkezlerine ve altyapıya erişimi olan, çevresel ve arazi kullanım kısıtlarını sağlayan uygun lokasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, sistem tasarımının gerçekçi işletme koşulları altında değerlendirilmesi ve LCOH gibi performans göstergelerinin doğru şekilde hesaplanabilmesi için detaylı tekno-ekonomik modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, sistemin maliyet, üretim kapasitesi ve çevresel etkiler gibi çoğu zaman birbiriyle çelişen hedefler arasında dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Ancak literatür incelendiğinde, bu boyutların çoğunlukla birbirinden kopuk şekilde ele alındığı görülmektedir.

Mevcut çalışmaların dikkate değer bir bölümü, hidrojen üretimi için yer seçimine odaklanmakta ve bu kapsamda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Örneğin, Messaoudi ve ark. (2019) Cezayir için geliştirdikleri CBS-AHP tabanlı modelde, güneş enerjisine dayalı hidrojen üretimi açısından uygun alanları belirlemiş ve ülke genelinde oldukça sınırlı bir bölgenin yüksek uygunluk

gösterdiğini ortaya koymuştur. Benzer yaklaşımlar daha sonra İran, Fas ve Kamerun gibi farklı coğrafyalarda uygulanmış; bulanık mantık ve Monte Carlo simülasyonları gibi yöntemlerle kriter ağırlıklandırmasındaki belirsizlikler azaltılmaya çalışılmıştır (Messaoudi et al., 2019). Ancak bu çalışmalar, mekânsal uygunluk açısından değerli sonuçlar üretmekle birlikte, genellikle statik veri setlerine dayanmakta ve belirlenen alanların ekonomik veya operasyonel performansını değerlendirmemektedir.

Buna karşılık, literatürdeki bir diğer dikkate değer araştırma konusu tekno-ekonomik analizlere odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda temel performans göstergesi olarak çoğunlukla LCOH kullanılmaktadır. Yates ve ark. (2020), Monte Carlo simülasyonu ile LCOH üzerindeki temel maliyet belirleyicilerini analiz etmiş ve özellikle elektrolizör kapasite faktörü ile elektrik fiyatının etkili rol oynadığını göstermiştir (Yates et al., 2020). Shahabuddin ve ark. (2023), Avustralya için yaptıkları çalışmada, yalnızca güneş enerjisine dayalı sistemlerde maliyetlerin yüksek kaldığını, hibrit sistemlerde ise belirgin bir düşüş yaşandığını ortaya koymuştur (Shahabuddin et al., 2023). Benzer şekilde, Al-Owaidhani ve ark. (2026) enerji kaynağı seçiminin maliyet üzerinde belirleyici olduğunu ve teknolojik olgunluğun LCOH'yi doğrudan etkilediğini vurgulamıştır (Al-Owaidhani et al., 2026). Ancak bu çalışmaların çoğu, mekânsal değişkenleri dikkate almamakta ve analizlerini önceden belirlenmiş lokasyonlar üzerinden gerçekleştirmektedir.

Üçüncü bir yaklaşım ise hidrojen üretim sistemlerinin tasarımında çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasıdır. Tebibel (2021), rüzgâr -hidrojen sistemlerinde hidrojen açığı ve maliyeti minimize eden Pareto tabanlı bir optimizasyon modeli geliştirmiştir (Tebibel, 2021). Mukoni ve Garner (2022), Güney Afrika için hibrit sistemlerde NSGA-II algoritmasını kullanarak maliyet ve verimlilik hedeflerini birlikte ele almıştır (Mukoni and Garner, 2022). Sharma ve ark. (2023) ise NSGA-III algoritması ile çok amaçlı boyutlandırma problemlerini incelemiştir (Sharma et al., 2023). Sohani ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmalar, dinamik optimizasyon yaklaşımlarının statik modellere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır (Sohani et al., 2022). Bununla birlikte, bu çalışmaların büyük bölümü mekânsal analizleri ve saatlik veri tabanlı sistem simülasyonlarını optimizasyon sürecine entegre etmemektedir.

Son yıllarda bazı çalışmalar daha detaylı analizlerle probleme yaklaşmaktadır. Rouzbahani ve ark. (2026), tekno-ekonomik optimizasyon çıktılarının CBS katmanlarına geri

beslenmesini sağlayan bir yaklaşığ önermiştir (Rouzbahani et al., 2026). Herrmannsdörfer ve ark. (2025), Almanya için güçten gaza sistemlerinin yer seçimini LCOH modeli ile birlikte ele alan bir çerçeve geliştirmiştir (Herrmannsdörfer et al., 2025). Mendler ve ark. (2025) ise bölgesel ölçekte mekânsal çözünürlüklü simülasyon ve optimizasyon yaklaşımı sunmuştur (Mendler et al., 2025). Ancak mevcut literatürde, CBS tabanlı mekânsal analiz, saatlik çözünürlüklü enerji sistemi simülasyonu, tekno-ekonomik modelleme ve çok amaçlı optimizasyonu tek bir çalışma içinde sistematik olarak birleştiren kapsamlı bir yaklaşım henüz geliştirilmemiştir.

Bu kapsamda çalışmanın amacı; Balıkesir ili özelinde yeşil hidrojen üretim tesisleri için uygun lokasyonları belirlemek, seçilen lokasyonlarda hibrit yenilenebilir enerji destekli üretim sistemlerinin saatlik performansını modellemek, LCOH temelli tekno-ekonomik analiz yapmak ve maliyet ile yenilenebilir enerji kullanım oranı arasındaki ödünleşimleri NSGA-III ve MOPSO algoritmalarıyla değerlendirmektir.

Balıkesir ili, Marmara ve Ege bölgeleri arasında yer alan stratejik konumu, rüzgâr enerji potansiyeli, güneş enerjisi olanakları, liman ve sanayi bölgelerine yakınlığı, enerji altyapısına erişim imkanı ve hidrojenin potansiyel endüstriyel kullanım alanları bakımından yeşil hidrojen üretim sistemlerinin planlanması için uygun bir örnek alan sunmaktadır. Bu sebeple geliştirilen bu çerçeve, Balıkesir ili üzerinde uygulanmaktadır. Böylece çalışma, yalnızca hidrojen üretiminin hangi bölgelerde yapılması gerektiğini değil, aynı zamanda bu üretimin hangi koşullar altında daha ekonomik, verimli ve sürdürülebilir şekilde gerçekleştirilebileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

## 2. KURAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI

Hidrojen, en hafif ve doğada en çok bulunan bir element olmasının yanı sıra enerji sistemleri açısından dikkate değer bir enerji kaynağıdır. Birim kütle başına alt ısı değeri (LHV) baz alındığında, yaklaşık 33,6 kWh/kg enerji içeriğiyle hidrojen, doğal gaz ve petrol türevlerine kıyasla daha yüksek özgül enerji sunmaktadır. Ayrıca, yanma sonucunda temel olarak su buharı oluştuğu için, doğrudan kullanımı sırasında karbon emisyonu ortaya çıkmaz. Bu özellikleri sayesinde hidrojen, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş sürecinde giderek daha etkili bir rol üstlenmektedir (Casimir and Gunnarsson, 2020).

Sahip olduğu bu avantajlar, hidrojenin yalnızca bir yakıt olarak değil, aynı zamanda farklı enerji formları arasında dönüşüm sağlayabilen çok yönlü bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasına imkân sunmaktadır. Elektrik üretimi, kimyasal işlemler, ulaşım ve endüstriyel üretim gibi farklı alanlarda kullanılması, hidrojenin enerji sistemlerinde bağlayıcı bir unsur olarak öne çıkmasına katkı sağlamaktadır (Rosen and Koohi-Fayegh, 2016). Özellikle çelik üretimi, rafineri işlemleri ve amonyak sentezi gibi karbon yoğun sektörlerde hidrojenin düşük karbonlu alternatifler arasında dikkate değer bir rol oynayabileceği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır (Staffell et al., 2019).

Bu çok yönlü kullanım potansiyeli, küresel hidrojen talebinde uzun yıllardır gözlenen artışın temel nedenlerinden biridir. Küresel hidrojen talebi, 1975 yılından bu yana sürekli artış göstermiş ve günümüzde yıllık yaklaşık 70 milyon ton saf hidrojen seviyesine ulaşmıştır (Khaleel et al., 2024). Bu artış eğiliminin önümüzdeki yıllarda da devam edeceği öngörülmekte olup, talebin 2030 yılına kadar yaklaşık 115 milyon tona (Üçok, 2023) ve 2050 yılı itibarıyla 650 milyon ton seviyesine kadar yükselmesi beklenmektedir (Freire Ordóñez et al., 2023). Söz konusu büyüme, başta enerji, sanayi ve ulaşım sektörleri olmak üzere, küresel ölçekte dekarbonizasyon hedeflerine ulaşma çabalarıyla doğrudan ilişkilidir (Eljack and Kazi, 2021).

Artan talebe rağmen, hidrojenin mevcut kullanım yapısı büyük ölçüde geleneksel endüstriyel sektörlerde yoğunlaşmaktadır. 2016 yılı itibarıyla yaklaşık 85 milyon ton seviyesinde olan hidrojen üretimi; petrol rafinerileri, amonyak ve gübre üretimi, metalurji, gıda işleme ve yarı iletken üretimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Osman et al., 2022). Özellikle rafineri ve amonyak üretimi, hidrojen talebinin en büyük payını

oluşturmakta olup, 2019 verilerine göre sırasıyla 40,1 Mt H<sub>2</sub> ve 32,3 Mt H<sub>2</sub> düzeylerinde gerçekleşmiştir (Khaleel et al., 2024).

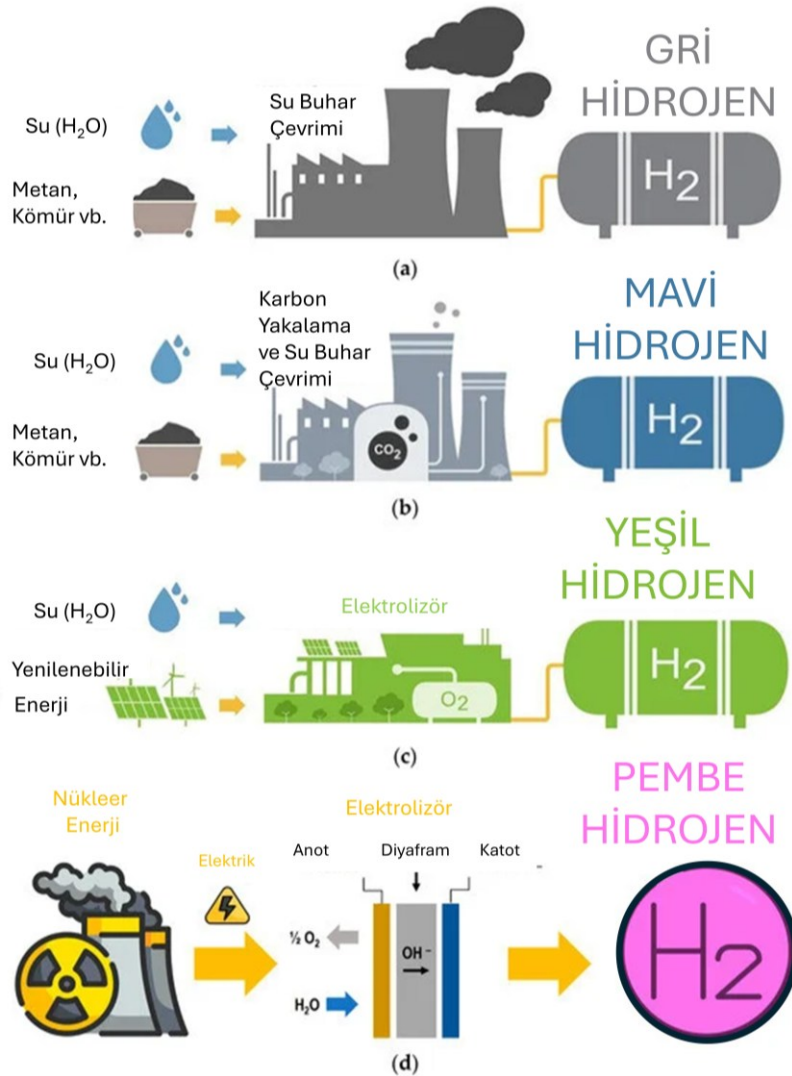
Bununla birlikte, hidrojenin mevcut üretim yapısı incelendiğinde, bu talebin büyük ölçüde karbon yoğun yöntemlerle karşılandığı görülmektedir. Günümüzde hidrojenin dikkate değer bir bölümü, kömür gazlaştırması ve doğal gazın buhar metan reformasyonu (SMR) gibi karbon yoğun süreçler aracılığıyla üretilmektedir (Wei et al., 2024). Literatürde yer alan çalışmalar, mevcut hidrojen üretiminin yaklaşık %95'inin fosil yakıtlardan elde edildiğini ve bu durumun dikkate değer miktarda karbon emisyonuna yol açtığını ortaya koymaktadır (Igalavithana et al., 2022). Nitekim hidrojen üretimi, küresel doğal gaz tüketiminin yaklaşık %6'sını ve kömür tüketiminin %2'sini oluşturarak yılda yaklaşık 830 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olmaktadır (Babich et al., 2023).

Bu durum, hidrojenin düşük karbonlu bir enerji taşıyıcısı olarak potansiyeline rağmen, mevcut üretim yöntemleri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından dikkate değer bir çelişki barındırdığını göstermektedir. Bu nedenle, gelecekteki hidrojen talebindeki artışın yalnızca geleneksel kullanım alanlarından değil, aynı zamanda yeni ve gelişmekte olan sektörlerden kaynaklanması beklenmektedir. Özellikle demir-çelik üretimi gibi enerji yoğun endüstriler, yakıt hücreli araçlar ve uzun süreli enerji depolama uygulamaları, hidrojen talebinin artmasında belirleyici rol oynayacaktır (Ku et al., 2023). Uluslararası Enerji Ajansı'nın net sıfır emisyon senaryosuna göre, 2050 yılı itibarıyla küresel hidrojen üretiminin yaklaşık 528 milyon tona ulaşması beklenirken, bazı çalışmalar bu değerın 800 milyon tona kadar çıkabileceğini öngörmektedir (Love et al., 2022). Bu projeksiyonlar, hidrojenin küresel enerji dönüşümünde merkezi bir konuma sahip olacağını ve özellikle enerji, sanayi ve ulaşım sektörlerinde dekarbonizasyon hedeflerine ulaşılmasında etkili bir rol üstleneceğini açıkça göstermektedir (Lebrouhi et al., 2022).

Bununla birlikte, doğada serbest halde bulunmayan hidrojen birincil enerji kaynağı değil, ikincil bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle hidrojen üretimi için mutlaka bir enerji girdisi gerekmektedir. Günümüzde küresel hidrojen üretiminin büyük bölümü fosil yakıtlara dayalı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. En yaygın hidrojen üretim yöntemleri arasında buhar metan reformasyonu ve kömür gazlaştırması yer almakta olup, bu süreçler dikkate değer miktarda karbon emisyonuna neden olmaktadır (Pareek et al., 2020).

Bu durum, hidrojenin çevresel etkisinin büyük ölçüde kullanılan üretim teknolojisine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürde hidrojen üretim yöntemleri genellikle karbon ayak izi esasına göre 'renk' bazında sınıflandırılmaktadır (Bhandari et al., 2014). Fosil yakıtların kullanıldığı ve karbon yakalama içermeyen üretim süreçleri gri hidrojen olarak adlandırılmaktadır. Karbon yakalama ve depolama teknolojileri ile entegre edilen üretim süreçleri, mavi hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılarak su elektrolizi yoluyla gerçekleştirilen üretim ise yeşil hidrojen olarak bilinmektedir. Hidrojen üretim yolları arasındaki temel farklar Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Hidrojen üretim yöntemlerinin renk temelli sınıflandırması (Łosiewicz, 2024).

Yeşil hidrojen üretiminde ana reaksiyon, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen ve oksijenin ayrıştırılmasıdır (Zeng and Zhang, 2010b):



Bu süreçte kullanılan elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması durumunda hidrojen üretimi düşük karbonlu hale gelir (Zhang et al., 2021). Bu nedenle, son yıllarda güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bütünleşmiş şekilde çalışan elektroliz sistemleri, yeşil hidrojen üretiminde en dikkate değer araştırma alanlarından birisi olmuştur. Bununla birlikte, yeşil hidrojen üretiminin ekonomik rekabetçiliği halen dikkate değer bir tartışma konusudur. Elektrolizör yatırım maliyetleri, elektrik fiyatları ve finansman koşulları, hidrojen üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen ana faktörlerdir. Mevcut çalışmalarda, yeşil hidrojen maliyetlerinin fosil temelli hidrojen üretimine göre daha yüksek olduğu, ancak elektroliz teknolojilerindeki gelişmeler ve yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüş dikkate alındığında bu farkın zamanla azalabileceği ifade edilmektedir (Glenk and Reichelstein, 2019; Tang et al., 2021). Uluslararası Enerji Ajansı da uygun yenilenebilir enerji koşullarının sağlandığı bölgelerde yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin dikkate değer ölçüde düşebileceğini belirtmektedir (IEA, 2024).

Bu bilgiler ışığında hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak sistem içindeki rolü, yalnızca teknik performans göstergeleriyle açıklanamaz; üretim yöntemleri, maliyet dinamikleri ve politika araçlarının birlikte oluşturduğu bütüncül enerji sistemi bağlamında ele alınmalıdır. Bu tez kapsamında da hidrojen, salt bir yakıt alternatifi olarak değil; yenilenebilir enerji entegrasyonu, sektörel karbonsuzlaşma ve enerji güvenliği bağlamında sistematik bir dönüşüm aracı olarak ele alınmaktadır.

## 2.1 Küresel Enerji Geçişinde Yeşil Hidrojenin Rolü

Küresel enerji sistemleri, elektrifikasyonun hızlanması ve yenilenebilir enerji kurulu gücünün artmasıyla yapısal bir dönüşüm yaşamaktadır. Ancak, bu dönüşüm, değişken üretim profillerinin getirdiği esneklik gereksinimi ve karbon yoğun sektörlerdeki zor azaltılabilir (HTA) emisyonlar nedeniyle yeni araçlara olan ihtiyacı da ortaya çıkarmaktadır. Bu enerji geçişi aşamasında, hidrojen, özellikle yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde, sadece alternatif bir yakıt değil; sektörler arası enerji iletimini sağlayan bir enerji taşıyıcısı ve sanayi için stratejik bir kimyasal girdisi olarak enerji geçişinin en dikkate değer unsuru haline gelmektedir (Franco and Giovannini, 2023a; Franco and Rocca, 2024b, 2024a; Yang

et al., 2022). Literatürde, yeşil hidrojenin sistem esnekliğini artırma kapasitesi ve karbon yoğun hidrojen seçeneklerinin çevresel etkisini azaltmadaki potansiyeli nedeniyle geçişin dikkate değer ve tamamlayıcı bir unsur olduğu belirtilmektedir (Franco and Giovannini, 2023a, 2024).

Yeşil hidrojenin stratejik önemi özellikle doğrudan elektrifikasyonun teknik veya ekonomik olarak sınırlı kaldığı HTA sektörlerde daha belirgin hale gelmektedir. Bu sektörlerde hidrojen, enerji sağlayıcısı olmanın ötesinde, proses kimyasında indirgeme ajanı veya temel girdi olarak emisyon azaltımını mümkün kılan bir “derin karbonsuzlaşma” aracı niteliği taşımaktadır (Franco and Giovannini, 2023a; Jayachandran et al., 2024; Yang et al., 2022). Ayrıca, hidrojenin depolanabilir ve taşınabilir olması, yenilenebilir üretim dalgalanmalarının yönetilmesi ve arz-talep dengesinin farklı zaman ölçeklerinde kurulabilmesi açısından sistem entegrasyonunu güçlendiren dikkate değer bir özellik olarak kabul edilmektedir (Franco and Giovannini, 2023a, 2024).

Yeşil hidrojenin stratejik değeri, doğrudan elektrifikasyonun teknik veya ekonomik açıdan yetersiz olduğu HTA sektörlerinde belirginleşmektedir. Hidrojen burada yalnızca enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda proses kimyasında indirgeme ajanı veya temel hammadde olarak görev yaparak emisyonları azaltmaktadır. Ayrıca depolanabilir ve taşınabilir olması sayesinde yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmalara karşı sistem esnekliğini artırmakta ve arz-talep dengesini desteklemektedir. Bu kuramsal çerçeve doğrultusunda, yeşil hidrojenin işlevini anlamak için bazı temel kavramlar birlikte ele alınmalıdır. Literatürde bu kavramlar genellikle beş ana başlık altında toplanmaktadır: (i) sektörler arası entegrasyon ve çok taşıyıcılı enerji sistemleri (MCES); (ii) karbonsuzlaşması zor sektörlerin teknik ve ekonomik dinamikleri; (iii) enerji depolama ve hidrojenin mevsimsel esneklik rolü; (iv) hidrojen ekonomisiyle bağlantılı değer zinciri belirsizlikleri; (v) derin karbonsuzlaşma yolları (Bachorz et al., 2024; Franco and Giovannini, 2023b; Ibrahim et al., 2022; Jayachandran et al., 2024; Yang et al., 2022). Mevcut araştırmalar bu başlıklar altında kapsamlı bir bakış sunsa da, çoğunlukla mekânsal analizler, tekno-ekonomik değerlendirme (TEA) ve çok amaçlı optimizasyonu ayrı ayrı veya kısmi entegrasyonlarla ele almaktadır. Bu nedenle, sahaya özgü mekânsal uygunluk, maliyet analizi ve optimizasyonun tam entegre edildiği yaklaşımların literatürde büyük ölçüde eksik olduğu belirlenmiştir. Bu durum, hidrojen geçişi literatüründe sahaya özgü, entegre bir mekânsal-tekno-ekonomik analiz-optimizasyon zincirinin sistematik olarak ele alınmasına yönelik dikkate değer bir potansiyel

boşluğa işaret etmektedir. Çizilen çerçeve, hidrojenin yalnızca teknik yönleriyle değil, aynı zamanda mekânsal ve ekonomik karar süreçleriyle birlikte incelenmesini gerektirmektedir. İlerleyen alt başlıklarda, bu kavram setleri hem literatürdeki temel yaklaşımlar hem de tezin özgün perspektifiyle ilişkili biçimde bütüncül olarak ele alınmıştır.

### **2.1.1 Sektörler arası enerji entegrasyonu**

Sektörler arası bağlantı, elektrik, ısı, gaz ve ulaşım gibi enerji taşıyıcılarının birlikte planlanıp işletilmesini ifade etmektedir. Bu, yalnızca elektrik üretimi ve iletimine odaklanan geleneksel yaklaşımdan farklıdır ve enerji sistemlerine daha geniş bir bakış sunmaktadır (İbrahim et al., 2022). Bu kavram, literatürde "çok taşıyıcılı enerji sistemi" (MCES) olarak adlandırılmaktadır. Model kapsamında enerji vektörleri arasındaki dönüşüm ve etkileşim mekanizmaları etkili bir rol oynamakta olup, hidrojen fazla elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek sektörler arası entegrasyonu mümkün kılan bir köprü işlevi görmektedir; bu yönüyle yalnızca bir depolama aracı olmanın ötesine geçerek sanayi, ulaşım ve gaz altyapılarıyla bütünleşik bir yapı sunmaktadır. Bu bağlamda hidrojen, entegre enerji sistemlerinde etkili bir bağlayıcı unsur olarak konumlanmakta ve yenilenebilir kaynaklara dayalı değişken elektrik üretiminin daha etkin ve esnek biçimde dengelenmesine olanak sağlamaktadır. Sektörler arası entegrasyonun yalnızca teknik bir optimizasyon problemi olmadığı sıkça vurgulanmaktadır. Bu sebeple, altyapı yatırımlarından piyasa tasarımına ve düzenleyici çerçevelere kadar çok katmanlı bir planlama gerekmektedir (Bachorz et al., 2024; İbrahim et al., 2022). Özellikle yenilenebilir enerji kurulumları arttıkça, enerji sistemlerinde esneklik ihtiyacı öne çıkmakta olup, hidrojenin üretim, depolama ve iletim altyapısının konumlanması ile kapasite planlaması daha etkili hale gelmektedir (Franco and Giovannini, 2023b; İbrahim et al., 2022). MCES yaklaşımı, enerji sistemini yalnızca farklı enerji taşıyıcılarının birlikte planlandığı bir yapı olarak değil, aynı zamanda bu taşıyıcılar arasındaki karşılıklı etkileşimlerin optimize edildiği bütüncül bir sistem olarak ele almakta; bu kapsamda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin elektroliz yoluyla hidrojene dönüştürülerek demir-çelik endüstrisinde indirgeme ajanı olarak kullanılması gibi uygulamalar aracılığıyla, elektrik sektöründeki fazla üretimin sanayi sektöründe düşük karbonlu üretime doğrudan katkı sağlaması mümkün olmakta ve böylece sektörler arası enerji akışları somut bir döngü içerisinde bütünleşik biçimde değerlendirilmektedir.

### **2.1.2 Karbonsuzlaştırılması zor sektörlerde hidrojenin rolü**

Karbonsuzlaştırılması zor sektörler, yüksek sıcaklık gereksinimleri ve proses kaynaklı emisyonlar nedeniyle geleneksel yaklaşımlardan ayrılmakta olup, bu sektörler özel politika ve teknoloji çözümlerine ihtiyaç duymaktadır. Çelik, çimento/klinker ve petrokimya sektörlerinde sera gazı emisyonlarının dikkate değer bir kısmı yalnızca enerji tüketiminden değil, üretim süreçlerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlardan da kaynaklanmakta olup, bu durum dönüşüm stratejilerinin yalnızca yakıt değişimiyle sınırlı kalamayacağını, aksine üretim proseslerinin temel yapısının da yeniden tasarlanmasını gerektirdiğini ortaya koymaktadır (Jayachandran et al., 2024; Yang et al., 2022). Bu çerçevede yeşil hidrojen, iki ana işleviyle öne çıkmaktadır. İlki, yüksek sıcaklık gerektiren süreçlerde hem yakıt hem indirgeme ajanı olarak karbon temelli girdilerin yerini alabilmesidir. İkincisi, kimya sanayisinde proses girdisi olduğunda üretimden kaynaklanan emisyonları dikkate değer ölçüde azaltabilmesidir (Franco and Giovannini, 2023b; Franco and Rocca, 2024b; Yang et al., 2022).

Özellikle çelik üretiminde hidrojenin doğrudan indirgeme (DRI) süreçlerinde indirgeme ajanı olarak kullanımı literatürde ayrıntılı biçimde tartışılmakta ve bu yaklaşım HTA sektörlerinin derin karbonsuzlaşmasında stratejik bir kırılma noktası olarak değerlendirilmektedir (Franco and Giovannini, 2023b; Franco and Rocca, 2024b; Yang et al., 2022). Bununla birlikte, hidrojenin mevcut maliyet yapısı ve enerji yoğunluğu dikkate alındığında dönüşümün ani değil, kademeli bir geçiş stratejisiyle tasarlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu kapsamda belirli oranlarda hidrojen içeren karışımların (blended combustion) ara çözüm olarak değerlendirilebileceği ifade edilmektedir (Franco and Rocca, 2024a; Massulli et al., 2024). Bu durum, HTA sektörlerde hidrojenin rolünün tek bir teknoloji reçetesine indirgenemeyeceğini göstermektedir. Sektöre özgü teknik gereksinimler, dönüşüm takvimi ve ekonomik göstergeler birlikte değerlendirilerek bütüncül bir planlama yaklaşımı geliştirilmelidir.

### **2.1.3 Yenilenebilir enerji sistemlerinde uzun süreli depolama ve hidrojen**

Yeşil hidrojenin enerji geçişindeki rolünü açıklayan temel kuramsal yaklaşımlardan biri, enerji depolama teorisi ile sistem esnekliği kavramlarının bütüncül değerlendirilmesine dayanmaktadır; zira yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği değişken üretim profilleri yalnızca kısa vadeli dengeleme yöntemleriyle yönetilememekte, özellikle yüksek yenilenebilir penetrasyonu koşullarında mevsimsel ve uzun ddikkate değer depolama

çözümleri sistem tasarımının vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmektedir. Bu çerçevede hidrojen, fazla elektrik enerjisinin elektroliz yoluyla kimyasal forma dönüştürülmesi sayesinde büyük ölçekli ve uzun süreli depolama imkânı sunarak etkili bir rol üstlenmekte (Balaji and You, 2024; Franco and Giovannini, 2023a; Yang et al., 2022), aynı zamanda depolanan enerjinin taşınabilirliği ve farklı sektörlerde yeniden kullanılabilirliği sayesinde sistem esnekliğini ve entegrasyon kapasitesini dikkate değer ölçüde artırmaktadır. Hidrojenin depolanması ve taşınmasına yönelik yöntemler (örneğin basınçlı tanklar ve sıvılaştırma süreçleri), sahip oldukları teknik ve termodinamik sınırlamalar nedeniyle ilave enerji kayıpları ve maliyet artışları oluşturmakta; bu durum hidrojenin ekonomik rekabetçiliğini doğrudan etkilemektedir (Balaji and You, 2024; Franco and Giovannini, 2023a; Yang et al., 2022). Bu nedenle söz konusu etkiler genellikle LCOH gibi kapsamlı tekno-ekonomik analizlerle değerlendirilerek sistem performansı bütüncül bir çerçevede incelenmektedir. Araştırmalar, hidrojenin sadece enerji taşıyıcısı olmadığını, aynı zamanda sistem mühendisliği açısından değerli bir dengeleme aracı olduğunu göstermektedir (Bekele et al., 2024; Mirshokraee et al., 2025; Sansavini et al., 2024). Bu çerçevede, teknoloji gelişimi ve ölçek ekonomileriyle maliyetlerin düşmesi halinde hidrojenin uzun dikkate değer depolama rolünün daha rekabetçi hale geleceği ve yenilenebilir entegrasyonunu anlamlı biçimde güçlendireceği belirtilmektedir (Balaji and You, 2024; Bekele et al., 2024; Franco and Giovannini, 2023a; Sansavini et al., 2024).

#### **2.1.4 Hidrojen ekonomisi ve değer zinciri yaklaşımı**

Hidrojen ekonomisi kavramı, hidrojenin üretim, depolama, dağıtım ve nihai kullanım aşamalarını kapsayan entegre bir değer zincirinin yönetimini ifade etmektedir. Bu zincirin ölçeklenebilirliği; teknolojik olgunluk düzeyi, altyapı yatırımları, piyasa tasarımı ve politika teşvikleri arasındaki karşılıklı bağımlılıklar tarafından belirlenmektedir (Bachorz et al., 2024; Herdem and Nathwani, 2024; Ibrahim et al., 2022; Jayachandran et al., 2024). Dolayısıyla hidrojen ekonomisi yalnızca bir üretim teknolojisi tartışması değil, aynı zamanda yatırım kararları ve sistem mimarisi açısından çok katmanlı bir planlama problemidir.

Literatürde, yeşil hidrojen maliyetlerini düşürmek için elektroliz teknolojilerinde maliyet ve performans iyileştirmelerinin dikkate değer olduğu belirtilmektedir. Aynı zamanda, CAPEX ve OPEX bileşenlerinin optimizasyonunun yanı sıra, depolama ve dağıtım altyapısının ölçek ekonomileriyle desteklenmesinin de belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Bachorz et al.,

2024; Jayachandran et al., 2024). Üretim tarafındaki verimlilik artışları tek başına yeterli değildir; değer zincirinin tamamında koordineli bir ölçeklenme gerekmektedir.

Talep tarafında, HTA sektörlerinde hidrojenin sadece yakıt değil, aynı zamanda indirgeme ajanı veya proses girdisi olarak kullanılması, hidrojen ekonomisinin sanayi ile olan bağımlı güçlendirmektedir (Franco and Giovannini, 2023b; Franco and Rocca, 2024b; Yang et al., 2022). Araştırmalar, hidrojen ekonomisinin sürdürülebilir şekilde hayata geçirilmesi için farklı değer zinciri halkalarında eş zamanlı ilerlemenin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, (i) elektroliz teknolojilerinde maliyetleri azaltma ve performansı artırma, (ii) depolama ve dağıtım altyapısını ölçek ekonomileriyle güçlendirme ve (iii) HTA sektörlerinde talep güvenliğini sağlayacak politika ve teşvik mekanizmalarını geliştirme ana hedefler arasında yer almaktadır (Bekele et al., 2024; Franco and Rocca, 2024b; Herdem and Nathwani, 2024; Jayachandran et al., 2024). Bu alanlardan herhangi birindeki gecikme, zincirin genel rekabetçiliğini ve yatırım yapılabilirliğini azaltan sistematik bir risk olarak görülmektedir.

### **2.1.5 Derin karbonsuzlaşma senaryolarında hidrojenin rolü**

Derin karbonsuzlaşma çerçevesi, sadece elektrik üretimindeki emisyonları azaltmayı değil, aynı zamanda enerji sistemi genelinde endüstri, ulaşım ve ısıtma gibi alanlarda yüksek azaltım hedeflerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesini hedeflemektedir. Bu bakış açısıyla hidrojen, özellikle uzun vadeli senaryolarda sektör dönüşümünde etkili bir araç olarak görülmektedir. Literatürde hidrojenin, karbon yoğun süreçlerin yerini alarak veya onları dönüştürerek dikkate değer bir enerji talebini karşılayabileceği yaygın şekilde belirtilmektedir (Bekele et al., 2024; Massulli et al., 2024; Yang et al., 2022).

Güçten Hidrojene (Power-to-Hydrogen) ve daha geniş kapsamlı Güçten-X'e (Power-to-X, PtX) yaklaşımları, yenilenebilir enerjiyi hidrojen ve türev yakıtlar haline getirerek sektörde entegrasyonu sağlayan temel politika ve teknolojiler arasında yer almaktadır. Bu yöntem, elektrik şebekesindeki fazla üretimin kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlayarak uzun vadede esneklik sunmayı amaçlamaktadır. Ancak, maliyetler, altyapı eksiklikleri ve güvenlik standartları, derin karbonsuzlaştırma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan en büyük belirsizlikler olarak görülmektedir (Bachorz et al., 2024; Jayachandran et al., 2024; Massulli et al., 2024; Plank et al., 2023). Bu nedenle literatür, hidrojenin rolünü yalnızca tek çözüm olarak değil; aynı zamanda teknolojik öğrenme eğrileri, yenilenebilir

kapasitenin artış hızı, sanayi dönüşüm takvimleri ve bölgesel farklılıklar gibi faktörlerle birlikte dikkate alınması gereken stratejik bir unsur olarak görmektedir (Franco and Giovannini, 2023b; Franco and Rocca, 2024b; Herdem and Nathwani, 2024; Yang et al., 2022). Başka bir deyişle, hidrojenin derin karbonsuzlaşmadaki rolü, yalnızca sistem seviyesinde planlama ve ölçeklendirme kararlarıyla ele alındığında anlam kazanmaktadır.

### **2.1.6 Hidrojen ekonomisinin gelişiminde politika ve piyasa mekanizmaları**

Yeşil hidrojenin ölçeklenmesinde politika ve düzenlemelerin önemi büyüktür; özellikle HTA sektörlerinde talep yaratmak ve yatırım güvenliğini sağlamak açısından etkili rol oynamaktadır. Bu nedenle, Avrupa Birliği başta olmak üzere farklı bölgelerde geliştirilen hidrojen stratejileri ve düzenleyici çerçeveler, sadece ulusal enerji dönüşümünü değil, aynı zamanda hidrojenin uluslararası ticaretini ve pazar yapısını şekillendiren dikkate değer araçlar olarak görülmektedir (Herdem and Nathwani, 2024; Plank et al., 2023). Açık ve istikrarlı politika sinyalleri, yüksek sermayeli hidrojen yatırımlarının finansmanını doğrudan etkilemektedir.

Diğer yandan, teknik zorluklar elektroliz verimliliği, elektrolizör maliyetleri, depolama teknolojilerinin enerji kayıpları ve güvenlik gereksinimleri gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Bu teknik sınırlamalar ile politika geliştirme süreçleri arasındaki etkileşim, hidrojen sistemlerinin ölçeklendirilmesinde dikkate değer bir planlama sorunu ortaya koymaktadır. Güç sistemleri bağlamında konumlandırma kararları ve üretim kapasitesi planlamasını optimizasyon teknikleriyle ilişkilendiren çalışmalar, hidrojen yatırımlarının yalnızca teknoloji tercihi değil, aynı zamanda mekânsal planlama ve enerji sistemi operasyonlarıyla entegre edilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Rabiee et al., 2020).

HTA sektörlerinde hidrojen kullanımına ilişkin analizler genellikle karışık yanma (blended combustion) gibi geçiş stratejileri veya indirgeme süreçleri üzerinden yapılmakta ve teknik-ekonomik değerlendirmelerle desteklenmektedir. Bu analizler, politika tasarımında hangi sektörlerin hangi aşamada ve hangi araçlarla destekleneceğine karar verirken karar vericilere dikkate değer bir çerçeve sunmaktadır (Franco and Rocca, 2024b; Yang et al., 2022). Literatürde öne çıkan genel eğilim; teknolojik öğrenme süreçlerini hızlandırmak, HTA sektörlerine özgü hedeflenmiş finansal teşvikler geliştirmek, depolama ve dağıtım altyapısını koordineli biçimde ölçeklendirmek ve güvenlik ile tedarik zinciri dayanıklılığını

güçlendirmeye yönelik bütünsel politika tasarımlarının gerekliliğidir (Herdem and Nathwani, 2024; Ibrahim et al., 2022; Jayachandran et al., 2024; Rabiee et al., 2020).

Bu çerçeve, hidrojenin ölçeklenmesini sadece teknolojik bir sorun olmaktan çıkarmakta; aynı zamanda yatırım kararları, düzenleyici yapı, piyasa tasarımı ve uzun vadeli sistem dönüşümüyle bütünsel bir geçiş sürecinin parçası olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

## **2.2 Yenilenebilir Enerji Destekli Hidrojen Üretiminin Teorik Temelleri**

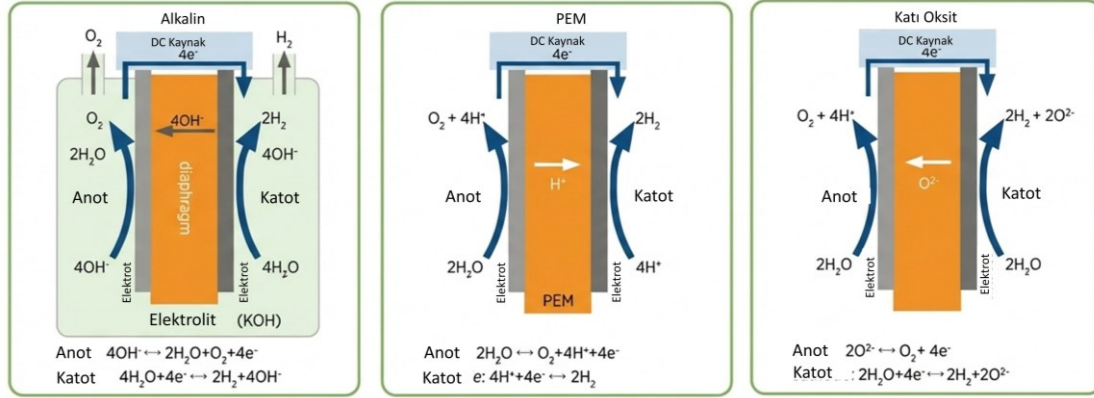
Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik kullanılarak su elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi, Bölüm 2.1’de tartışılan sistem esnekliği ve düşük emisyonlu endüstriyel girdi ihtiyacının teknik temellerini oluşturmaktadır. Bu bölümde, YE destekli hidrojen üretiminin teorik altyapısı; elektroliz teknolojilerinin temel çalışma prensipleri ve performans farkları, maliyet dinamiklerinin öğrenme eğrisi ve ölçek ekonomileriyle açıklanması, termodinamik verimlilik sınırlarının pratik işletme koşulları altında değerlendirilmesi ile YE’nin değişken/kesintili doğasıyla entegrasyon gereksinimleri incelenmektedir (Bouwman, 2024; Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023; Sun et al., 2015; Vibhu et al., 2019; Wang et al., 2024; Zun and McLellan, 2023). Böylece, ilerleyen bölümlerde kullanılan CAPEX, OPEX ve özellikle LCOH gibi göstergelerin, hangi teknik varsayımlar ve sistem koşulları altında anlam kazandığı açıkça ortaya konmaktadır.

### **2.2.1 Ticari tip elektroliz teknolojileri**

Yenilenebilir enerji (YE) ile değerlendirildiğinde, elektrolizör teknolojileri yalnızca enerji verimliliği bakış açısından değil, aynı zamanda değişken güç girişlerine tepki verme, işletme esnekliği, dayanıklılık ve ölçeklenebilirlik gibi sistem seviyesinde kriterlerle de incelenmelidir. Özellikle rüzgâr ve güneş gibi kesintili enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemlerde, elektrolizörlerin dinamik yük değişimlerine verdikleri cevap, teknolojik seçimleri belirleyen dikkate değer bir faktör olmaktadır. Literatürde, alkali su elektrolizi (AWE) ve proton değişim membranlı elektroliz (PEM) sistemleri en yaygın tercih edilen iki temel yöntemdir (Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023; Vibhu et al., 2019).

Elektroliz teknolojilerinin temel farkı, kullanılan elektrolit türü ve hücre içerisindeki iyon taşınım mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Alkalin sistemlerde hidroksit iyonları ( $\text{OH}^-$ ) sıvı elektrolit içerisinde taşınırken, PEM elektrolizörlerde protonlar ( $\text{H}^+$ ) katı polimer

membran üzerinden taşınmaktadır. Katı oksit elektroliz sistemlerinde ise iyon iletimi oksijen iyonları ( $O^{2-}$ ) aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu farklı iyon iletim mekanizmaları elektrolizörlerin çalışma sıcaklığı, malzeme gereksinimleri ve sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu elektrokimyasal farklar Şekil 2.2’de alkalın, PEM ve katı oksit elektroliz teknolojileri için karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

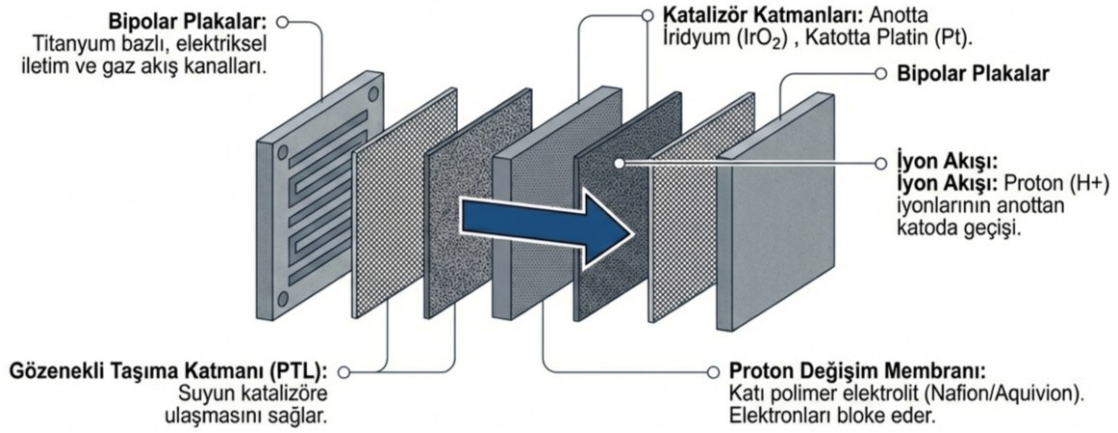


**Şekil 2.2:** Elektroliz Prensipleri ve Hücre Teknolojileri a) Alkalın b) PEM c) katı oksit elektroliz (IEA, 2024).

Alkalın elektrolizörler, uzun süredir endüstride yaygın olarak kullanılan ve yüksek teknolojik olgunluğa sahip sistemlerdir. Bu teknolojiye genellikle potasyum hidroksit (KOH) gibi alkalın çözeltiler elektrolit olarak tercih edilir ve hidrojen üretimi, elektrotlar arasındaki iyonların taşınımını aracılığıyla gerçekleşir. Bu sistemlerin en büyük avantajları, göreceli olarak düşük ekipman maliyetleri, uzun sürelerde edinilen tecrübe ve büyük ölçekli kurulumlarda sağlanan ekonomik faydalardır (Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023; Vibhu et al., 2019).

Proton değişim membranı (PEM) elektrolizörleri, kompakt tasarım özellikleri ve hızlı dinamik yanıt kabiliyetleri sayesinde özellikle değişken karakterli yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon açısından dikkate değer avantajlar sunmaktadır. Bu sistemlerde elektrokimyasal hücre yapısı, genellikle çok katmanlı bir yapı olan membran elektrot düzeneği (MEA) şeklinde tasarlanmaktadır. MEA yapısı; proton değişim membranı, anot ve katot katalizör tabakaları, gözenekli taşıyıcı (GDE) katmanlar ve bipolar plakalar gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Anot tarafında gerçekleşen suyun elektrokimyasal ayrışması sonucu açığa çıkan protonlar, proton iletken membran aracılığıyla katot tarafına taşınmakta

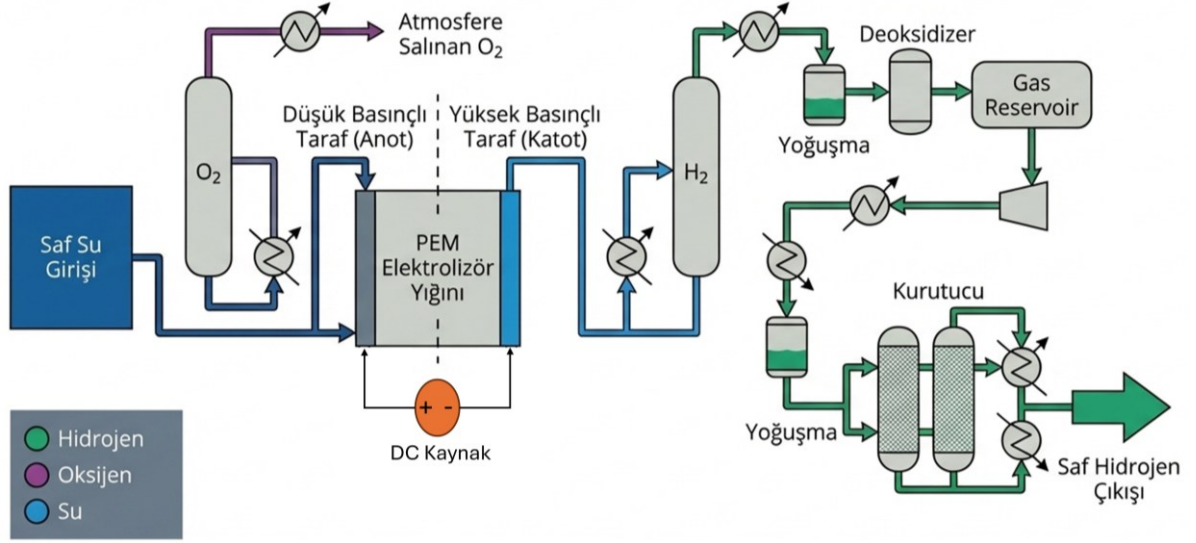
ve burada elektronlarla birleşerek hidrojen gazı oluşumunu sağlamaktadır. PEM hücresinin temel yapısal bileşenleri ve çalışma prensibi Şekil 2.3'te sunulmaktadır.



**Şekil 2.3:** PEM elektrolizör membran–elektrot düzeneği (MEA) mimarisi (GGGI, 2023).

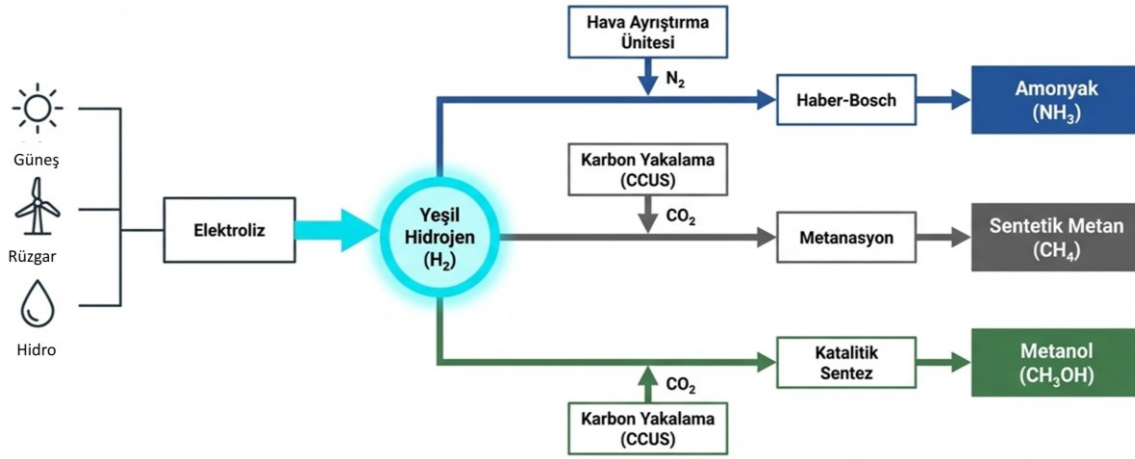
AWE–PEM karşılaştırmasında, özellikle dinamik işletme koşullarında belirleyici farklar ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir üretimin değişkenliği altında yük takibi sırasında hücre gerilimi artışları, kısmi yük verimliliği ve bileşenlerin dayanıklılığı gibi unsurlar, teknolojilerin gerçek saha performansını etkileyen en dikkate değer faktörler haline gelmektedir (Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023; Vibhu et al., 2019). Bu nedenle, yenilenebilir enerji entegrasyonunu amaçlayan çalışmalar sırasında PEM'in hızlı başlatıp durdurabilme özelliği dikkate değer bir avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda, AWE'nin maliyet avantajı ve teknolojik olgunluğu, büyük ölçekli kurulumlarda karar verirken ön planda olmaktadır (Jeon et al., 2023; Vibhu et al., 2019).

PEM elektrolizörlerin sistem çalışma prensibi yalnızca hücre yapısıyla sınırlı değildir; su besleme, gaz ayrıştırma, kurutma ve depolama gibi destekleyici süreçleri de içermektedir. Elektrolizör yığnında üretilen hidrojen ve oksijen gazları, ayrıştırma, yoğunlaştırma ve kurutma işlemlerinden geçirildikten sonra saf hidrojen elde edilmektedir. Bu sistemin akış diyagramı, Şekil 2.4'te gösterilen proses aşamaları ile birlikte gösterilmiştir.



**Şekil 2.4:** PEM elektrolizör proses akış diyagramı (Hydrogen Energy Engineering Sources, 2021).

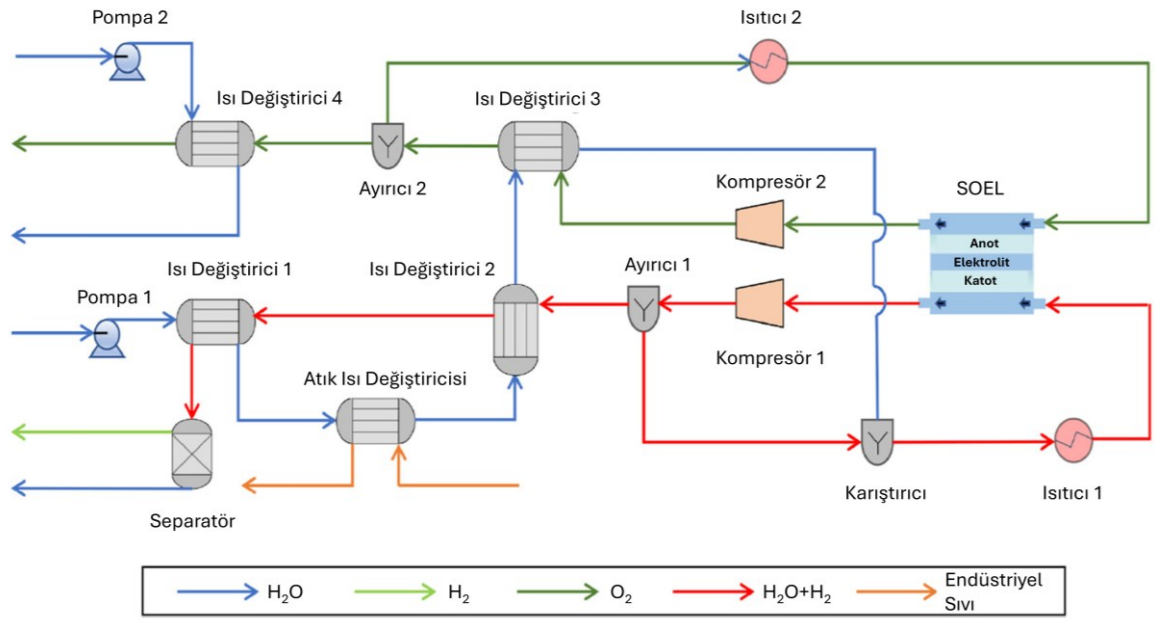
Elektroliz teknolojilerinin enerji sistemlerindeki rolü, yalnızca hidrojen üretimi ile sınırlı olmayıp, aynı zamanda daha geniş bir enerji ve kimya değer zincirinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Elektroliz yoluyla üretilen hidrojen, çoğu durumda farklı endüstriyel süreçlerle entegre edilerek katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılarak gerçekleştirilen elektroliz süreçleri sonucunda üretilen yeşil hidrojen, çeşitli kimyasal sentez reaksiyonlarında etkili bir ara ürün olarak görev yapmaktadır. Bu kapsamda hidrojen; hava ayırıştırma ünitesinden temin edilen azot ile Haber–Bosch prosesi aracılığıyla amonyak üretiminde, karbon yakalama teknolojileri ile elde edilen CO<sub>2</sub>'nin metanasyon reaksiyonu kapsamında değerlendirilmesiyle sentetik metan üretiminde ve ayrıca katalitik süreçler yoluyla metanol sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin elektrolizle yeşil hidrojene dönüştürülmesi ve bu hidrojenin çeşitli kimyasal ürünlere çevrilmesi süreci tipik bir yeşil hidrojen değer zinciri olarak şematik biçimde sunulmuştur.



**Şekil 2.5:** Yenilenebilir enerji tabanlı yeşil hidrojen üretimi ve hidrojen temelli kimyasal ürün değer zinciri (Tuluhong et al., 2024).

Yüksek sıcaklık elektrolizi tarafında bulunan katı oksit elektroliz (SOEL) tabanlı sistemler (Şekil 2.6), elektrik ve ısı enerjisinin birlikte kullanılabilirdiği durumlarda daha yüksek üretim verimliliği sağlayabilmektedir. Bunun temel nedeni, sıcaklık arttıkça reaksiyon kinetiklerinin hızlanması ve hidrojen üretimi için gereken elektrik enerjisinin termodinamik açıdan azalmasıdır (Jun et al., 2016; Sun et al., 2015; Vibhu et al., 2019). Katı oksit elektrolizörleri, genellikle 700–900 °C aralığında çalışan yüksek sıcaklıklı sistemler olup, reaksiyon entalpisinin dikkate değer bir kısmının elektriksel enerji yerine ısıl enerji ile karşılanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, sistemin elektriksel verimini artırırken aynı zamanda daha yüksek akım yoğunluklarına ulaşılmasını ve elektrot aktivasyonunun iyileşmesini sağlamaktadır (Habermeier et al., 2024). Bu sistemlerde elektrolit olarak çoğunlukla itriyum veya skandiyum ile stabilize edilmiş zirkonya kullanılmakta olup, bu malzeme yüksek sıcaklıklarda oksijen iyon iletkenliği göstermektedir (Bonanno et al., 2024). Ancak yüksek çalışma sıcaklıkları, reaksiyon kinetiği ve termodinamik verim açısından avantaj sağlamakla birlikte, homojen sıcaklık dağılımının korunması ve malzeme bozunmasının önlenmesi açısından hassas bir ısıl yönetim gerektirmektedir (Franco and Giovannini, 2023c). Özellikle başlatma-durdurma döngülerinde ortaya çıkan termal gerilmeler ve uzun dikkate değer malzeme dayanımı sorunları, bu teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki temel engeller arasında yer almaktadır (Van Hoecke et al., 2021). Ayrıca sınırlı sayıda ticari uygulama ve üretici bulunması, bu teknolojinin henüz erken gelişim aşamasında olduğunu göstermektedir (Wang et al., 2025). Buna karşılık, proton değişim membranlı elektrolizörler, genellikle 50–80 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda çalışmakta olup, bu durum malzeme dayanımını artırmakta ve ısıl yönetimi dikkate değer

ölçüde kolaylaştırmaktadır (Gaikwad et al., 2023). PEM sistemleri ayrıca değişken güç girişlerine hızlı tepki verebilme yetenekleri sayesinde kesintili yenilenebilir enerji kaynakları ile yüksek uyumluluk göstermekte, kompakt yapıları sayesinde modüler ve ölçeklenebilir sistem tasarımlarına olanak tanımaktadır (Hughes et al., 2021). Yüksek akım yoğunluklarında çalışabilme ve hızlı yük alma-bırakma kabiliyetleri de dikkate alındığında, PEM elektrolizörlerin özellikle yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim sistemleri ile entegrasyon açısından daha uygun bir teknoloji olduğu değerlendirilmektedir (Hashmi et al., 2025).



**Şekil 2.6:** SOEL elektrolizör proses akış diyagramı (Ferrete et al., 2025).

Hidrojen teknolojisinin dikkate değer unsurlarından biri de anyon değişim membranı (AEM) elektrolizidir. Bu yaklaşım, alkalın ortamın malzeme maliyeti avantajını sürdürürken, membran elektrot yapısı sayesinde daha kompakt sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, değerli metal içermeyen katalizörlerle çalışabilme kapasitesiyle maliyetleri düşürme potansiyeline sahiptir (Jeon et al., 2023). Bununla birlikte, AEM teknolojisinin uzun ddikkate değer kararlılık, performans sürekliliği ve ticari ölçeklenebilirlik açısından hâlâ gelişim aşamasında olduğu ve bu nedenle kısa vadede daha çok alternatif veya geçiş teknolojisi olarak değerlendirildiği görülmektedir (Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023).

### **2.2.2 Elektroliz teknolojilerinde öğrenme eğrileri ve ölçek ekonomileri**

YE destekli hidrojen üretiminde, teknoloji seçiminin yanı sıra maliyetlerin zaman içindeki gelişimi de yatırım ve kapasite planlamasında dikkate değer rol oynamaktadır. Öğrenme eğrisi yöntemi, üretim hacmi arttıkça birim maliyetlerin azaldığını ve bu azalmaların CAPEX üzerinden LCOH'a doğrudan yansıdığını açıklamak için sıkça kullanılmaktadır (Bouwman, 2024; Wang et al., 2024; Zun and McLellan, 2023). Elektrolizör üretiminin ölçeklendirilmesi, tedarik zincirinin gelişimi, bileşenlerin standardizasyonu ve seri üretim kapasitesinin artmasıyla birlikte ekipman maliyetlerinde düşüş sağlayan bir baskı oluşturmaktadır (Bouwman, 2024; Zun and McLellan, 2023).

Özellikle PEM ve AWE teknolojilerinde maliyet azalmalarının, sadece hücre içi verimlilik artışlarından değil, aynı zamanda pazarın büyüklüğü ve üretim hacminden kaynaklanan ölçek ekonomilerinden de kaynaklandığı açıktır (Bouwman, 2024; Zun and McLellan, 2023). Bu nedenle, tekno-ekonomik değerlendirmelerde sadece mevcut maliyet seviyeleri değil, öğrenme oranlarına göre maliyet patikasının nasıl gelişeceği ve bunun farklı senaryolarda LCOH'a nasıl etki edeceği de göz önünde bulundurulmalıdır (Wang et al., 2024; Zun and McLellan, 2023).

### **2.2.3 Elektroliz teknolojilerinde termodinamik verimlilik ve işletme sınırları**

Elektroliz prosesinin teorik verimlilik sınırları, düşük sıcaklık (AWE/PEM) sistemlerde hücre potansiyeli ve arayüz kinetikleri ile, yüksek sıcaklık sistemlerinde ise sıcaklığın getirdiği termodinamik avantajla bağlantılıdır (Chen et al., 2015; Vibhu et al., 2019). Özellikle SOEL teknolojisinde, sıcaklık yükseldikçe gereken elektrik enerjisi azalmaktadır ve aynı hidrojen üretimi için daha düşük elektrik gücü kullanılmaktadır (Msweli et al., 2025; Vibhu et al., 2019). Bu durum teorik olarak dikkate değer bir verimlilik avantajı sunmaktadır. Ancak, bu avantajın devamlılığı, malzeme istikrarı ve elektrot–elektrolit arayüzlerinde gelişen bozulma mekanizmalarıyla sınırlanabilmektedir (Msweli et al., 2025; Vibhu et al., 2019). Dolayısıyla, yüksek sıcaklık sistemleri, termodinamik açıdan çekici olsa da, uzun vadeli dayanıklılık ve işletme ömrü açısından dikkatli analiz gerektiren bir teknoloji alanını temsil etmektedirler.

Düşük sıcaklık sistemleri yüksek termal avantaj sunmasa da, pratikte daha hızlı devreye alma, esnek işletme ve değişken yenilenebilir Enerji girdilerine uyum sağlama açısından avantajlıdır. Bu durum, özellikle değişken PV ve rüzgâr senaryolarında PEM'in hızlı yanıt

süreleri ve işletmedeki esnekliğiyle birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Chen et al., 2015; Jeon et al., 2023). Alternatif protonik seramik tabanlı orta–yüksek sıcaklık çözümlerinin belirli entegrasyon şartlarında rekabetçi olabileceğine dair bulgular vardır; ancak, bu teknolojinin henüz gelişim aşamasında olduğu anlaşılmaktadır (Liu et al., 2025).

#### **2.2.4 Yenilenebilir enerji-elektrolizör-şebeke esnekliği**

YE'nin değişken üretim karakteri, elektrolizörlerin sadece sabit yükte çalışan üretim makineleri olarak değil, aynı zamanda sistemde esnek yük fonksiyonu görebilen bileşenler olarak kullanılmasına imkân tanımaktadır. Özellikle hızlı yanıt yeteneğine sahip PEM sistemler, yüksek yenilenebilir enerji oranlarının olduğu senaryolarda güç dalgalanmalarını azaltarak şebekenin istikrarını destekleyebilmektedir (Chen et al., 2015; He et al., 2022; Vudata et al., 2022). Bu yaklaşım, elektrolizörlerin sadece hidrojen üretim kapasitesiyle değil, aynı zamanda enerji sistemi işletim performansına yaptığı katkıyla da değer yaratabildiğini göstermektedir (He et al., 2022; Vudata et al., 2022).

Yüksek sıcaklık sistemleri açısından, elektrik–ısı entegrasyonunun mümkün olduğu durumlarda, SOEL'lerin fazla elektriğin kullanımıyla ilgili avantajlar sağladığı ve belirli optimizasyon yaklaşımlarında faydalı sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Sun et al., 2015; Wang et al., 2024; Zun and McLellan, 2023). Bununla birlikte, YE entegrasyonunun başarısı sadece teknoloji seçiminden ibaret değil; aynı zamanda dinamik modelleme ve kontrol stratejilerine de bağlı olup, PV-smoothing yaklaşımları ve stack-level dinamik modeller özellikle PEM sistemleri kapsamında detaylı şekilde ele alınmış; zamanla değişen PV girdilerinin yumuşatılması ve sistem stabilizasyonu amacıyla ilişkilendirilmiştir (He et al., 2022; Vibhu et al., 2019; Vudata et al., 2022). Bu dinamik entegrasyon özellikleri, elektrolizörlerin kapasite faktörünü ve işletme profilini doğrudan etkileyerek, yatırım ihtiyaçları ve maliyet tahminleri üzerinde dikkate değer bir rol oynamaktadır.

#### **2.2.5 Elektrolizör maliyet dinamikleri ve LCOH projeksiyonları**

Elektrolizör maliyetlerindeki azalma eğilimi, YE destekli hidrojen üretiminin teknik olarak uygulanabilir olmasını ekonomik açıdan anlamlı hale getiren temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle 2018–2025 döneminde maliyetlerdeki düşüşler, farklı bölgeler ve politika senaryoları kapsamında, CAPEX bileşenleri, yatırım ihtiyaçları ve LCOH projeksiyonlarıyla detaylı şekilde incelenmektedir (Bouwman, 2024; Zun and McLellan, 2023). Bu dönemdeki azalma eğilimi, elektrolizör üretim hacmindeki artış, tedarik zincirinin

olgunlaşması ve ölçek ekonomileriyle bağlantılıdır. Teknoloji seçimi ve kapasite planlamasında sadece mevcut maliyet değil, maliyetlerin zaman içindeki gelişimi ve farklı senaryolardaki rekabet eşiği de dikkate alınmalıdır (Wang et al., 2024; Zun and McLellan, 2023). Özellikle kapasite faktörü, yatırım ölçeği ve işletme profili gibi değişkenler, maliyet projeksiyonlarının gerçekçi biçimde yorumlanmasında etkin rol oynamaktadır.

Bu bölümde sunulan teorik çerçeve, YE destekli hidrojen üretiminde teknoloji seçimi, işletme dinamikleri ve maliyet yollarının birbirinden bağımsız değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Elektrolizör performansı, kapasite faktörü ve öğrenme oranları gibi teknik unsurlar yatırım ihtiyaçları ve LCOH projeksiyonları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu teknik ve ekonomik parametreler, üretim tesislerinin konumlandırıldığı coğrafi koşullar ve yenilenebilir kaynak profilleri doğrultusunda değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, hidrojen üretim sistemlerinin gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi sadece teknoloji ve maliyet analizleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda mekânsal planlama ve yer seçimi kararlarını da içermektedir. Bir sonraki bölümde, bu mekânsal kararların literatür ve yöntem çerçevesinde detaylı analizi yapılmıştır.

### **2.3 Yer Seçiminin Karar Kuramındaki Yeri**

Yer seçimi problemleri, çok kriterli karar verme (ÇKKV) alanında en sık karşılaşılan uygulamalardan biridir. Ancak bu problemler, yalnızca kriterlerin karşılaştırıldığı klasik karar verme yaklaşımlarından farklı olarak, mekânsal veri katmanlarının ve coğrafi kısıtların da sürece dahil edilmesiyle daha karmaşık bir yapı kazanır. Bu nedenle yer seçimi, sadece sayısal bir sıralama problemi olarak değil; karar vericinin hedefleri ile birlikte mekânsal uygunluk, altyapı erişimi ve çevresel-sosyal sınırlayıcıların birlikte değerlendirildiği bütüncül bir mekânsal karar destek problemi olarak ele alınmaktadır (Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Yousefi et al., 2018b).

Farklı ölçek ve türdeki kriter katmanlarının ortak bir mekânsal referans sistemi altında bir araya getirilebilmesi, CBS tabanlı karar destek yaklaşımlarını yer seçimi çalışmalarında ön plana çıkarmaktadır. Bu yaklaşımlar, çok kriterli karar verme yöntemleri ile hem kuramsal hem de uygulamaya yönelik açıdan en yaygın kullanılan çerçeveyi oluşturmaktadır. Söz konusu entegrasyon, karar sürecinin yalnızca sayısal bir sıralama üretmesiyle sınırlı kalmamasını sağlamakta; aynı zamanda sonuçların mekânsal olarak izlenebilmesine ve

görselleştirilebilmesine olanak tanımaktadır (Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Shumaiza et al., 2019).

Yer seçiminin karar kuramındaki teorik temeli, genellikle farklı kriterlerin ağırlıklandırılması, normalleştirilmesi ve birleştirilmesi sürecinde ortaya çıkan çatışan yaklaşımların karşılaştırılmasına dayanmaktadır. En bilinen yöntemlerden bazıları; ağırlıklı doğrusal birleşim ve telafi edici modeller olarak kabul edilmekte. Ancak literatürde, her durumda telafi ediciliğin uygun sonuçlar vermeyebileceği ve özellikle bazı kriterlerin eşik değerlerde olduğu durumlarda Ağırlıklı Ortalama (WA) ve Sıralı Ağırlıklı Ortalama (OWA) gibi farklı birleştirme operatörlerine ihtiyaç duyulabileceği tartışılmaktadır (Cui et al., 2021; Rahman et al., 2012).

Mekânsal karar ortamında bu tartışma daha da önem kazanmaktadır. Koruma alanları, mevzuat kısıtlamaları veya taşkın/heyelan riskleri gibi bazı kriterler, telafi edilemeyen zorunlu koşullar olarak öne çıkıp karar sürecini doğrudan etkileyebilmektedir (Rahman et al., 2012; Szalaj et al., 2018). Bu durum, yer seçiminin yalnızca kriterlerin ağırlıklandırılmasıyla ilgili değil, aynı zamanda telafi seviyesinin bilinçli olarak tasarlanmasını gerektiren bir karar kuramı meselesi olduğunu ortaya koymaktadır.

### **2.3.1 Yer seçimi problemlerinde çok kriterli karar verme kuramsal çerçevesi**

Çok kriterli karar verme, farklı performans ölçütleri altında doğrudan karşılaştırılması mümkün olmayan alternatifler arasındaki tercihlerin sistematik ve tutarlı bir biçimde ortaya konulmasını amaçlayan bir karar kuramı olarak tanımlanmaktadır. Yer seçimi bağlamında bu kuramsal çerçeve, mekânsal kriterler (coğrafi konum, uzaklık, erişilebilirlik ve altyapıya yakınlık gibi) ile mekânsal olmayan kriterlerin (maliyet, çevresel etkiler ve sosyal kabul gibi) birlikte ele alınmasını gerektirmektedir (Erdin and Akbaş, 2019; Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012). Bu çerçevede problem, yalnızca alternatiflerin listelenmesiyle sınırlı kalmamakta; çok boyutlu bir performans uzayının tanımlanması ve yapılandırılması gerekliliğine dönüşmektedir.

CBS entegrasyonu bu aşamada kayda değer bir araç olarak değerlendirilmektedir. Farklı ölçek ve formatlarda üretilen veri katmanlarının ortak bir mekânsal referans çerçevesi altında birleştirilmesi, karar sürecinin yalnızca soyut bir ağırlıklandırma aşaması olarak kalmamasını sağlamakta; aynı zamanda mekânsal olarak izlenebilir ve değerlendirilebilir bir

analiz ortamına dönüşmesine olanak tanımaktadır (Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Yousefi et al., 2018b). Bu çerçevede yer seçimi, karar kuramının mekânsal düzlemde somutlaştığı ve kriterlerin coğrafi çeşitlilik içerisinde yeniden anlam kazandığı dikkate değer bir uygulama alanı oluşturmaktadır.

Literatür, yer seçimi problemlerinin ÇKKV'nin yalnızca bir uygulama alanı olmadığını, aynı zamanda karar kuramına ilişkin temel tartışmaların görünür hale geldiği bir "test ortamı" niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, kriterler arası telafi düzeyi, tercih belirsizliği, veri kalitesi ve senaryo temelli değerlendirme gibi konular, mekânsal bağlam içerisinde daha belirgin ve analiz edilebilir hale gelmektedir (Cui et al., 2021; Rahman et al., 2012). Özellikle doğrusal birleşim modellerine getirilen eleştiriler doğrultusunda gelişen ve telafi ediciliği sınırlayan non-linear veya birleştirme operatörleri, yer seçimi gibi yüksek kısıtlı problemlerde karar kuramının sınırlarını genişleten dikkate değer bir teorik tartışma alanı yaratmaktadır (Cui et al., 2021; Rahman et al., 2012). Bu durum, yer seçiminin sadece "hangi alternatif daha iyi?" sorusunu yanıtlayan teknik bir sıralama problemi olmadığını, aynı zamanda kriterlerin nasıl birleştirileceği ve telafi seviyesine ilişkin kararların nasıl verileceğiyle ilgili kuramsal bir karar tasarımı problemi olduğunu ortaya koymaktadır.

### **2.3.2 Yer seçimi problemlerinde telafi edici karar yaklaşımları**

Telafi edici modeller, bir kriterdeki düşük performansın diğer bir kriterdeki yüksek performansla dengelenebileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, ağırlıklı doğrusal birleşim (WLC) gibi klasik yöntemlerin yanı sıra, ideal çözüme yakınlık temelinde kullanılan yöntemler ve çeşitli sıralama tekniklerinde de görülmektedir. Yer seçimi bağlamında bu çerçevede, birçok kriterin birlikte değerlendirilmesi gereken durumlarda karar vericilerin tercihlerinin sayısal hale getirilmesine ve alternatiflerin ortak bir performans ölçüsüyle karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır (Erdin and Akbaş, 2019; Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Yousefi et al., 2018b).

Ancak bazı karar bağlamlarında bu esneklik sınırlayıcı bir unsur olarak ortaya çıkabilmektedir. Telafi edici olmayan yaklaşımlar, belirli kriterler için tanımlanan eşik değerlerinin sağlanmaması durumunda alternatiflerin doğrudan elenmesi gerektiği varsayımına dayanmaktadır. Yer seçimi problemlerinde, özellikle çevresel koruma alanları, mevzuata uyum gereklilikleri veya belirli risk kategorileri bu tür telafi edilemeyen zorunlu kısıtlar olarak ortaya çıkabilmektedir. Bu gibi durumlarda, eleme araçları veya telafi

düzeyini sınırlayan operatörler (örneğin OWA) devreye alınarak karar sürecinin daha kontrollü ve sistematik bir şekilde yürütülmesi sağlanmaktadır (Cui et al., 2021; Rahman et al., 2012). Bununla birlikte, tamamen telafi edici olmayan yaklaşımların kullanılması, karar sürecinde esnekliği azaltmakta ve alternatifler arasında karşılaştırma yapılmasını sınırlayabilmektedir.

Bu sınırlamalar nedeniyle, uygulama literatürü bu iki yaklaşımın çoğu zaman birlikte kullanıldığını ortaya koymaktadır. Telafi edici ve telafi edici olmayan yaklaşımların sıklıkla kombinasyon halinde uygulandığı görülmektedir. Ayrıca, ağırlıklandırma ile kısıt veya filtreleme adımlarının aynı karar akışında entegre edildiği hibrit iş akışları, özellikle çevresel sınırlamaların belirgin olduğu mekânsal problemler için yaygın biçimde tercih edilmektedir (Rahman et al., 2012). Bu yaklaşım, karar vericinin önceliklerini ve telafi edilemeyen koşulları aynı anda temsil etmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, koruma önceliklerinin ön planda olduğu mekânsal yerleşim kararlarında, telafi edici olmayan filtrelerin uygunluk yüzeyini daraltarak daha güvenli ve sağlam bir karar yapısı oluşturduğu vurgulanmaktadır (Rahman et al., 2012; Szalaj et al., 2018).

Buradaki dikkate değer bir nüans, literatürde telafi ile telafi etmeme ayrımının genellikle katı bir ikilik yerine ayarlanabilir bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmesidir. Mekânsal verinin belirsizliği, kriterlerin farklı ölçeklerde ölçülmesi ve tercih yapısının net olmaması, birçok çalışmada telafi seviyesinin kontrollü şekilde ayarlandığı hibrit modellerin kullanılmasına neden olmaktadır (Erdin and Akbaş, 2019; Nourian et al., 2024; Ozim et al., 2021). Böylece karar süreci hem esneklik hem de kısıt duyarlılığı açısından dengeli bir hale gelmektedir.

### **2.3.3 Mekânsal yer seçimi problemlerinde kriterler arası ödünleşme**

Yer seçimi problemlerinde ödünleşme, maliyet, ulaşım süresi, çevresel etkiler, sosyal kabul ve güvenlik gibi genellikle birbirleriyle çelişen kriterler arasında yapılması gereken tercihleri ifade etmektedir. Bu, aynı anda en iyi çözümün mümkün olmadığı çok boyutlu karar ortamlarının karakteristik bir özelliğidir ve karar sürecinin merkezi unsurunu teşkil etmektedir. Literatürde ödünleşme, sadece kriterler arası denge sorununu değil, aynı zamanda hangi fedakârlıkların kabul edilebilir olduğuna dair normatif bir tercih meselesi olarak da değerlendirilmektedir (Cui et al., 2021; Erdin and Akbaş, 2019; Yusop, 2025).

Mekânsal kararlar bağlamında ödünleşim ilişkileri daha karmaşık bir yapı kazanmaktadır. Ekonomik performans ile çevresel koruma arasındaki gerilim, çoğu zaman kaynaklara erişim, risk alanları ve sosyal etkiler gibi farklı hedeflerin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle literatürde birçok çalışma, farklı politika önceliklerini yansıtan senaryolar oluşturarak karar vericilerin hangi tür telafi düzeylerini kabul edilebilir bulduğunu daha açık ve sistematik bir biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır (Ozim et al., 2021; Sankarbalaji et al., 2025; Szalaj et al., 2018). Çevresel öncelik, ekonomik öncelik veya dengeli yaklaşım gibi farklı senaryo setleri, karar sonuçlarının tercih yapısına ne ölçüde duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle ekosistem temelli uygulamalarda, koruma ve üretim arasındaki ikilemi mekânsal uygunluk yüzeyleri aracılığıyla sayısallaştıran CBS ve ÇKKV yaklaşımlarının birlikte kullanımı, ödünleşim analizlerinin pratik ve uygulanabilir bir biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Szalaj et al., 2018). Bu yaklaşımlar, kararın sadece teknik bir sıralama olmadığını, aynı zamanda tercihlerin açıkça belirtilmesini gerektiren bir tasarım süreci olduğunu ortaya koymaktadır.

### **2.3.4 Yer seçimi problemlerinde deterministik ve bulanık karar yaklaşımları**

Yer seçimi çalışmalarında deterministik yaklaşımlar, kriter değerlerinin kesin olarak kabul edildiği ve ağırlıkların belirli tercihler doğrultusunda sabitlendiği ÇKKV modellerini temsil etmektedir. Bu çerçevede karar problemi, ölçülebilir ve açık biçimde tanımlanmış parametrelere dayandırılmakta; belirsizlik unsuru ise ya model dışında bırakılmakta ya da ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmektedir. CBS tabanlı mekânsal ÇKKV uygulamalarında, ağırlıklı doğrusal birleşim ile Analitik Hiyerarşi Süreci / Analitik Ağ Süreci gibi yöntemlerin deterministik biçimde kullanımı yaygınlık göstermektedir. Bu yaklaşım, veri kalitesinin yüksek olduğu ve karar verici tercihlerinin açık bir şekilde tanımlanabildiği durumlarda, karar probleminin analitik olarak sadeleştirilmesine güçlü bir katkı sağlamaktadır (Erdin and Akbaş, 2019; Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Yousefi et al., 2018b).

Bulanık yaklaşımlar, karar ortamında mevcut olan belirsizliklerin doğrudan model yapısına dahil edilmesini amaçlamaktadır. Mekânsal verinin çözünürlük sınırları, uzman değerlendirmelerinin dilsel ifadelerle temsil edilmesi ve ölçüm hataları gibi unsurlar, deterministik yaklaşımların sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Fuzzy AHP ve Fuzzy TOPSIS gibi yöntemler, “yüksek”, “orta” veya “kısmi uygunluk” gibi nitel

değerlendirmelerin matematiksel olarak ifade edilmesine olanak tanımakta ve karar sürecinin dereceli bir yapıda ele alınmasını sağlamaktadır (Cui et al., 2021; Erdin and Akbaş, 2019; Ozim et al., 2021; Yousefi et al., 2018b). Böylece uygunluk, yalnızca ikili bir sınıflandırma olmaktan çıkmakta ve belirsizliğin kontrollü şekilde temsil edildiği bir değerlendirme alanına dönüşmektedir.

Belirsizlik yönetiminin dikkate değer olduğu durumlarda, bulanık üyelik fonksiyonlarıyla mekânsal yüzeylerin entegrasyonu, karar sonuçlarının hassasiyetini artırarak tercihlerin modele nasıl yansıdığını daha iyi açıklamaya olanak tanımaktadır (Kehagias et al., 2021; Mohammadi and Saedi, 2024; Shumaiza et al., 2019). Özellikle enerji altyapısı gibi büyük ölçekli yatırımlar söz konusu olduğunda, kriterler arasındaki etkileşimlerin doğrusal olmayan şekillerde modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çerçevede, Choquet fuzzy integral gibi gelişmiş birleştirme yöntemlerinin grid-CBS ile entegre edilmesi ve mekânsal heterojenliği daha gerçekçi biçimde yansıtması gösterilmektedir (Cui et al., 2021; Ozim et al., 2021). Bu bağlamda, deterministik ve bulanık yaklaşımlar arasındaki fark sadece teknik bir seçim değil; karar ortamındaki belirsizliğin nasıl temsil edileceğine dair kuramsal bir duruşu göstermektedir.

### **2.3.5 Mekânsal karar karmaşıklığı ve CBS tabanlı ÇKKV**

Yer seçimi problemlerinin temel özelliği, karar alanının doğrudan mekânsal olarak tanımlanması ve kriterlerin büyük ölçüde coğrafi değişkenlik göstermesidir. Bu durum, alternatiflerin soyut kavramsal düzlemde çıkararak mekânsal yüzeyler üzerinde tanımlanan uygunluk değerlerine dönüşmesine yol açmaktadır. Erişilebilirlik, çevresel kısıtlar, risk bölgeleri ve kaynak dağılımı gibi unsurların eş zamanlı ve farklı ölçeklerde değerlendirilmesi gerekliliği, karar problemini çok katmanlı ve yüksek boyutlu bir yapıya dönüştürmektedir (Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Szalaj et al., 2018).

Bu karmaşıklığın yönetiminde CBS tabanlı mekânsal ÇKKV yaklaşımları dikkate değer bir rol üstlenmektedir. Farklı kriter katmanlarının ortak bir koordinat sistemi altında standartlaştırılması ve üst üste bindirilmesi işlemleri, karar alma sürecinin hem görselleştirilebilir hem de izlenebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Bu sayede “hangi alanın neden daha uygun olduğu” sorusu yalnızca sayısal bir skor ile değil, aynı zamanda mekânsal olarak temsil edilen uygunluk yüzeyleri aracılığıyla açıklanabilir hale gelmektedir (Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012).

Uygulama literatürü, bu bütünleşik yaklaşımın çeşitli sektörlerde karmaşık karar sorunlarını çözmek için etkin biçimde kullanıldığını göstermektedir. Çevresel planlama örneklerinde, kriter katmanlarının birleştirilmesiyle oluşturulan uygunluk haritalarının karar süreçlerini daha şeffaf hale getirdiği; ekosistem odaklı uygulamalarda ise farklı hedef senaryolarının mekânsal sonuçlarının net şekilde karşılaştırılabildiği görülmüştür (Rahman et al., 2012; Szalaj et al., 2018). Enerji üretimi açısından rüzgâr çiftliği yerleşim analizleri, grid tabanlı CBS yaklaşımları ve bulanık ölçütlerin entegre kullanımıyla mekânsal heterojenliğin daha gerçekçi şekilde temsil edilebildiğini ortaya koymaktadır (Cui et al., 2021). Bu bağlamda mekânsal karar karmaşıklığı sadece veri yoğunluğuyla değil, aynı zamanda kriterlerin coğrafi etkileşimi ve ölçek farklarının kararlar üzerindeki etkisiyle ilgilidir. CBS tabanlı ÇKKV çerçevesi, bu etkileşimleri ortaya koyarak karar sürecini hem analitik hem de mekânsal açıdan bütünleştirir.

### **2.3.6 Yer seçimi literatüründe CBS–ÇKKV entegrasyonu**

Yer seçimi literatüründe CBS ile ÇKKV entegrasyonu, çoğu çalışmada temel metodolojik çerçeveyi sağlamaktadır. AHP, TOPSIS, PROMETHEE ve ELECTRE gibi yöntemler mekânsal yüzeylerde kullanılır ve alternatiflerin uygunluk seviyeleri veya öncelik sıraları belirlenmektedir. Bu yöntemlerin bulanık versiyonları ise özellikle belirsiz veriler, uzman değerlendirmeleri ve dilsel tercihler gibi unsurların karar modeline entegre edilmesine olanak tanımaktadır (Erdin and Akbaş, 2019; Ozim et al., 2021; Rahman et al., 2012; Shumaiza et al., 2019).

Ancak, literatür yöntem seçimlerinin sadece teknik tercihten ibaret olmadığını göstermektedir. Kriter yapısı, veri kalitesi, telafi seviyesi, karar verici profili ve şeffaflık ihtiyacı gibi faktörler, hangi ÇKKV yaklaşımının daha uygun olacağı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Örneğin, hiyerarşik kriter yapısının hâkim olduğu uygulamalarda AHP tabanlı yaklaşımlar öne çıkarken; alternatifler arasındaki göreceli üstünlüklerin analiz edilmesi gereken durumlarda üstünlük ilişkisine dayalı yöntemler tercih edilebilmektedir. Etkili çevresel veya kamusal fayda parametrelerinin bulunduğu durumlarda ise, telafi edici olmayan filtrelerin modele entegre edilmesi karar güvenliğini artırmaktadır (Rahman et al., 2012).

Son yıllarda dikkat çeken bir diğer eğilim ise paydaş katılımını merkeze alan katılımcı ÇKKV yaklaşımlarının yaygınlaşmasıdır. Yer seçiminde kriterlerin kime ait öncelikleri

yansıttığı sorusu, karar sürecinin sadece teknik değil, aynı zamanda sosyal bir boyuta sahip olduğunu göstermektedir. Katılımcı modeller, uzman görüşleriyle yerel paydaş beklentilerini bütünleştirerek, kararın toplumsal kabulünü ve meşruiyetini güçlendirmeyi hedeflemektedir (Nourian et al., 2024; Yusop, 2025). Bu bağlamda yöntem seçimi, sadece “hangi algoritma?” sorusuna yanıt olmakla kalmayıp; aynı zamanda karar probleminin yapısı, belirsizlik seviyesi ve paydaş katılım ihtiyacına göre tasarlanan bütünsel bir modelleme yaklaşımını ifade etmektedir.

### **2.3.7 Yer seçimi çalışmalarında metodolojik güvenilirlik ve belirsizlik yönetimi**

Yer seçimi literatüründe öne çıkan temel tartışmalardan biri, telafi edici ve telafi edici olmayan yaklaşımlar arasındaki sınırların uygulama bağlamına bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Aynı ÇKKV yöntemi, belirli bir bağlamda dengeli ve tutarlı sonuçlar üretebilmekteyken, farklı bir bağlamda etkili kısıtları yeterince yansıtmayan bir telafi mekanizmasına dönüşebilmektedir. Bu da yöntemlerin evrenselliğinden çok, problem bağlamına olan duyarlılığını vurgulamaktadır.

Belirsizlik seviyesinin yüksek olduğu durumlarda, bulanık yaklaşımların belirsizlikleri daha iyi temsil ettiği savunulurken, diğer bir görüş çizgisi ise ağırlıkların kim tarafından ve hangi müzakere süreciyle belirlendiğinin yeni bir belirsizlik kaynağı olabileceğini öne sürmektedir (Mohammadi and Saedi, 2024; Nourian et al., 2024; Rahman et al., 2012). Dolayısıyla belirsizlik yalnızca veri kaynaklı olmayıp, aynı zamanda tercih oluşturma sürecinin kendisine de içkin bir nitelik taşımaktadır. Mekânsal karar ortamında güvenilirlik sorunu, yalnızca kullanılan yöntemle sınırlı kalmamakta; veri çözünürlüğü, katmanlar arası uyum, mekânsal doğruluk ve eksik veri gibi teknik unsurlar da nihai uygunluk haritalarının sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden birçok çalışma, model sonuçlarının duyarlılık analizleri ve senaryo karşılaştırmalarıyla desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Ozim et al., 2021; Yusop, 2025).

Grid tabanlı CBS modelleriyle bulanık ölçütlerin birlikte kullanılması, mekânsal heterojenliği daha ayrıntılı şekilde gösterse de, bu durum hesaplamaları zorlaştırmakta ve ölçek/ızgara seçiminin sonuçlar üzerinde dikkate değer derecede etkili olmasına neden olmaktadır (Cui et al., 2021; Ozim et al., 2021). Bu nedenle, yöntem seçimi yalnızca literatürde yaygın olan tekniklere dayanmakla kalmayıp, aynı zamanda problemin kısıtları, veri yapısı, ölçek seçimi ve karar sürecinin şeffaflık gereksinimleri dikkate alınarak

temellendirilmelidir. Bu bağlamda, yer seçimi çalışmalarında metodolojik güvenilirlik, yöntem çeşitliliğinden çok, tercih yapısının açıklığı, belirsizlik yönetimi ve sonuçların duyarlılık analizleriyle test edilmesi üzerinden değerlendirilmektedir.

## **2.4 CBS Tabanlı ÇKKV İçin Teorik Çerçeve**

CBS tabanlı çok kriterli karar analizi (CBS-ÇKKV), mekânsal katmanlar aracılığıyla tanımlanan teknik, çevresel ve ekonomik kriterleri tek bir değerlendirme platformu altında birleştirerek yer seçimi sürecini sistematik ve izlenebilir bir yapıya kavuşturan bir karar destek yaklaşımıdır. Yenilenebilir enerji ve hidrojen altyapısı gibi mekâna duyarlı yatırımlar bağlamında bu yöntem; verinin mekânsal olarak temsil edilmesini, kriterlerin standartlaştırılmasını ve karar sürecinin şeffaf bir biçimde yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006; Saleh and Setyowati, 2020). Temel varsayım, farklı kriter katmanlarının ortak bir ölçekte uygunluk yüzeylerine dönüştürülmesi ve bu yüzeylerin ağırlıklandırılmış birleştirme yaklaşımı ile tek bir karar yüzeyi altında bütünleştirilmesine dayanmaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006).

Enerji yerleşiminde kaynak potansiyeli, şebeke erişimi, arazi uygunluğu ve çevresel kısıtlar birlikte dikkate alınırken, hidrojen tesislerinde su kaynağı, talep merkezleri, lojistik ve güvenlik/izolasyon gibi unsurlar karar yapısını daha karmaşık hale getirmektedir (Saleh and Setyowati, 2020; Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025; Tarife et al., 2017; Yousefi et al., 2018a). Bu yüzden CBS-ÇKKV literatürde, yalnızca “uygun alanı bulma” değil, karar problemini bütünüyle kuran bir mekânsal karar destek çerçevesi olarak konumlanmaktadır (Saleh and Setyowati, 2020; Yousefi et al., 2018a).

### **2.4.1 CBS-ÇKKV’de raster tabanlı uygunluk analizi**

CBS-ÇKKV’nin temel amacı, çeşitli kriterleri tek bir mekânsal uygunluk yüzeyinde birleştirmektir. Raster tabanlı çok kriterli değerlendirme (MCE) bu dönüşümde en sık kullanılan yaklaşımlardan birini oluşturmaktadır. Bu yöntemde, her kriter öncelikle raster katman olarak gösterilerek, ardından ortak bir ölçekte standardize edilerek ağırlıklandırılmış birleştirme ile nihai uygunluk haritasına dönüştürülmektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006). Enerji tesislerinin yer seçimine yönelik çalışmalarda bu yöntem, yalnızca tekil kriterler açısından en uygun noktaların belirlenmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda birden fazla kriterin eş zamanlı olarak en uygun biçimde karşılandığı

mekânsal bölgelerin tespit edilmesinde özellikle etkili bir araç olarak kullanılmaktadır (Saleh and Setyowati, 2020; Yousefi et al., 2018a).

Ancak bu karar yüzeyinin oluşturulması sadece teknik bir haritalama adımı değildir; aynı zamanda kriterler arasındaki çelişkiyi nasıl yöneteceğimizi belirleyen net bir karar mantığını da gerektirmektedir. Bu nedenle birçok çalışma, kriter ağırlıklarını belirlemek için AHP gibi karar destek yöntemlerini CBS ile entegre ederek hem “hangi kriter daha öncelikli?” sorusunun cevabını bulmaya çalışmakta hem de modelin şeffaflığını artırmaktadır (Bailey et al., 2003; Saleh and Setyowati, 2020; Shrestha et al., 2022). Özellikle enerji altyapısının yer seçiminde, karar vericilerin tercihleri ile çevresel kısıtların aynı modelde gösterilebilmesi, uygunluk haritalarının kabul edilebilirliğini doğrudan etkiler (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006).

#### **2.4.2 Mekânsal veri kuramı: raster–vektör yaklaşımı ve karar modellemesi**

CBS-ÇKKV'da kullanılan veri temsil biçimi, karar modelinin temel özelliklerinden biridir ve raster ya da vektör formatında olabilir. Raster yaklaşım, hücre temelli yapısı sayesinde komşuluk ilişkileri, yüzey işlemleri ve sürekli değişkenlerin (örneğin, eğim, yükseklik, ışıma) mekânsal analizlerinde büyük avantaj sağlar. Bu nedenle, çok kriterli uygunluk modellemesinde raster katmanlar, kriterlerin aynı çözünürlükte işlenmesine ve hücre temelli hesaplama yöntemiyle mekânsal karar yüzeyinin oluşturulmasına kolaylık tanır (Cromley and Huffman, 2006; Li, 2014; Li et al., 2003). Buna karşılık, vektör veri yapıları, özellikle hat ve poligon geometrilerinin (örneğin, yollar, koruma alanları, idari sınırlar) temsili ile ağ veya erişim analizleri gibi uygulamalarda daha etkilidir. Bu nedenle, birçok enerji yer seçimi çalışması pratikte raster–vektör hibrit veri yapısına dayanır (Cromley and Huffman, 2006; Delamater et al., 2012).

Mekânsal karar modellemede “durum faktörleri” (ör. altyapıya erişim, kaynak yoğunluğu veya belirli hedeflere uzaklık) dikkate değer bir rol oynar. Bu faktörlerin raster formatında hesaplanması karar yüzeyini doğrudan etkiler; çünkü uygunluk genellikle mutlak değerlerden çok mekânsal ilişkiler aracılığıyla tanımlanır. Bu nedenle, CBS-ÇKKV'nin temelinde, bu ilişkilerin nasıl üretildiği, hangi çözünürlükte işlendiği ve hangi standardizasyon yöntemiyle modele aktarıldığı belirleyici olur (Cromley and Huffman, 2006; Delamater et al., 2012). Raster yaklaşımının avantajı, bu ilişkileri standart bir yüzeye dönüştürebilmesi olsa da, ölçek etkileri ve veri belirsizlikleri bazen daha belirgin hale

gelebilir. Farklı çözünürlüklerdeki yeniden örnekleme, sınıflandırma eşikleri ve veri kalitesi, aynı yöntemin farklı sonuçlar üretmesine neden olabilir. Bu nedenle, literatürde raster tabanlı ÇKKV uygulamalarının belirsizlik ve duyarlılık analizleriyle birlikte yapılması özellikle dikkate değerdir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006; Delamater et al., 2012).

#### **2.4.3 Raster tabanlı uygunluk katmanları ve ölçeklendirme**

Raster tabanlı uygunluk modellemesi, her bir kriter için ayrı raster katmanların oluşturulmasıyla başlamaktadır. Enerji projeleri bağlamında bu katmanlar genellikle kaynak potansiyeli (güneş ışınımı veya rüzgâr), topoğrafik özellikler (eğim ve yükselti), arazi kullanımı, çevresel kısıtlar ve altyapıya erişim gibi unsurları kapsamaktadır. Oluşturulan her bir katman, daha sonra ortak bir uygunluk ölçeğine dönüştürülmekte ve ağırlıklandırılmış birleştirme yöntemiyle entegre edilerek tek bir uygunluk haritası elde edilmektedir (Bailey et al., 2003; Saleh and Setyowati, 2020; Yousefi et al., 2018a). Bu aşamada, karar destek yöntemleri arasında AHP gibi yöntemler sıkça kullanılarak kriter ağırlıkları belirlenmekte, böylece karar vericinin öncelikleri açıkça modele entegre edilmektedir (Bailey et al., 2003; Shrestha et al., 2022).

Raster standardizasyonu yalnızca verilerin mekânsal olarak ifade edilmesiyle sınırlı bir işlem olmamakta, aynı zamanda karar probleminin kavramsal çerçevesinin yeniden yapılandırılmasını da içermektedir. Nitekim aynı eğim değeri, bazı teknolojiler açısından etkili bir sınırlayıcı unsur olarak değerlendirilirken, diğer teknolojiler için daha düşük öneme sahip ikincil bir parametre olarak ele alınabilmektedir. Benzer biçimde, altyapıya olan uzaklık da hem yatırım maliyetleri hem de uygulama fizibilitesi üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle raster katmanlarının standardizasyonu, literatürde önerilen eşik değerler veya uygulamaya özgü geliştirilen varsayımlar temelinde belirlenmektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006).

#### **2.4.4 Raster overlay analizi ve uygunluk yüzeyinin oluşturulması**

Görüntüleme aşaması, CBS-ÇKKV yaklaşımının temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu aşamada, farklı kriterleri temsil eden raster katmanlar, ağırlıklı toplam veya çarpım gibi yöntemler aracılığıyla bir araya getirilerek tek bir uygunluk yüzeyi elde edilmektedir. Kullanılacak birleştirme yönteminin seçimi, kriterler arasındaki ilişkinin nasıl tanımlandığına ve karar modelinde hangi varsayımların benimsendiğine bağlı olarak değişmektedir. Bazı durumlarda kriterler arasında telafi edilebilirlik varsayımına dayanan

toplamsal yaklaşımlar tercih edilmekte, bazı durumlarda ise etkili eşiklerin korunmasını sağlayan çarpımsal ya da eşik temelli yöntemler daha uygun sonuçlar vermektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006). Bu bağlamda overlay süreci, yalnızca teknik bir CBS işlemi olarak değil, aynı zamanda karar kuramında yer alan telafi edilebilirlik ve kısıtların temsiline ilişkin tartışmaların mekânsal düzleme aktarıldığı bir aşama olarak değerlendirilmektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006).

Overlay sürecinde ağırlıklandırma, kriterler arasındaki potansiyel çatışmaların yönetilmesinde temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. Enerji yatırımlarında çoğu zaman çevresel kısıtlar ile ekonomik erişilebilirlik ya da kaynak potansiyeli ile altyapı yakınlığı gibi faktörler arasında bir denge kurulması gerekmektedir. AHP gibi yöntemlerle belirlenen ağırlıklar, kriterlerin göreceli önem düzeylerini ortaya koymakta ve karar verici tercihlerin modele sistematik biçimde entegre edilmesine olanak sağlamaktadır (Bailey et al., 2003; Saleh and Setyowati, 2020; Shrestha et al., 2022). Bu yaklaşım, özellikle yenilenebilir enerji tesislerinin yer seçimine yönelik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmakta ve karar sürecinin şeffaf ve izlenebilir biçimde yapılandırılmasına katkı sağlamaktadır (Shrestha et al., 2022; Yousefi et al., 2018a).

#### **2.4.5 Mekânsal heterojenlik ve bölgesel varyasyonların karar sonuçlarına etkisi**

Mekânsal heterojenlik, bir coğrafi alanda yer alan kriterlerin ve kısıtların homojen olmayan bir dağılım sergilemesini ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji potansiyelleri, özellikle güneş, rüzgâr ve hidro kaynaklar bakımından, bölgesel ölçekte belirgin farklılıklar göstermekte; buna ek olarak arazi kullanımı, çevresel koruma statüleri ve altyapı yoğunluğu gibi unsurlar da mekânsal açıdan değişken bir yapı sergilemektedir. Bu durum, karar probleminin tek tip bir mekânsal yapı üzerinden ele alınmasını zorlaştırmakta ve analiz sürecinde mekânsal farklılıkların dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, CBS-ÇKKV yaklaşımıyla oluşturulan karar yüzeyi, heterojen bir coğrafi ortamda farklı kriterlerin eş zamanlı olarak sağlandığı alanları belirlemeye olanak tanımakta ve bu alanları uygunluk haritaları aracılığıyla sistematik biçimde ortaya koymaktadır (Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025; Tarife et al., 2017; Yousefi et al., 2018a).

Heterojenliğin doğru temsil edilmesi, veri katmanlarının çözünürlüğü ve standardizasyonu ile yakından ilişkisi bilinmektedir. Farklı çözünürlüklerde yapılan analizler, aynı yöntemin farklı mekânsal sonuçlar doğurmasına yol açabilir; bu yüzden ölçek etkisi, CBS tabanlı çok

kriterli analizlerde dikkate değer bir metodolojik konu olarak tartışılmaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006). Literatürde bazı çalışmalar, mekânsal karar modellerinin zamansal değişimi de kapsayacak şekilde genişletilmesi gerektiğine dikkat çekmektedir. Özellikle enerji sistemleri planlamasında, kaynak potansiyelinin ve talep yapısının zamanla değişmesi, statik uygunluk haritalarının dinamik modellerle desteklenmesi gerektiğine işaret etmektedir (Bhattacharya et al., 2019).

#### **2.4.6 Mekânsal modellemede belirsizlik: kaynaklar, duyarlılık ve çoklu senaryo**

CBS-ÇKKV modellerinde belirsizlik; ölçüm hataları, veri eksikliği, kriter seçimi sınırları, öznellik ve ölçek kararlarından kaynaklanmaktadır. Özellikle çok katmanlı mekânsal modellerde bu belirsizlikler, sonuçların güvenilirliğini belirgin şekilde etkilemektedir. Bu yüzden, literatürde bulanık yaklaşımlar, olasılıksal modeller ve farklı senaryolarla yapılan duyarlılık analizleri, kararların dayanıklılığını artırmada dikkate değer rol oynamaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006). Duyarlılık analizi, hangi kriter veya ağırlık varsayımının nihai karar haritasını en çok etkilediğini göstererek modelin güvenilirliğini güçlendirmektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006).

Enerji ve hidrojen tesis yerleşimi çalışmalarında belirsizlikler, sadece teknik veri katmanlarından kaynaklanmamaktadır. Sosyal kabul, çevresel etki verileri ve altyapı planlarının zaman içinde değişebilme olasılığı gibi unsurlar da karar verme sürecini etkilemektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji ve hidrojen altyapısının planlanmasında CBS-ÇKKV uygulamalarında belirsizlik yönetimi, kararların dikkate değer bir parçası olarak görülmektedir (Saleh and Setyowati, 2020; Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025; Tarife et al., 2017).

#### **2.4.7 Enerji Sistemleri yer seçiminde CBS-ÇKKV yaklaşımının kullanımı**

Bu tez çalışmasında ilk olarak güneş veya rüzgâr gibi enerji kaynaklarının potansiyeli, topoğrafya, arazi kullanımı ve altyapıya erişim gibi mekânsal katmanlar oluşturulmakta; ardından AHP gibi tekniklerle kriterlerin ağırlıkları belirlenerek overlay işlemiyle en uygun lokasyonlar saptanmaktadır. Birçok güneş enerji tesisi yerleşim çalışması, bu yöntemi kullanarak teknik, çevresel ve altyapısal kriterleri tek bir karar yüzeyinde bütünleştirmektedir (Shrestha et al., 2022; Yousefi et al., 2018a). Rüzgâr enerjisi planlamasında, kaynak potansiyeli, çevresel kısıtlar ve şebeke erişimi gibi faktörlerin birlikte

dikkate alındığı CBS-ÇKKV uygulamaları, yöntemin yaygınlığını ortaya koymaktadır (Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025).

Hidroelektrik ve mini-hidro planlamasında, mekânsal veri kaynaklarından örneğin sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı ve iklim verileri kullanılarak hidrolik potansiyel haritaları oluşturulmakta ve bu yüzeyler çok kriterli karar yaklaşımıyla uygunluk haritalarına çevrilmektedir (Li, 2014; Tarife et al., 2017). Enerji depolama ve altyapı planlaması alanında, mekânsal uygunluk analizleriyle erişilebilirlik ve maliyet senaryolarını bir arada değerlendiren modeller geliştirilmiştir (Delamater et al. 2012). Benzer şekilde, hidrojen üretim tesislerinin yer seçiminde CBS-ÇKKV yaklaşımı, su kaynakları, enerji altyapısı ve lojistik erişilebilirlik gibi faktörleri dikkate alarak enerji dönüşüm altyapısının planlanmasına yardımcı olmaktadır (Saleh and Setyowati, 2020; Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025).

#### **2.4.8 CBS-ÇKKV analiz süreci ve karar destek yapısı**

CBS-ÇKKV uygulamalarında izlenen iş akışı, genellikle birbirini izleyen temel aşamalardan oluşmaktadır. Süreç, ilk olarak verilerin toplanması ve uygun biçimde ön işleme tabi tutulmasıyla başlamaktadır. Bu aşamayı, analizde kullanılacak kriterlerin belirlenmesi izlemekte; söz konusu kriterleri temsil eden mekânsal katmanlar ortak bir ölçekte standardize edilmekte ve ardından kriter ağırlıkları tanımlanmaktadır. Devamında, bu katmanlar overlay işlemi aracılığıyla birleştirilerek bütünlük bir uygunluk yüzeyi elde edilmektedir. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar, duyarlılık ve belirsizlik analizleri ile test edilerek modelin güvenilirliği değerlendirilmektedir (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006; Li, 2014; Tarife et al., 2017).

Bu yapılandırılmış yaklaşım, mekânsal karar problemlerinin daha sistematik, şeffaf ve izlenebilir bir biçimde analiz edilmesine imkân sağlamaktadır. Enerji ve hidrojen üretim tesislerinin yer seçimi söz konusu olduğunda, bu aşamaların her biri ayrı ayrı ve daha dikkatli bir biçimde ele alınması gereken bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kullanılan veri kaynaklarının doğruluğu ve güvenilirliği, analiz çözünürlüğünün yeterliliği ve seçilen kriterlerin yerel koşullarla ne derece uyumlu olduğu, elde edilen karar sonuçları üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Bu nedenle süreç boyunca yapılan her tercih, nihai uygunluk değerlendirmesinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini etkileyen etkili bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Saleh and Setyowati, 2020; Shrestha et al., 2022). Ayrıca

literatürde, uygunluk haritalarının karar desteği aracı olarak kullanılabilmesi için yüksek uygunluk gösteren bölgelerin saha gözlemleri veya paydaş görüşleriyle doğrulanmasının dikkate değer olduğu sıkça vurgulanmaktadır (Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025; Tarife et al., 2017).

#### **2.4.9 CBS-ÇKKV yaklaşımının metodolojik değerlendirmesi**

CBS-ÇKKV yaklaşımının en güçlü yönlerinden biri, çok sayıda kriteri aynı karar çerçevesinde şeffaf biçimde entegre edebilmesidir. Ancak, ölçek etkileri, veri kalitesi ve kriter ağırlıklandırmasındaki öznellik, sonuçların duyarlılığını artırabilecek temel sınırlılıklar olarak görülmektedir. Bu nedenle, literatürde katman uyumu, çözünürlük seçimi ve belirsizlik yönetimi, yöntemin güvenilirliğini doğrudan etkileyen dikkate değer metodolojik konular olarak öne çıkmaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006; Delamater et al., 2012). Geleceğe yönelik çalışmalar, CBS-ÇKKV modellerinin daha dinamik veri yapılarıyla entegrasyonuna odaklanmaktadır. Özellikle, mekânsal ve zamansal değişimi birlikte dikkate alan modelleme yaklaşımlarının, enerji sistemleri planlamasında heterojenliği daha gerçekçi bir şekilde yansıtılabileceği üzerinde durulmaktadır (Bhattacharya et al., 2019; Delamater et al., 2012; Li, 2014).

Bu bölümde sunulan kuramsal çerçeve, yenilenebilir enerji ve hidrojen tesis yer seçiminin yalnızca kriterlerin listelenmesinden ibaret olmadığını; ayrıca kriterlerin mekânsal temsili, raster tabanlı uygunluk yüzeylerinin oluşturulması, overlay metoduyla karar yüzeyinin tasarımı ve belirsizlik ile ölçek etkilerinin yönetilmesine de odaklandığını ortaya koymaktadır (Bailey et al., 2003; Cromley and Huffman, 2006; Delamater et al., 2012).

#### **2.5 Çok Kriterli Karar Vermede Kriter Ağırlıklandırma Yaklaşımları**

Çok kriterli karar verme problemlerinde en dikkate değer aşamalardan biri, kriterlerin göreceli önemlerinin nasıl belirleneceğidir. Çünkü aynı alternatif seti, sadece kullanılan ağırlıklar değiştiğinde farklı sıralamalar gösterebilir. Bu yüzden ağırlıklandırma süreci, yalnızca teknik bir hesaplama değil, aynı zamanda karar modelinin epistemik temelini oluşturan dikkate değer bir unsurdur (Chen and Huang, 2022; Dominic et al., 2011).

Literatürde, kriter ağırlıklandırma yaklaşımları genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır. Birinci grup, kriter ağırlıklarını doğrudan veri setinin özelliklerinden türeten objektif yöntemleri; ikinci grup ise karar vericilerin deneyim ve değerlendirmelerine dayanan öznel

yöntemleri içermektedir. Ayrıca, mühendislik tasarımı, enerji planlaması ve mekânsal karar problemleri gibi karmaşık karar ortamlarında, tek bir yaklaşımın tüm boyutları yeterince temsil edemediği görülmektedir. Bu nedenle, günümüzde hem objektif hem de öznel bilgiyi bir arada kullanan hibrit ağırlıklandırma yaklaşımları literatürde giderek daha fazla benimsenmektedir (Ilangkumaran et al., 2013; Kınay and Tezel, 2021; Sitorus et al., 2019). Bu bölümde Shannon entropisine dayanan objektif ağırlıklandırma yöntemi, AHP ve FAHP gibi öznel yaklaşımlarla teorik olarak incelenmekte ve entropi–AHP hibrit yönteminin karar kuramındaki rolü değerlendirilmektedir (Chen and Huang, 2022; Loron et al., 2015).

### **2.5.1 Shannon entropisi ile objektif ağırlıklandırma**

Entropi tabanlı ağırlıklandırma yöntemi, bir kriterin karar problemine yaptığı bilgi katkısını, veri dağılımını göz önünde bulundurarak ölçmeyi amaçlamaktadır. Shannon entropisi yaklaşımında, varsayım, yüksek varyans gösteren kriterlerin daha fazla bilgi içerdiği ve bu nedenle daha yüksek ağırlık alması gerektiği bilinmektedir. Aksi durumda, kriter değerlerinin alternatifler arasında birbirine yakın olması, söz konusu kriterin ayırt edicilik kapasitesini azaltmakta ve karar sürecindeki belirsizliği artırmaktadır (Findawati et al., 2018; Sitorus et al., 2019). Yöntemin temel avantajı, kriter ağırlıklarının karar verici yargılarından bağımsız biçimde, doğrudan veri setinin içsel yapısından türetilmesidir. Bu durum, yöntemin daha yüksek tekrarlanabilirlik ve nesnellik sağlamasına imkân tanımaktadır. Bu nedenle entropi tabanlı ağırlıklandırma yöntemleri, özellikle veri yoğun karar problemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Kınay and Tezel, 2021; Loron et al., 2015).

Bununla birlikte, entropi yaklaşımının bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Yöntem yalnızca veri dağılımını dikkate almakta; stratejik öncelikler, politika hedefleri ve toplumsal kabul gibi normatif unsurları doğrudan yansıtmamaktadır. Bu bağlamda, bir kriter veri seti içerisinde düşük varyans gösterse dahi, kararın uygulanabilirliği açısından etkili bir öneme sahip olabilmektedir (Loron et al., 2015; Sitorus et al., 2019).

### **2.5.2 AHP ve FAHP ile öznel ağırlıklandırma**

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), çok kriterli karar verme problemlerinde en yaygın kullanılan öznel ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. AHP, kriterleri hiyerarşik bir yapıya yerleştirerek, karar vericinin ikili karşılaştırmalar yaparak kriterlerin görece önemlerini belirlemesine dayanmaktadır. Temel özelliği, öznel değerlendirmeleri sistematik bir karşılaştırma matrisi kullanarak nicel ağırlıklara çevirmesi ve tutarlılık oranı

(CR) ile bu değerlendirmelerin tutarlılığını kontrol etmesi ile ifade edilmektedir (Chen and Huang, 2022; Dominic et al., 2011; Fathi et al., 2013).

AHP'nin başlıca avantajlarından biri, karar vericilerin deneyim ve bağlamsal önceliklerini doğrudan karar modeline entegre edebilmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu yöntemin temel sınırlılığı, elde edilen ağırlıkların karar vericinin bakış açısına göre değişebilmesidir. Özellikle çok paydaşlı karar problemlerinde, farklı uzman grupları farklı ağırlık setleri oluşturabilmektedir (Chen and Huang, 2022; Fathi et al., 2013).

Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (FAHP), AHP yönteminin bulanık mantıkla genişletilmiş bir versiyonu olarak bilinmektedir. FAHP yaklaşımları, karar verme süreçlerinde ortaya çıkan belirsizlikleri bulanık sayılar kullanarak modele entegre etmektedir. Özellikle “biraz daha dikkate değer” veya “çok daha dikkate değer” gibi dilsel ifadelerin kullanıldığı durumlarda, FAHP karar vericilerin sezgisel değerlendirmelerini daha gerçekçi bir şekilde yansıtabilmektedir (Kınay and Tezel, 2021; Liu et al., 2023b; Tripathi et al., 2021). Ancak, FAHP yöntemi AHP'ye göre hesaplama açısından daha karmaşık olmakla birlikte farklı bulanık sayı tanımlarının sonuçlara etkisi metodolojik bazı zorluklar ortaya çıkarabilmektedir.

### **2.5.3 Hibrit kriter ağırlıklandırma yaklaşımları**

Hibrit ağırlıklandırma yaklaşımları, objektif ve öznel yöntemlerin avantajlarını birleştirerek daha dengeli bir kriter ağırlık seti oluşturmayı hedeflemektedir. Entropi tabanlı yöntemler kriterlerin veri içindeki ayırt ediciliğini gösterirken, AHP veya FAHP gibi yöntemler uzmanların görüşlerini ve bağlamsal önceliklerini karar sürecine entegre etmektedir. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, karar modelinin hem veri temelli hem de değer temelli boyutlarını yansıtmayı sağlamaktadır (Chen and Huang, 2022; Ilangkumaran et al., 2013; Sitorus et al., 2019). Literatürde, entropi–AHP veya entropi–FAHP birleşimiyle geliştirilmiş hibrit modeller, özellikle mühendislik tasarımı, enerji planlaması ve yer seçimi gibi problemlerde sıkça kullanılmaktadır. Bu modeller, kriterlerin veri temelli ayırt edicilik düzeyi ile uzman görüşlerini bütünleştirerek, daha dengeli, tutarlı ve yorumlanabilir kararların elde edilmesine imkân tanımaktadır (Findawati et al., 2018; Sitorus et al., 2019).

#### **2.5.4 Kriter ağırlıklandırma veri ve uzman bilgisinin rolü**

Objektif ağırlıklandırma yöntemleri, kriter önemlerinin doğrudan veri setinin yapısından türetilmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşımda “bilgi”, veri dağılımının içerdiği nicel ayırım gücü olarak tanımlanmakta ve kriterlerin göreceli önemi alternatifler arasındaki varyasyon üzerinden belirlenmektedir (Kınay and Tezel, 2021; Sitorus et al., 2019). Bu sayede karar modeli yüksek derecede tekrarlanabilir ve veri temelli bir yapıya sahip olmaktadır. Ancak bu yaklaşım, stratejik öncelikler veya bağlamsal değerlendirmeler gibi normatif unsurları sınırlı ölçüde temsil edebilmektedir.

Öznel ağırlıklandırma yöntemleri ise uzman deneyimini ve bağlamsal öncelikleri doğrudan modele dahil etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemler özellikle karmaşık karar problemlerinde uygulanabilirliği artıran dikkate değer bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, ağırlıkların karar vericilerin perspektifine bağlı olması, bazı durumlarda tutarlılık ve karşılaştırılabilirlik açısından sınırlılıklar yaratabilmektedir (Chen and Huang, 2022; Dominic et al., 2011).

Hibrit ağırlıklandırma yaklaşımları ise veri temelli bilgi ile uzman değerlendirmelerini aynı model içinde bir araya getirerek daha dengeli bir ağırlık seti üretmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşımda amaç, karar probleminin hem teknik hem de normatif boyutlarını birlikte temsil edebilen bir değerlendirme çerçevesi oluşturmaktır. Bu nedenle hibrit modellerin başarısı, yalnızca farklı yöntemlerin birlikte kullanılmasına değil, aynı zamanda karar problemine anlamlı ve tutarlı bir bilgi sentezinin oluşturulmasına bağlıdır (Ilangkumaran et al., 2013; Sitorus et al., 2019).

#### **2.6 Sıralama Temelli ÇKKV Yöntemleri: MOORA, TOPSIS ve VIKOR**

MOORA (Oran Analizi Temelli Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi, alternatiflerin kriter performanslarını normalize ederek karşılaştırılabilir hale getirmekte, ardından fayda ve maliyet kriterlerini birleştirerek bir skor üretmektedir. Bu yöntemin dikkate değer özelliklerinden biri, farklı birimlerdeki kriterleri ortak bir karşılaştırma alanına taşımak ve fayda–maliyet ayrımını doğrudan karar skoruna yansıtabilmesidir (Stanujkić et al., 2013, 2019).

TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği), karar verme sürecini geometrik bir yaklaşımla temel almaktadır. Bu yöntemde en iyi alternatif, pozitif ideal

çözümüne en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olan seçenek olarak belirlenmektedir. Bu bağlamda, ideal ve anti-ideal noktalar her kriterde gözlemlenen en iyi ve en kötü performans değerlerinden türetilmektedir. Alternatiflerin bu referans noktalara olan uzaklıkları hesaplanarak göreceli yakınlık katsayısı belirlenerek sıralama yapılmaktadır. TOPSIS'in kullanım kolaylığı yüksek olsa da, normalizasyon yöntemi ve uzaklık ölçüm tercihleri üzerinde hassasiyet göstermesi, literatürde sıkça vurgulanan bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır (Olgun et al., 2022; Roszkowska and Filipowicz-Chomko, 2024).

VIKOR yöntemi, ideal çözüme ulaşmak yerine "kabul edilebilir uzlaşım" kavramını temel almaktadır. Bu yöntem, iki farklı sapma türünü birlikte dikkate alarak: toplam veya ortalama sapmayı temsil eden grup faydası ve en kötü kriter sapmasıyla tanımlanan bireysel pişmanlık ifadelerini birleştirmektedir. Bu iki bileşen, uzlaşma eğilimini temsil eden bir parametre aracılığıyla birleştirilerek uzlaşma sıralaması elde edilmektedir (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Stanujkić et al., 2013). Bu yönüyle VIKOR, genel performansı yüksek olmakla birlikte belirli bir etkili kriterde zayıf olan alternatiflerin nasıl değerlendirilmesi gerektiği probleminde ayırt edici bir kuramsal çerçeve sunmaktadır (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Olgun et al., 2022).

### **2.6.1 MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin temel ilkeleri**

MOORA (Oran Analizi Temelli Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi, alternatiflerin kriter performanslarını normalize eder ve karşılaştırılabilir hale getirir, ardından fayda ve maliyet kriterlerini birleştirerek bir skor üretir. Bu yöntemin dikkate değer özelliklerinden biri, farklı birimlerdeki kriterleri ortak bir karşılaştırma alanına taşımak ve fayda-maliyet ayrımını doğrudan karar skoruna yansıtabilmesidir (Stanujkić et al., 2013, 2019).

TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği), karar verme sürecini geometrik bir yaklaşımla temel alır. Bu yöntemde göre en iyi alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olan seçenek olarak belirlenir. Bu bağlamda, ideal ve anti-ideal noktalar her kriterde gözlemlenen en iyi ve en kötü performans değerlerinden türetilir. Alternatiflerin bu referans noktalara olan uzaklıkları hesaplanarak göreceli yakınlık katsayısı belirlenir ve böylece sıralama yapılır. TOPSIS'in kullanım kolaylığı yüksek olsa da, normalizasyon yöntemi ve uzaklık ölçüm tercihleri üzerinde hassasiyet göstermesi, literatürde sıkça vurgulanan bir özelliktir (Olgun et al., 2022; Roszkowska and Filipowicz-Chomko, 2024).

VIKOR (Uzlaşık Çözüm Temelli Çok Kriterli Optimizasyon) yöntemi, ideal çözüme doğrudan ulaşmayı hedeflemek yerine “kabul edilebilir uzlaşım” yaklaşımını esas alır; bu kapsamda grup faydası ve bireysel pişmanlık değerlerini birlikte değerlendirerek, bu iki bileşeni uzlaşma eğilimini temsil eden bir parametre aracılığıyla birleştirir ve sonuçta bir uzlaşma sıralaması elde eder (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Stanujkić et al., 2013). Bu yönüyle VIKOR, genel performansı yüksek olmakla birlikte belirli bir etkili kriterde zayıf olan alternatiflerin nasıl değerlendirilmesi gerektiği probleminde ayırt edici bir kuramsal çerçeve sunar (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Olgun et al., 2022).

### **2.6.2 MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin karar mantıkları**

TOPSIS yöntemi, ideal ve anti-ideal referans noktaları üzerinden dengeli bir şekilde değerlendirmektedir. Bir seçeneğin iyi kabul edilmesi için hem ideal çözüme yakın hem de anti-ideal çözüme uzak olması gerekmektedir. Bu dengeli yapı, özellikle çok boyutlu karar problemlerinde sonuçların anlaşılmasını kolaylaştıran net bir analitik çerçeve sağlamaktadır (Olgun et al., 2022; Roszkowska and Filipowicz-Chomko, 2024).

VIKOR yönteminde ideal referans noktası korunmakta, ancak değerlendirme süreci simetrik uzaklık prensibine dayanmamaktadır. Bunun yerine yöntem, çoğunluk performansı ile en zayıf kriterdeki kabul edilebilirlik düzeyi arasında bir denge kurmaya odaklanmaktadır. Bu çerçevede, bir alternatifin tercih edilmesi yalnızca ideale yakınlığına değil, aynı zamanda en düşük performans gösterdiği kriter açısından kabul edilebilir bir seviyede bulunmasına da bağlı olmaktadır (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Stanujkić et al., 2013).

MOORA yöntemi, geleneksel formunda mesafe tabanlı bir referans noktasına dayanmamakta; bunun yerine normalize edilmiş performans değerlerini fayda ve maliyet kriterleri doğrultusunda toplulaştırarak sıralama oluşturmaktadır. Ayrıca, MULTIMOORA içindeki referans nokta yaklaşımı, bazı çalışmalar tarafından ideal çözüm fikrine dolaylı bir yakınlık olarak görülmektedir (Sarkar and Biswas, 2021; Stanujkić et al., 2019). Bu durum MOORA ailesinin yöntemsel esnekliğini göstermektedir.

### **2.6.3 MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin duyarlılık profili**

MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin ortak noktalarından biri, normalizasyon ve ağırlıklandırma süreçlerine karşı hassasiyet. Ağırlıkların değiştirilmesi, her üç yöntemde de

farklı sıralamaların ortaya çıkmasına yol açmakta olup; fakat bu değişimin nedeni yöntemlere göre farklılık göstermektedir. TOPSIS yönteminde, tercih edilen normalization ve ağırlıklar, ideal ve anti-ideal noktaların konumunu doğrudan etkileyerek, göreceli yakınlık katsayısının değişmesine sebep olmaktadır (Olgun et al. 2022; Roszkowska ve Filipowicz-Chomko 2024). VIKOR yönteminde, bu etkiye ek olarak uzlaşım parametresi devreye girerek sıralamanın çoğunluk performansı mı yoksa en kötü kriter performansı mı üzerinden şekilleneceğine karar verilebilmektedir (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Olgun et al., 2022). MOORA'da duyarlılık çoğunlukla normalizasyon yöntemi ve fayda–malîyet toplu hesaplama yöntemiyle ortaya çıkmaktadır (Sarkar and Biswas, 2021; Stanujkić et al., 2019).

#### **2.6.4 MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin kuramsal karşılaştırması**

TOPSIS yöntemi, ideal ve anti-ideal referans noktaları kullanarak sezgisel bir yakınlık ölçüsü oluşturduğundan uygulaması görece kolay ve yaygın olarak tercih edilen bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır; ancak normalizasyon ve ağırlık seçimine karşı duyarlılık göstermektedir (Olgun et al., 2022; Roszkowska and Filipowicz-Chomko, 2024). VIKOR yöntemi, uzlaşım yaklaşımını temel alarak çoğunluk performansını dikkate almakta en kötü kriterde kabul edilebilirliği de göz önünde bulundurmaktadır. Bu özelliği, yöntemi özellikle planlama ve politika alanlarında güçlü kılmakta olup; ancak uzlaşım parametresi nedeniyle duyarlılık analizinin yapılması gerekmektedir (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Stanujkić et al., 2013). MOORA yöntemi, oran temelli toplulaştırma yaklaşımı sayesinde farklı birimlerdeki kriterleri kolayca bir araya getirebilmektedir (Sarkar and Biswas, 2021; Stanujkić et al., 2019). Bu nedenle yöntem seçimi, yalnızca hangi yaklaşımın daha üstün olduğu sorusuna dayanmamakta; daha çok karar probleminin veri yapısı, uzlaşım gereksinimleri, belirsizlik düzeyi ve elde edilen sonuçların nasıl yorumlanacağı gibi faktörlerle ilişkili olmaktadır. Bu çalışmada, karar matrisi MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir ve elde edilen sıralamalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tablo 2.1’de ise, bu üç yöntemin temel karar mantıkları, referans noktası yaklaşımları ve duyarlılık özellikleri bakımından kuramsal farklılıklarını özetlenmiştir (Mukhametzyanov and Pamučar, 2024; Olgun et al., 2022; Roszkowska and Filipowicz-Chomko, 2024; Sarkar and Biswas, 2021; Stanujkić et al., 2013, 2019).

**Tablo 2.1:** MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin karşılaştırılması.

	<b>MOORA</b>	<b>TOPSIS</b>	<b>VIKOR</b>
<b>Temel Karar Mantığı</b>	Normalize edilmiş kriter performanslarının fayda ve maliyet kriterleri üzerinden oran-temelli toplulaştırılması	Alternatiflerin pozitif ideal çözüme yakın ve negatif ideal çözüme uzak olmasına dayalı görelî yakınlık ölçümü	İdeal çözüme göre grup faydası ve bireysel pişmanlık bileşenlerinin uzlaşım yaklaşımıyla değerlendirilmesi
<b>Referans Noktası Yaklaşımı</b>	Klasik MOORA’da doğrudan referans noktası yoktur; MULTIMOORA’da vardır	Pozitif ideal ve negatif ideal çözümler referans noktası olarak kullanılır	İdeal çözüm referansı kullanılır ancak değerlendirme uzlaşım mantığı üzerinden yapılır
<b>Uzlaşım Yaklaşımı</b>	Doğrudan uzlaşım parametresi yoktur; fayda–maliyet üzerinden dolaylı bir denge oluşur	Uzlaşım kavramı bulunmaz; geometrik yakınlık mantığı uygulanır	Grup faydası ve bireysel pişmanlık bileşenlerini birleştiren uzlaşım yaklaşımı yöntemin temelini oluşturur
<b>Parametre Bağımlılığı</b>	Parametre bağımlılığı düşüktür	Parametre bağımlılığı düşüktür ancak normalizasyon seçimine duyarlıdır	Uzlaşım parametresi (v) nedeniyle parametre duyarlılığı daha yüksektir
<b>Duyarlılık Kaynakları</b>	Normalizasyon yöntemi ve fayda–maliyet toplulaştırma biçimi	Normalizasyon yöntemi, ağırlık seti ve uzaklık ölçümü	Ağırlık seti, normalizasyon ve uzlaşım parametresi
<b>Yorumlama Kolaylığı</b>	Oran temelli skor sayesinde yorumlama görece pratiktir	Geometrik yakınlık mantığı sezgisel yorum imkânı sağlar	Uzlaşım yaklaşımı nedeniyle yorumlama daha analitik değerlendirme gerektirir

**Tablo 2.2** (devam)

<b>Literatürde</b>	Mühendislik	Enerji planlama,	Politika analizi,
<b>Kullanım</b>	optimizasyonu, üretim	sürdürülebilirlik	planlama ve çok
<b>Alanı</b>	planlama ve performans	değerlendirmeleri ve	paydaşlı karar
	değerlendirmeleri	yer seçimi çalışmaları	problemleri

## **2.7 Belirsizlik Altında Dayanıklı Karar Verme ve Enerji Altyapısı Planlaması**

Enerji altyapısı planlaması, uzun ömürlü ve geri dönüşü zorluklar içeren yatırımların, iklim, talep, maliyet ve politika belirsizlikleri altında analiz edilmesini gerektirdiğinden, çok kriterli karar verme uygulamalarının en dikkate değer alanlarından birini teşkil etmektedir. Bu tür karar sorunlarında “en iyi” seçenek genellikle sadece tek bir senaryoya göre değil, farklı gelecek koşullarında kabul edilebilir performansı sürdürebilme yeteneğine göre belirlenmektedir. Bu nedenle, kararlılık kavramı ortalama performansla ilgilenmenin yanı sıra; geniş bir senaryo yelpazesinde sistemin etkili eşikleri aşmaması ve uygun performans aralığında kalmasıyla tanımlanan bir dayanıklılık niteliği olarak görülmektedir (Anjum et al., 2024; Reis and Shortridge, 2019).

Bu yöntem özellikle olasılık dağılımlarının güvenilir şekilde tanımlanamadığı durumlarda daha da dikkate değer hale gelmektedir. Derin Belirsizlik Altında Karar Verme (DMDU), bu tür koşullarda “en olası senaryoda en iyi çözüm” yerine, birçok olası senaryoda dayanıklı olan stratejileri tercih etmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle, dayanıklı karar verme yaklaşımı, ÇKKV yöntemleriyle doğal bir bağ kurmaktadır (Anjum et al., 2024; Reis and Shortridge, 2019, 2021). Bu yöntem özellikle olasılık dağılımlarının güvenilir şekilde belirlenemediği durumlarda daha dikkate değer hale gelmektedir. DMDU yaklaşımı, bu gibi durumlarda “en olası senaryoda en iyi çözüm” yerine birçok olasılığı kapsayan senaryolarda dayanıklı olan stratejileri seçmeyi hedeflemektedir. Bu nedenle, dayanıklı karar verme yaklaşımları ÇKKV yöntemleriyle uyum sağlamaktadır (Anjum et al., 2024; Reis and Shortridge, 2021).

Sıralama üreten ÇKKV yöntemlerinde, robustluk değerlendirmesi genellikle duyarlılık analizi ile başlamaktadır. Sıralama sonuçlarının, kriter ağırlıkları, normalizasyon tercihleri veya alternatif performans değerleri gibi girdilerdeki küçük değişimlere aşırı duyarlı olması durumunda, kararın belirli parametre setlerine bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu noktada duyarlılık analizi üç temel işlev üstlenmektedir: İlk olarak, karar sonucunun hangi girdilere karşı daha hassas olduğunu belirlemektedir. İkinci olarak, hangi değişim aralıklarında

sıralamanın kararlılığını koruduğunu ortaya koymaktadır. Üçüncü olarak ise belirsizliğin karar sonuçlarına nasıl yansıdığını açıklamaktadır. Bu bağlamda duyarlılık analizi, yalnızca sonucun değişip değişmediğini değil, aynı zamanda bu değişimin nasıl gerçekleştiğini de ortaya koyarak dikkate değer bir güvenilirlik kontrolü sağlamaktadır (Croux and Oellerer, 2015; Erbey et al., 2025; Goswami et al., 2021; Li et al., 2018).

Enerji ve emisyon gibi çok boyutlu altyapı kararlarında, kriter ağırlıklarının farklı paydaşlar tarafından farklı biçimlerde yorumlanması doğal bir durum olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, “ağırlıklar değiştiğinde sıralama nasıl etkilenmektedir?” sorusu yalnızca teknik bir analiz niteliği taşımamakta, aynı zamanda karar vericilerin önceliklerini ve risk toleranslarını anlamaya da katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda duyarlılık analizi, paydaş tercihleri ile karar sonuçları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan dikkate değer bir şeffaflık aracı olarak öne çıkmaktadır (Erbey et al., 2025; Li et al., 2018; Ruiz-Vélez et al., 2024). Literatürde ayrıca, duyarlılık analizinin sadece deterministik parametre değişiklikleriyle sınırlı kalmadığı, senaryo setleri ve parametre aralıklarıyla birlikte değerlendirilerek robust karar çerçeveleriyle daha güçlü bir bağlantı kurduğu vurgulanmaktadır (Anjum et al. 2024; Reis ve Shortridge 2019).

Duyarlılık analizinin ardından, farklı sıralamaların birbirleriyle ne ölçüde tutarlı olduğunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Birden fazla ÇKKV yöntemi kullanıldığında veya farklı ağırlık senaryolarıyla çok sayıda sıralama ortaya çıktığında, temel sorunlardan biri bu sıralamaların birbirine ne kadar benzerlik gösterdiğinin belirlenmesidir. Spearman sıra korelasyonu, iki sıralama arasındaki monoton ilişkinin gücünü ölçerek bu soruya sayısal bir yanıt vermektedir. Özellikle dağılım varsayımlarına daha az bağımlı olması ve uç değerlerden daha az etkilenmesi sebebiyle sıralama karşılaştırmalarında sıkça tercih edilmektedir (Bocianowski et al., 2024; Croux and Oellerer, 2015; Li et al., 2018). Bu özellik, ÇKKV bağlamında yöntemler arasındaki tutarlılık veya ağırlık senaryoları arasındaki stabilitenin ölçülebilir olmasını sağlamaktadır (Khan et al., 2024; Li et al., 2018; Ruiz-Vélez et al., 2024). Ancak Spearman korelasyonu, doğası gereği yalnızca iki sıralama arasındaki ilişkiyi ölçmektedir. Çok sayıda sıralamanın karşılaştırılması gerekiyorsa, birçok ikili karşılaştırma yapmak gerekmekte veya çoklu uzlaşmayı değerlendiren tamamlayıcı metriklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, literatürde Spearman katsayısı genellikle Kendall temelli ölçütlerle birlikte kullanılmaktadır (Bocianowski et al., 2024; Erbey et al., 2025; Li et al., 2018).

Bu noktada, çoklu sıralamalar arasındaki genel uzlaşma seviyesini belirlemek amacıyla Kendall'in  $W$  katsayısı devreye girmektedir. Kendall'in  $W$  istatistiği, birden fazla yöntem veya değerlendiricinin ürettiği sıralamalar arasındaki genel uyumu ölçen bir katsayı olarak tanımlanmıştır. ÇKKV bağlamında, bu değerlendiriciler farklı yöntemler, çeşitli ağırlıklandırma senaryoları ya da farklı paydaş grupları olabilmektedir.  $W$  katsayısının yüksek olması, sıralamaların ortak bir çerçevede etrafında yakınlaştığını gösterirken, düşük olması çeşitli alternatiflerin sıralamalarında dikkate değer farklılıklar olduğunu ifade etmektedir (Bocianowski et al., 2024; Erbey et al., 2025; Li et al., 2018). Bu nedenle, Kendall'in  $W$  değeri karar vericiye dikkate değer bir güvenilirlik göstergesi sağlamaktadır.  $W$  yüksekse, hangi yöntem uygulanırsa uygulansın sonuçların büyük ölçüde benzer olacağı anlaşılırken;  $W$  düşükse, kararın yönteme veya parametreye karşı daha duyarlı olduğu kabul edilmektedir.

Yenilenebilir enerji ve hidrojen üretim tesisleri gibi çok paydaşlı karar alanlarında uzlaşma, yalnızca teknik değil, aynı zamanda yönetsel bir zorunluluktur. Bu nedenle, Kendall'in  $W$  katsayısı, paydaş görüşleri arasındaki farkların sayısal olarak gösterilmesi ve karar alma sürecinin şeffaf hale getirilmesi açısından etkili bir araç olarak görülmektedir (Anjum et al., 2024; Reis and Shortridge, 2019).

Farklı sıralamaların birlikte değerlendirilmesinin ardından, bu sıralamaların tek bir bütünleşik sonuç altında birleştirilmesi gerekmektedir. Birden fazla sıralama elde edildiğinde, karar vericinin karşılaştığı temel sorun bu sıralamaların tek bir bütünleşik sonuç altında nasıl birleştirileceğidir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan Borda yaklaşımı, her alternatifi farklı sıralamalardaki konumuna göre puanlandırmakta ve toplam puanlar üzerinden ortak bir sıralama oluşturmaktadır. Bu yöntemin temel avantajları arasında uygulama kolaylığı ve yüksek düzeyde yorumlanabilirlik yer almaktadır. Ayrıca, farklı yöntemlerin oluşturduğu sıralamalar arasında dengeli bir çözüm sunabildiği için, ÇKKV çalışmalarında sıkça tercih edilmektedir (Goswami et al., 2021; Ruiz-Vélez et al., 2024). Borda yöntemi yalnız başına kesin doğruluk garantisi vermez; esas değerini duyarlılık ve uzlaşma analizleriyle birlikte kullanıldığında ortaya koymaktadır (Erbey et al., 2025; Goswami et al., 2021).

Bu araçların birlikte kullanılması, ÇKKV sonuçlarında robustluk ve sıralama kararlılığının kapsamlı biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. ÇKKV bağlamında robustluk analizi, kararın yalnızca tek bir sıralama sonucuna dayanmadığını; çeşitli parametreler, ağırlıklar ve yöntemler altında da tutarlı kalabildiğini göstermektedir. Duyarlılık analizi, kararın parametre değişimlerine tepkisini ortaya koyarken; Spearman sıra korelasyonu ikili sıralama benzerliklerini ölçmektedir. Kendall'in W katsayısı ise çoklu sıralamalar arasındaki genel uzlaşma seviyesini belirlerken; Borda yöntemi ise farklı sıralamaları tek bir entegre sıralamada birleştirmektedir (Erbey et al., 2025; Goswami et al., 2021; Li et al., 2018; Ruiz-Vélez et al., 2024). Bu araçların birlikte kullanılması, enerji altyapısı gibi etkili karar alanlarında alternatiflerin kırılğan mı yoksa dayanıklı mı olduğunu daha net şekilde göstermektedir (Anjum et al., 2024; Reis and Shortridge, 2019, 2021).

Son olarak, bu teorik çerçeve pratik karar süreçlerine uygulanabilir bir analiz metodolojisi sunmaktadır. Bu teorik çerçeve, enerji altyapısı kararlarında güvenilirliği artırmak amacıyla pratik bir değerlendirme sürecini desteklemektedir. İlk adımda, duyarlılık analizi kullanılarak ağırlıkların ve performans değerlerinin hangi aralıkta sıralamayı değiştirdiği belirlenerek kararın kırılğanlık noktaları ortaya konmaktadır (Erbey et al., 2025; Goswami et al., 2021; Li et al., 2018). İkinci aşamada, farklı yöntemlerin ve senaryoların oluşturduğu sıralamaların tutarlılığı, Spearman korelasyonu kullanılarak karşılaştırılmaktadır (Bocianowski et al., 2024; Khan et al., 2024). Üçüncü aşamada, Kendall'in W katsayısı kullanılarak sıralamalar arasındaki genel uzlaşma seviyesi belirlenmektedir. W değeri düşük olduğunda, kararın tek bir sıralamaya indirgenmesi yerine, alternatif tasarım veya politika seçeneklerinin tekrar gözden geçirilmesi daha mantıklı bir yaklaşım sağlamaktadır (Erbey et al., 2025; Li et al., 2018). Son aşamada, çoklu sıralamalar Borda agregasyonu kullanılarak tek bir entegre sıralamada toplanmaktadır. Ancak bu birleşik sıralamanın güvenilirliği, Spearman sıralama korelasyonu ve Kendall uyum katsayısı analizleri ile birlikte değerlendirildiğinde, metodolojik açıdan daha anlamlı ve bütüncül bir yapı kazanmaktadır (Goswami et al., 2021; Ruiz-Vélez et al., 2024).

## **2.8 Yeşil Hidrojen Sistemlerinde Tekno-Ekonomik Analiz**

Yeşil hidrojen (GH<sub>2</sub>) sistemlerinde temel ekonomik analiz aracı olan LCOH, bir tesisin ekonomik ömrü boyunca gerçekleşen tüm nakit akışlarını bugünkü değere indirgeyerek toplam indirgenmiş maliyeti toplam indirgenmiş hidrojen üretimine bölerek birim hidrojen maliyetini belirlemektedir. Bu açıdan, LCOH, çeşitli teknoloji seçenekleri ve işletme

stratejilerinin ortak bir ölçekte kıyaslanmasını sağlayan ana gösterge olarak kullanılabilir (Dinčić et al., 2025; Lima et al., 2005; Tassew et al., 2024).

Literatürde LCOH'nin yalnızca bir muhasebe oranı olmadığı; aynı zamanda CAPEX/OPEX yapısı, kapasite faktörü, işletme stratejisi ve finansal varsayımlar arasındaki ilişkileri özetleyen bir karar destek göstergesi olduğu belirtilmektedir (Betti, 2025; Roberts, 2025). Bu nedenle, LCOH sadece maliyet seviyesini raporlamakla kalmaz; ayrıca, seçilen teknik tasarım ve işletme düzeninin belirli bir finansal yapı içinde nasıl bir maliyet yapısına dönüşmesi gerektiğini de göstermektedir (Dinčić et al., 2025; Lima et al., 2005; Roberts, 2025). LCOH'nin bu bütüncül yapısı, özellikle elektrik maliyetlerinin sistem üzerindeki belirleyici rolünü daha da etkili hale getirmektedir. Elektroliz temelli GH<sub>2</sub> üretiminde elektrik maliyeti LCOH'nin dikkate değer bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu yüzden elektrik fiyatının yalnızca tek bir ortalama değer olarak değil, tarife yapısı, zaman-duyarlı fiyatlandırma ve piyasa volatilitesi gibi faktörlerle temsil edilmesi, LCOH hesaplamalarının açıklığını artırmaktadır (ANIETO, 2025; Anosike et al., 2017).

Elektrik fiyatlarının yüksek değişkenlik gösterdiği sistemlerde, üretimin daha düşük maliyetli saatlere kaydırılması, yenilenebilir enerji üretiminin şebekeyle olan etkileşiminin yeniden düzenlenmesi veya hibrit işletme stratejilerinin benimsenmesi, OPEX bileşimini değiştirerek LCOH üzerinde dikkate değer etkiler yapabilmektedir (Al-Ghaithi, 2025; Lima et al., 2005; Mitra et al., 2014a). Bu nedenle elektrik maliyeti, yalnızca birim enerji fiyatı değil; aynı zamanda üretimin zamanlaması, yenilenebilir kaynakların dalgalanması ve elektrolizörün kısmi yük davranışıyla birlikte ele alınan bir "gerçekleşen enerji maliyeti" olarak düşünülmektedir (Betti, 2025; Mitra et al., 2014a; Tassew et al., 2024).

GH<sub>2</sub> ekonomisinin elektrik maliyetine duyarlılığı genellikle doğrusal olarak ifade edilememektedir. Elektrik fiyatındaki dalgalanmalar, volatilité ve işletme stratejisi birlikte CAPEX/OPEX dengesini etkileyerek LCOH'yi şekillendirmektedir. Bu nedenle, elektrik fiyatı duyarlılığı çoğu çalışmada senaryo analizleri veya stokastik simülasyonlarla araştırılmaktadır (Al-Ghaithi, 2025; ANIETO, 2025; Roberts, 2025).

Zaman-duyarlı fiyat yapıları altında, aynı donanım kullanılarak bile üretim planlaması farklı LCOH (Litrece Kilo-Hidrojeni) değerleri ortaya çıkarabilmektedir (Lima et al. 2005; Mitra, Pinto ve Grossmann 2014b). Ayrıca, teşvikler açısından, karbon fiyatlandırması gibi politika

araçları doğrudan LCOH formülüne dahil olmasa da, elektrik maliyetleri ve piyasa rekabeti üzerinden hidrojen ekonomisini dikkate değer ölçüde etkileyebilmektedir (Betti, 2025; Roberts, 2025; Tassew et al., 2024).

Elektrik maliyetlerinin yanı sıra, finansal parametreler de LCOH hesaplamalarında belirleyici bir rol oynamaktadır. İskonto oranı, tekno-ekonomik analizde sadece paranın zaman değerini değil, aynı zamanda yatırım riskini de göstermektedir. Sermaye yoğun projelerde bu oran, CAPEX'in LCOH üzerindeki etkisini doğrudan etkilemekte; aynı teknik tasarım, farklı iskonto oranlarında değişen LCOH değerleri ortaya koyabilmektedir (Lima et al., 2005; Schiozer et al., 2008; Surovtsev and Sungurov, 2017).

CRF (Sermaye Kurtarma Faktörü), CAPEX'i proje ömrü boyunca eşdeğer yıllık maliyete çevirerek farklı tasarımların karşılaştırmasını kolaylaştırmaktadır. Ancak, CRF'nin değeri doğrudan iskonto oranı ve ekonomik ömür varsayımlarına bağlı olduğu için, CRF ile yıllıklaştırılan CAPEX'in tek başına değerlendirilmesi yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir (Lima et al., 2005; Surovtsev and Sungurov, 2017; Yan et al., 2023). Bu nedenle, literatürde iskonto oranının yalnızca teknik bir girdi değil, aynı zamanda risk değerlendirmesinin dikkate değer bir parçası olarak kabul edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Schiozer et al., 2008; Surovtsev and Sungurov, 2017; Yan et al., 2023).

Bu finansal yapı içerisinde CAPEX ve OPEX bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesi LCOH'nin oluşum mekanizmasını daha net ortaya koymaktadır. GH<sub>2</sub> projelerinde CAPEX ve OPEX ayrımı, LCOH'nin oluşumunu anlamak için dikkate değer bir çerçeve sağlamaktadır. CAPEX; elektrolizör yatırımı, kurulum ve altyapı maliyetlerini kapsarken, OPEX elektrik giderleri, bakım-onarım, sarf malzemeleri ve operasyonel harcamalardan oluşmaktadır (Bansal and Kumar, 2023; Garbe et al., 2020; Schiozer et al., 2008). Elektrolizör teknolojilerindeki CAPEX düşüşleri LCOH üzerinde kayda değer bir iyileşme sağlayabilir; ancak bu etkinin genellikle elektrik maliyeti ve işletme stratejileriyle birlikte dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Dinčić et al., 2025; Garbe et al., 2020; Roberts, 2025).

Literatürde ayrıca CAPEX ve OPEX bileşenlerinin tek bir kesin değer yerine olasılık dağılımlarıyla temsil edilmesi önerilmektedir. Bu yöntem, LCOH'nin sadece bir değer değil, bir aralık veya dağılım olarak raporlanmasını sağlar ve böylece belirsizliğin maliyet

üzerindeki etkisini daha gerçekçi şekilde göstermektedir (Bansal and Kumar, 2023; Schiozer et al., 2008; Yan et al., 2023).

Bu nedenle LCOH değerlendirmesi, yalnızca maliyet bileşenlerinin toplamı değil, aynı zamanda finansal fizibilitenin bütüncül bir analizini gerektirmektedir. LCOH, güçlü bir kıyas göstergesi olup, genellikle yatırım kararlarında Net Bugünkü Değer (Net Present Value, NPV) ve İç Kârlılık Oranı (Internal Rate of Return, IRR) gibi finansal metriklerle birlikte kullanılmaktadır. Çünkü bir projenin fizibilitesi, sadece ortalama maliyet değil, aynı zamanda nakit akışının zaman içindeki durumu ve belirsizlikler altındaki davranışına da bağlı bulunmaktadır (Lima et al., 2005; Schiozer et al., 2008; Surovtsev and Sungurov, 2017).

Monte Carlo simülasyonları ve risk temelli yaklaşımlar, iskonto oranı, risk primi ve nakit akışı belirsizliklerini birlikte dikkate alarak LCOH değerlendirmesini belirsizlik ortamında tamamlamaktadır (Bansal and Kumar, 2023; Schiozer et al., 2008; Yan et al., 2023). Bu nedenle, literatürde LCOH'nin yalnızca tek bir değer olarak raporlanması yerine, güven aralıkları ve senaryo kümeleri ile birlikte sunulması tavsiye edilmektedir.

Güncel çalışmalar, bu analizlerin artık statik hesaplamaların ötesine geçerek dinamik modelleme yaklaşımlarına yöneldiğini göstermektedir. Güncel literatürde, TEA giderek daha çok statik maliyet hesaplarından uzaklaşıp, simülasyon ve optimizasyon temelli bütünleşmiş modellere doğru kaymaktadır. Bu yaklaşımlar, kapasite seçimi ve işletme stratejisini tek bir modelde birleştirerek, LCOH'nin hangi karar mekanizmalarıyla oluştuğunu daha net göstermektedir (Mitra et al., 2014b; Santos et al., 2017).

Matematiksel programlama temelli modeller, kapasite ve operasyonel stratejiyi aynı anda optimize ederek CAPEX/OPEX dengesi ile LCOH arasındaki ilişkiyi daha net göstermektedir (Al-Ghaithi, 2025; Mitra et al., 2014a). Benzer şekilde, Monte Carlo ve Latin Hypercube gibi örnekleme yöntemleri, LCOH'nun dağılımını oluşturmaya imkan tanımakta ve bu da belirsizlik altında karar verme süreçlerini desteklemektedir (ANIETO, 2025; Bansal and Kumar, 2023; Surovtsev and Sungurov, 2017).

Bu bilgiler ışığında, LCOH, yeşil hidrojen projelerinin rekabet gücünü değerlendirmede temel bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, LCOH değeri yalnızca

CAPEX ve OPEX bileşenlerinin toplamına bağlı kalmamakta; aynı zamanda iskonto oranı, elektrik fiyatlandırma yapısı, işletme stratejileri ve risk modelleme yaklaşımlarından da dikkate değer ölçüde etkilenmektedir (Dinčić et al., 2025; Garbe et al., 2020; Tassew et al., 2024). Bu nedenle, LCOH'nin tek bir değerden çok, elektrik fiyatı senaryoları, politika varsayımları ve belirsizlik analizleri ile birlikte aralık veya dağılım şeklinde raporlanması daha güvenilir bir değerlendirme sunmaktadır (ANIETO, 2025; Bansal and Kumar, 2023; Surovtsev and Sungurov, 2017). Özellikle fiyat volatilitesi ve düzenleyici belirsizliğin yüksek olduğu enerji sistemlerinde, risk odaklı analizler LCOH değerlendirmesini destekleyerek yatırım kararlarının metodolojik temelini daha net hale getirmektedir (Betti, 2025; Schiozer et al., 2008; Yan et al., 2023).

## **2.9 Enerji geçişinde karbon fiyatlandırması ve teşvikler**

Karbon vergisi ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), emisyon dışsallığını fiyatlandırmayı amaçlayan iki ana politika aracı olarak kabul edilmektedir. Bu mekanizmalar, yatırım kararlarında farklı politika kesinliği seviyeleri sunmaktadır. Karbon vergisi, firmalara daha öngörülebilir bir son birim maliyeti sinyali vererek düşük karbon teknolojilerine yatırım yapmak için daha net bir fiyat işareti sağlamaktadır. ETS ise toplam emisyonları kota sistemiyle sınırlamakta; fakat izin fiyatlarının piyasa koşullarına bağlı olarak belirlenmesi, fiyat dalgalanmalarına neden olabilmektedir. Bu durum, yatırım kararlarını politika güvenilirliği ve fiyat beklentilerine daha hassas hale gelmesine sebep olabilmektedir (Carraro and Büchner, 2004; Greaker and Pade, 2009; Popp, 2006a, 2010; Taylor, 2012). Bu nedenle literatürde, mekanizmanın tipi yerine fiyat tabanı, fiyat aralığı veya uzun vadeli azaltım hedefleri gibi tasarım unsurlarının yatırım ortamını belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Carraro and Büchner, 2004; Greaker and Pade, 2009; Taylor, 2012). Firmalar yatırım kararlarını verirken sadece mevcut karbon fiyatını değil, aynı zamanda gelecekteki politika uygulamalarının güvenilirliğini de göz önünde bulundurarak hareket etmektedir (Newell, 2010; Taylor, 2012).

Bu politika araçlarının etkisi yalnızca kısa vadeli maliyet sinyalleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda teknolojik değişim süreçlerini de doğrudan etkilemektedir. Literatürde karbon fiyatlandırması yalnızca enerji talebini yönlendiren bir politika aracı değil, aynı zamanda yeni teknolojilerin gelişimini teşvik eden bir ekonomik sinyal olarak da görülmektedir (Newell, 2010; Popp, 2004, 2006a). Karbon fiyatlarının yükselmesiyle düşük karbon teknolojilerine olan talep artmakta ve bu da araştırma-geliştirme faaliyetlerini teşvik

etmektedir. Buna bağlı olarak, zamanla yeni teknolojilerin maliyetleri düşmekte ve bu teknolojiler daha geniş çapta kullanılabilir hale gelmektedir. Bu yaklaşım, teknoloji gelişiminin ekonomik sistem içinde meydana gelen bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, teknolojik ilerleme sadece dışarıdan gelen bir faktör değil; yatırımlar, araştırma faaliyetleri ve piyasa koşulları tarafından şekillenen bir unsur olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, birçok çalışma yalnızca karbon fiyatlandırmasının yeterli olmayabileceğini, bunun inovasyon politikalarıyla birlikte uygulanmasının daha etkili sonuçlar sağlayacağını savunmaktadır (Bosetti and Tavoni, 2009; Popp, 2004, 2006a). Ar-Ge faaliyetleri sonucu ortaya çıkan bilgi diğer aktörlerle paylaşıldığından, bu yatırımların toplum açısından sağladığı fayda, yatırım yapan kurumun kazancını aşabilmektedir. Bu nedenle, kamu destekleri ve inovasyon politikaları teknolojik ilerlemenin hızlandırılmasında etkili öneme sahip olmaktadır.

Bu noktada, teknolojik dönüşümün hızlandırılmasında doğrudan ekonomik teşvik mekanizmaları da dikkate değer bir rol oynamaktadır. Yatırım ve üretim teşvikleri kapsamında öne çıkan başlıca politika araçları, Yatırım Vergi Kredisi (ITC) ve Üretim Vergi Kredisi (PTC) olarak literatürde geniş biçimde ele alınmaktadır (Mao ve Wang 2016; Stokes ve Breetz 2018). Ancak, teşviklerin etkisi tekdüze değildir; maliyet düşüşlerinin hızı, finansmana erişim, tedarik zinciri kısıtları ve politika sürekliliği gibi faktörler, aynı teşviğin gerçek etkisini artırabilmekte veya sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, ITC genellikle yatırım kararlarını kolaylaştırıcı bir araç olarak görülürken, PTC üretim sürekliliği ve kapasite kullanımını desteklemeye yönelik bir mekanizma olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, teşviklerin etkinliği, teknoloji maliyetleri, finansman koşulları, tedarik zinciri yapısı ve politika sürekliliği gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Mao and Wang, 2016; Newell, 2010; Stokes and Breetz, 2018).

Ancak bu politika araçlarının etkinliği büyük ölçüde politika belirsizliği ve yatırım riskleri ile yakından ilişkilidir. Karbon fiyatlandırmasının inovasyon üzerindeki etkisi büyük ölçüde politika sinyallerinin gücüne bağlı olarak nitelendirilebilir. Düşük karbon teknolojilerine yapılan yatırım kararlarının gerçekleşebilmesi için, politika kaynaklı belirsizlik nedeniyle artan risk primlerinin getiri beklentilerini aşmaması gerekmektedir (Newell, 2010; Taylor, 2012). Cap-and-trade sistemlerinin inovasyonu teşvik edebileceğine dair bulgular vardır; ancak, izin fiyatlarındaki olası hızlı değişiklikler yatırım zamanlamasını olumsuz etkileyebilmektedir (Buonanno et al., 2003; Nogueira et al., 2023; Taylor, 2012).

Bu bağlamda, teknoloji yayılımı ve uluslararası iş birliği süreçleri de politika tasarımının ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. Entegre değerlendirme modelleri, araştırma-geliştirme, öğrenme ve teknoloji yayılımı süreçlerini bir arada inceleyerek, çeşitli politika kombinasyonlarının maliyet etkinliğini karşılaştırma olanağı sunmaktadır (Barrett, 2021; Cian et al., 2011; Cian and Tavoni, 2012). Entegre değerlendirme modelleri, araştırma-geliştirme, öğrenme ve teknoloji difüzyonu süreçlerini bir arada inceleyerek, farklı politika kombinasyonlarının maliyet etkinliğini karşılaştırma olanağı sunmaktadır (Bosetti and Tavoni, 2009; Cian et al., 2011; Nogueira et al., 2023). Bu nedenle, karbon fiyatlandırması ulusal seviyede uygulanıyor olsa bile, teknoloji maliyetlerinin azalması ve yayılmasını desteklemek amacıyla uluslararası bilgi alışverişini teşvik eden politika tasarımları büyük önem taşımaktadır (Barrett, 2021; Newell, 2010).

Tüm bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, karbon fiyatlandırması ve teşvik mekanizmalarının enerji dönüşümündeki rolü daha bütüncül bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Türkiye gibi enerji dönüşümüne yüksek yatırım ihtiyacı olan ekonomilerde en dikkate değer mesele, fiyat sinyalinin güvenilirliğidir. Öngörülebilir bir karbon fiyatı yolu (vergi veya güçlü tasarlanan ETS), belirsizlik primini azaltarak düşük karbonlu teknolojilerin finansmanına erişimi kolaylaştırabilmektedir (Newell, 2010; Taylor, 2012). Buna ek olarak, ITC/PTC gibi teşvikler, özellikle sermaye yoğun teknolojilere yönelirken yatırım yapma eşiklerini düşürerek kurulum sürecini hızlandırabilir; ancak bu etkinin devamlılığı, teşviklerin tasarımı ve amacına uygunluğu ile ilişkilendirilmektedir (Mao and Wang, 2016; Stokes and Breetz, 2018). Son olarak, yerli inovasyon ve difüzyon kapasitesi güçlenmedikçe, teşviklerin bazıları ithal teknolojiden kaynaklanan sızıntılara yol açabilmekte; bu nedenle, teknoloji yayılımı ve bilgi dışsallıklarını göz önünde bulunduran paket tasarımları daha sağlam bir temel sağlamaktadır (Barrett, 2021; Cian et al., 2011; Cian and Tavoni, 2012). Karbon vergisi ve ETS, emisyon dışsallığını fiyatlandırarak enerji dönüşümünü teşvik edebilir; ancak inovasyon üzerindeki net etkisi, fiyat sinyalinin öngörülürlüğü ve politika tasarımının güvenilirliği ile belirlenmektedir (Newell, 2010; Popp, 2006a; Taylor, 2012). ITC/PTC gibi teşvikler, yatırım ve üretim davranışlarını çeşitli yollarla etkileyerek bu sinyali güçlendirebilmektedir. Kuramsal literatür ise en etkili yaklaşımın karbon fiyatlandırmasını, inovasyon ve teknoloji yayılımı politikalarıyla uyumlu bir “paket” halinde kurabilen yöntemler olduğunu göstermektedir (Bosetti and Tavoni, 2009; Cian et al., 2011; Popp, 2004). Bu paket yaklaşımları, endojen teknolojik değişim modellerinin öğrenme ve AR-GE dinamikleri ile piyasa sinyali literatürünün belirsizlik ve yatırım arasındaki ilişkiyi

vurgulayan temel ilkeleriyle uyumlu sağlam bir kuramsal temel sağlamaktadır (Nogueira et al., 2023; Popp, 2006b; Taylor, 2012).

Bu kuramsal çerçeve, karbon fiyatlandırması ve teşvik mekanizmalarının enerji dönüşümünde yalnızca çevresel politika araçları olarak değil, aynı zamanda yatırım kararlarını yönlendiren ve teknolojilerin yayılımını hızlandıran güçlü ekonomik sinyaller oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonraki bölümlerinde ise bu politika araçları, yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim sistemlerinin ekonomik performansını farklı senaryolarla modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle karbon fiyatı, yatırım teşvikleri ve vergi politikalarının hidrojen üretim maliyetleri üzerindeki etkisi, LCOH, NPV IRR gibi göstergeler aracılığıyla incelenmiştir. Böylece, karbon fiyatlandırması ve teşvik mekanizmalarının yalnızca teorik düzeyde değil, enerji sistemleri yatırımlarının finansal açıdan uygulanabilirliği üzerinde de somut etkileri değerlendirilmiştir.

## **2.10 Enerji Sistemlerinde Çok Amaçlı Optimizasyonun Teorik Arka Planı**

Enerji sistemlerinin planlanması ve tasarımı genellikle birden fazla hedefin aynı anda göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir. Maliyetlerin azaltılması, emisyonların düşürülmesi, yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve sistem güvenliğinin sağlanması gibi hedefler genellikle birbirleriyle tam uyumlu olamamaktadır. Bu nedenle, enerji sistemleri analizi literatüründe yaygın olarak çok amaçlı optimizasyon (MOOP) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yöntem, farklı hedefler arasındaki dengeyi göstererek, karar vericilerin çeşitli sistem tasarımlarını daha kapsamlı şekilde değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Bu genel yaklaşımın teorik temelini Pareto optimalite kavramı oluşturmaktadır. Bir çözüm, diğer çözümler tarafından tüm hedefler bakımından eşzamanlı olarak iyileştirilemiyorsa, Pareto optimal veya non-dominated olarak kabul edilmektedir. Bu çözümler, Pareto ön yüzü olarak adlandırılan çözüm kümeleri içinde yer almaktadır (Schram et al., 2020; Takagi et al., 2023; Wu et al., 2022). Bu yaklaşımın temel özelliği, yalnızca tek bir “en iyi çözüm” sunmakla sınırlı kalmamakta; bunun yerine, farklı hedefler arasında ödünleşmeleri içeren bir çözüm kümesi ortaya koymaktadır. Bu nedenle, nihai çözüm kararı, karar vericinin tercihlerine göre Pareto kümesi içerisinde seçilmektedir (Li and Pavlak, 2023; Sooktip and Wattanapongsakorn, 2017).

Pareto optimalite kavramının pratikteki en dikkate değer katkısı, enerji sistemlerinde hedefler arası çatışmaların açık şekilde analiz edilebilmesidir. Enerji sistemlerinde maliyet,

emisyona, yenilenebilir enerji oranı ve sistem güvenliği gibi performans göstergeleri çoğu durumda birbiriyle çatışan hedefler olarak ortaya çıkmakta; bu durum, tek bir optimum çözüm yerine alternatif çözüm kombinasyonlarının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Pareto analizi, bu ilişkileri tek bir performans göstergesine indirgemenin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Schram et al., 2020; Shidhani et al., 2020). Örneğin, bazı Pareto bölgelerinde küçük maliyet artışları dikkate değer emisyon kazançları sağlayabilirken; diğer bölgelerde ise emisyonu daha fazla azaltmak için oldukça yüksek maliyetler gerekebilmektedir. Pareto ön yüzündeki bu değişiklikler, enerji politikaları ve yatırım kararlarında etkili denge noktalarını ortaya koyabilmektedir (Li and Pavlak, 2023; Takagi et al., 2023). Bu nedenle Pareto analizi, sadece sonuçlar üretmekle kalmayıp, karar verme sürecinin daha açık ve şeffaf şekilde değerlendirilmesine yardımcı olan bir araç olarak kabul edilmektedir (Schram et al., 2020; Sooktip and Wattanapongsakorn, 2017).

Bu çatışma yapısı içerisinde en belirgin örneklerden biri maliyet-emisyon ödünleşmesidir. Daha düşük emisyonlu sistem tasarımları genellikle daha yüksek yatırım veya işletme maliyetleriyle ilişkilidir ve Pareto analizi bu dengeyi sayısal olarak gösterebilmektedir (Schram et al., 2020; Shidhani et al., 2020).

Yenilenebilir enerji oranının artırılması, emisyonları azaltmada dikkate değer bir etki oluşturabilmektedir. Ancak, depolama çözümleri, sistem esnekliği ve şebeke entegrasyonu gibi unsurlar, maliyetlerin doğrusal olmayan bir biçimde değişmesine neden olabilir. Ayrıca, sistem güvenilirliği ve arz sürekliliği gibi faktörler de enerji sistemlerinin optimize edilmesinde etkili rol oynamaktadır (Lahijanian et al., 2016; Shidhani et al., 2020).

Enerji üretim sistemleri, arazi kullanımı, ekosistem etkileri ve su-enerji-çevre ilişkileri gibi çevresel faktörlerle yakından bağlantılı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, enerji üretimi ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki denge, çoğu zaman çok boyutlu bir karar verme sürecine dönüşmektedir (Feu et al., 2017; Wu et al., 2022). Bu çok boyutlu yapı, farklı çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde literatürde genel olarak iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır. Deterministik yöntemler arasında ağırlıklandırma,  $\epsilon$ -kısıt yaklaşımı ve doğrusal veya karma tamsayı programlama tabanlı modeller bulunmaktadır. Bu teknikler Pareto ön yüzünü sistematik şekilde oluşturma avantajına sahiptir. Ancak, hedef uzayının konveks olmaması

veya problem yapısının ayrık ve çok modlu olduğu durumlarda bazı Pareto çözümlerini yakalamak zorlaşabilmektedir (Deng et al., 2018; Leng et al., 2016; Mert and Özçelik, 2012). Evrimsel algoritmalar, bu tür karmaşık problemlerde daha esnek çözümler sunmaktadır. NSGA-II, MOEA/D ve benzeri algoritmalar, tek bir çalıştırmada daha geniş ve dağıtılmış bir Pareto çözüm kümesi sağlayabilmektedir. Özellikle enerji sistemlerinde, çok sayıda teknoloji seçeneği, kesikli karar değişkenleri ve doğrusal olmayan kısıtlar bulunduğu bu algoritmalar sıkça tercih edilmektedir (Rahat et al., 2018; Shen et al., 2015; Widaningsih et al., 2021). Algoritma performansı, parametre ayarları, durdurma kriterleri ve çeşitlilik–yoğunlaşma dengesi gibi faktörlere bağlı olup, bu tür çalışmaların söz konusu parametreleri açıkça raporlaması önem kazanmaktadır (Deng et al., 2018; Rahat et al., 2018).

Bu yaklaşımlar özellikle hidrojen tabanlı enerji sistemlerinde daha da etkili hale gelmektedir. Hidrojen entegrasyonu enerji sistemlerini doğal olarak çok amaçlı optimizasyon sorunları haline getirmektedir. Bu sistemlerde, LCOH, emisyon azaltımı, yenilenebilir enerji kullanımı ve sistem güvenilirliği gibi hedefler eş zamanlı olarak dikkate alınmaktadır (Schram et al., 2020; Shidhani et al., 2020). Elektrolizör işletimi, enerji depolama ve şebeke etkileşimleri zaman boyutuna bağlı olarak gerçekleşmektedir; bu durum, sistem performansının yalnızca tasarım parametreleriyle değil, aynı zamanda işletme stratejileriyle de belirlendiğini göstermektedir. Bu durum, enerji sistemlerinde maliyet ve emisyon karşılaştırmalarının ötesinde daha karmaşık ödünleşme ilişkilerinin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir (Lahijanian et al., 2016; Mert and Özçelik, 2012). Bu nedenle, çok amaçlı optimizasyon yöntemi hidrojen tabanlı enerji sistemlerinde hem sistemin boyutlandırılmasını hem de operasyonel stratejilerin birlikte analiz edilmesine imkan sağlamaktadır (Schram et al., 2020; Shidhani et al., 2020).

### **2.11 NSGA-III: Kuramsal Temel ve Enerji Sistemleri Uygulamaları**

Evrimsel algoritmalar (EA), biyolojik evrim prensiplerinden esinlenen ve popülasyon tabanlı arama teknikleri kullanan optimizasyon metodlarıdır. Bu yöntemler, aday çözümlerin bir popülasyon haline getirilip, seçilme, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerle tekrar tekrar geliştirilmesine dayanmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, bu yaklaşım tek bir çözüm yerine Pareto-uygun çözümler kümesi üretmesiyle dikkate değer bir avantaj sağlamaktadır.

Enerji sistemlerinin optimizasyon problemlerinde olduğu gibi, birden fazla çatışan hedefin bulunduğu problemlerde evrimsel algoritmalar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu tür sorunlarda maliyet, emisyon, sistem güvenilirliği ve yenilenebilir enerji oranı gibi hedefler aynı anda göz önünde bulundurulmaktadır. NSGA-III, NSGA-II'nin kuramsal temelini genişleterek özellikle üçten fazla hedefi olan çok amaçlı optimizasyonlar için geliştirilmiştir. Literatürde, NSGA-III'ün yüksek boyutlu hedef uzaylarında daha dengeli Pareto çözüm kümeleri sağlayabildiği ve klasik baskınlık ilişkilerinin zayıfladığı durumlarda seçim mekanizmasını daha verimli hale getirdiği belirtilmektedir (Foutsitzi et al., 2022; Liu et al., 2021; Mohamed et al., 2019; Subramanian et al., 2021). Enerji sistemleri bağlamında maliyet, emisyon, güvenilirlik ve yenilenebilir enerji oranı gibi çeşitli hedeflerin aynı anda dikkate alındığı çalışmalar, NSGA-III algoritmasının etkin bir optimizasyon aracı olarak kullanıldığını göstermektedir (Abubakar et al., 2022; Ranjbar et al., 2025; Tong et al., 2021). Bu genel çerçeve içerisinde, NSGA-III algoritmasının temel çalışma mekanizmasını anlamak için baskın olmayan sıralama yapısının incelenmesi gerekmektedir. NSGA-III'ün temel bileşenlerinden biri, baskın olmayan sıralama mekanizmasıdır. Bu yöntem, çözümleri Pareto dominans ilişkisine göre katmanlara ayırır. Hiçbir çözüm tarafından domine edilmeyenler ilk Pareto önyüzünde bulunurken, diğer çözümler baskınlık ilişkileri temelinde sonraki katmanlara dağıtılmaktadır. Bu yapı, algoritmanın Pareto yüzeyine yakınsamasını destekler ve elit çözümlerin korunmasını sağlamaktadır. Ancak hedef sayısı arttığında klasik baskınlık ilişkilerinin ayırt edici gücü azalır ve çoğu çözüm aynı front içinde yer alabilmektedir. NSGA-III, referans noktalarıyla desteklenen seçim mekanizmasıyla bu sorunu aşmayı amaçlamaktadır (Foutsitzi et al., 2022; Liu et al., 2021; Mohamed et al., 2019).

Bu noktada, klasik baskınlık temelli yaklaşımın yetersiz kaldığı durumlarda çözüm çeşitliliğini korumak amacıyla referans noktası mekanizması devreye girmektedir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto cephesinin etkin bir şekilde temsil edilebilmesi, yalnızca en iyi çözümlerin bulunmasına değil, aynı zamanda çözüm çeşitliliğinin korunmasına da bağlıdır. Bu nedenle, NSGA-III algoritmasında referans noktaları kullanılarak çözüm uzayının dengeli bir biçimde örneklenmesi hedeflenmektedir. NSGA-III'ü NSGA-II'den ayıran ana özellik, referans noktası tabanlı seçim yöntemidir. Bu yöntemde, hedef uzayında önceden belirlenmiş referans doğrultuları kullanılarak çözümler bu doğrultularla ilişkilendirilmektedir. Seçim sırasında, özellikle az temsil edilen bölgelerdeki çözümlere öncelik verilerek Pareto yüzeyinde daha dengeli bir dağılım

sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu yaklaşım, yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinde çözüm çeşitliliğinin korunmasını kolaylaştırmaktadır. Literatürde, referans noktası mekanizmasının çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto ön yüzünün daha homojen bir şekilde temsil edilmesine dikkate değer katkılar sağladığı vurgulanmaktadır (Foutsitzi et al., 2022; Liu et al., 2021; Mohamed et al., 2019; Subramanian et al., 2021). Enerji sistemleri ve entegre hidrojen altyapısı gibi karmaşık sorunlarda, referans noktalarının problem özelliklerine göre ayarlanabildiği ve bunun performansı doğrudan etkileyebileceği rapor edilmiştir (Ji et al., 2025; Miao et al., 2025; Yang and Li, 2024; Zhao et al., 2024).

Referans noktalarına dayalı bu yaklaşım, aynı zamanda çözüm çeşitliliğinin korunması ve elitizm mekanizmasının etkin şekilde uygulanmasını da mümkün kılmaktadır. NSGA-III'te çeşitliğin korunması doğrudan referans noktalarıyla sağlanmaktadır. Seçim aşamasında her referans doğrultusunun olabildiğince temsil edilmesi amaçlanmaktadır. Böylece, Pareto ön yüzünde sadece uç çözümler değil, aynı zamanda farklı uzlaşım seviyelerini gösteren ara çözümler de muhafaza edilebilmektedir. Yöntem aynı zamanda elitizm ilkesiyle çalışmakta olup önceki nesillerdeki yüksek kaliteli çözümler yeni nesillere aktarılıp çözüm kalitesi korunmaktadır. Literatürde özellikle üçten fazla hedef içeren problemlerde, NSGA-III'ün çözüm çeşitliliği açısından NSGA-II'ye göre daha dengeli sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Foutsitzi et al., 2022; Liu et al., 2021; Subramanian et al., 2021).

Tüm bu teorik özellikler, NSGA-III algoritmasının enerji ve hidrojen sistemleri gibi çok kriterli mühendislik problemlerindeki uygulama başarısını doğrudan açıklamaktadır. Yenilenebilir enerji ve hidrojen temelli enerji sistemlerinin optimizasyon sorunları genellikle iki amaçla sınırlı kalmamaktadır. Sistem tasarımında yalnızca maliyetleri azaltmak değil, aynı zamanda emisyonları düşürmek, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak, sistemin güvenilirliği ve enerji verimliliği gibi hedefler de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu bağlamda, NSGA-III, Pareto öncüsünde dengeli ve geniş çözüm yelpazeleri sağlayabilmesi sayesinde karar vericilere çeşitli uzlaşım seçenekleri sunmaktadır (Jena et al., 2022; Subramanian et al., 2021; Yang and Li, 2024; Zhao et al., 2024). Mikroşebeke boyutlandırması ve hibrit PV-rüzgâr sistemlerinin optimizasyonu konusundaki çalışmalar, NSGA-türevli yöntemlerin maliyet, emisyon ve güvenilirlik hedeflerini aynı anda etkili şekilde optimize edebildiğini ortaya koymaktadır (Niu et al., 2023). Benzer şekilde, hidrojen depolama ve çeşitli enerji akışlarını içeren entegre enerji sistemlerinde,

NSGA-III'ün çok amaçlı yapısının dikkate değer faydalar sağladığı ifade edilmektedir (Ma et al., 2022; Yang and Li, 2024; Zhang et al., 2022).

## **2.12 MOPSO Algoritması: Kuramsal Temel ve Enerji Sistemleri Uygulamaları**

Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (MOPSO), sürü zekâsı teorisine dayanarak, birden fazla çatışan hedefin aynı anda optimize edilmesini sağlayan meta-sezgisel bir yöntemdir. Sürü zekâsı yaklaşımı, çok sayıda basit ajanın yerel bilgiler ve sınırlı etkileşimlerle kolektif ve organize davranışlar gösterebileceğini savunmaktadır. Bu yönüyle, özellikle karmaşık arama alanlarında küresel çözüm bölgelerinin keşfedilmesini kolaylaştırmaktadır.

MOPSO'da her parçacık, çözüm uzayında bir aday çözüm temsil etmekte olup kendi deneyiminden ve sürünün kolektif bilgisinden faydalanarak konumunu güncellemektedir. Bu yapı, keşif ve sömürü süreçleri arasında denge kurarak, çok boyutlu optimizasyon problemlerinde etkili bir arama yöntemi sağlamaktadır (Britto and Pozo, 2012; Nebro et al., 2009; Yin et al., 2023).

Sürü tabanlı optimizasyon yöntemlerinin dikkate değer avantajlarından biri, küresel arama kapasitesini yerel bilgiyle desteklenen karar mekanizmalarıyla sürdürebilmesidir. Bu özellik, enerji sistemleri, hidrolojik modeller ve çevresel planlama gibi çeşitli değişken ve kısıt içeren karmaşık sistemlerde uygulanabilirliği artırmaktadır. HydroMOPSO yaklaşımı ise, hidrolik ve çevresel modellerin çok amaçlı kalibrasyonunda sürü temelli optimizasyon tekniklerinin etkinliğini ortaya koyan dikkate değer örneklerden birini oluşturmaktadır (Marinao-Rivas and Zambrano-Bigiarini, 2022). Bu temel yapı doğrultusunda, MOPSO algoritmasının çalışma prensibi büyük ölçüde parçacıkların hız ve konum güncelleme mekanizmasına dayanmaktadır. MOPSO'nun temel dinamiği, parçacıkların hız ve konum güncelleme mekanizmasına dayanmaktadır. Standart PSO yaklaşımında, bir parçacığın yeni hızı üç temel unsurun etkisiyle belirlenmektedir. Bunlar; önceki hız, kendi en iyi konumu (pbest) ve sürü lideri konumudur (gbest). Bu yapı, parçacıkların hem bireysel deneyimlerinden hem de sürünün kolektif bilgisinden faydalanarak hareket etmelerini sağlamaktadır. Çok amaçlı optimizasyon bağlamında ise, tek bir global en iyi çözüm yerine Pareto-optimal çözümler kümesi dikkate alınmaktadır. Bu nedenle genellikle baskın olmayan çözümlerden oluşan bir dış arşiv, lider çözümler olarak kullanılmaktadır (Britto and Pozo, 2012; Nebro et al., 2009; Yin et al., 2023).

SMPSO gibi varyantlarda hız sınırlandırması kullanılarak, parçacıkların aşırı salınım yapması ve çözüm uzayından kontrolsüz şekilde uzaklaşması engellenmektedir. Bu, Pareto ön sıralamasına daha stabil bir yakınsama sağlamaktadır (Nebro et al. 2009). Ayrıca, adaptif güncelleme stratejileri içeren DAMOPSO gibi yöntemler, yoğunluk tabanlı arama teknikleri ve parametre uyarlamalarıyla çözüm dağılımını geliştirmeyi hedeflemektedir (Zhang et al., 2024). Algoritmanın bu dinamik yapısı, aynı zamanda dış arşiv yönetimi ve çözüm çeşitliliği kavramlarını da etkili hale getirmektedir. MOPSO’da baskın olmayan çözümler genellikle bir dış arşiv içerisinde saklanmaktadır. Bu arşiv, Pareto ön yüzünün geçici bir temsili olarak görev yapar ve hem algoritmanın yakınsamasını yönlendirir hem de çözüm çeşitliliğini korumaktadır. SMPSO yaklaşımında arşiv boyutu sınırlandırılarak elit çözümler korunur ve çözüm yoğunluğu dengelenir (Nebro et al., 2009). Britto ve Pozo (2012), farklı arşiv yönetimi stratejilerinin yakınsama ve çözüm dağılımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve arşiv stratejisinin algoritma performansı açısından etkili bir rol oynadığını göstermiştir (Britto and Pozo, 2012).

Yoğunluk temelli arşiv güncelleme stratejileri DAMOPSO gibi yeni varyantlarda daha da geliştirilmiştir. HydroMOPSO uygulamalarında genetik operatörlerin arşiv mekanizması ile birlikte kullanılması Pareto ön yüzünün stabilitesini artırmıştır (Marinao-Rivas and Zambrano-Bigiarini, 2022; Zhang et al., 2024). Bu çalışmalar, dış arşivin yalnızca Pareto çözümlerini depolayan pasif bir yapı olmadığını, aynı zamanda algoritmanın arama yönünü ve çözüm çeşitliliğini şekillendiren aktif bir mekanizma olduğunu ortaya koymaktadır. Bu noktada, MOPSO’nun performansı değerlendirilirken yakınsama ve çözüm çeşitliliği arasındaki denge ön plana çıkmaktadır. MOPSO’nun performansı, büyük ölçüde Pareto ön yüzüne yakınsama hızı ile çözüm çeşitliliğinin korunması arasındaki dengeye bağlı bulunmaktadır. SMPSO’nun NSGA-II, SPEA2 ve OMOPSO gibi yöntemlerle karşılaştırıldığı araştırmalar, konverjans hızı ve çözüm dağılımı bakımından rekabetçi sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir (Nebro et al., 2009).

Yeni geliştirilen DAMOPSO ve TMMOPSO varyantları, adaptif parametre güncellemeleri ve gelişmiş arşiv yönetimi stratejileri sayesinde daha dengeli Pareto çözüm kümeleri sağlayabilmektedir (Liu et al., 2023a; Zhang et al., 2024). HydroMOPSO uygulamalarında, sınırlı hesaplama bütçesine rağmen bile kararlı ve geniş kapsamlı Pareto ön yüzleri elde edilmektedir (Marinao-Rivas and Zambrano-Bigiarini, 2022). Bu çalışmalar, yakınsama

performansının hız sınırlaması, lider seçimi ve arşiv yönetimi gibi algoritmik bileşenlerle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

MOPSO'nun bu performans özellikleri, genetik algoritma tabanlı yöntemlerle yapılan karşılaştırmalarla daha net ortaya konulmaktadır. MOPSO yöntemi, genetik algoritma tabanlı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları (örneğin NSGA-II, SPEA2) ile sıkça kıyaslanmaktadır. Bu karşılaştırmalar, MOPSO'nun özellikle yakınsama hızında ve çözüm üretme verimliliğinde güçlü performans gösterebildiğine işaret etmektedir (Nebro et al., 2009). Britto ve Pozo (2012) yoğunluk tabanlı arşivleme stratejileri sayesinde, MOPSO'nun bazı problem sınıflarında genetik algoritma tabanlı yöntemlere kıyasla rekabetçi ve hatta daha üstün sonuçlar elde ettiğini göstermiştir. Ancak, problem boyutu ve hedef sayısı arttıkça, her iki yöntemin performansı farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden, literatürde MOPSO ve genetik algoritma tabanlı yöntemlerin birbirini tamamlayan ve birlikte kullanılacak güçlü optimizasyon araçları olarak görülmesi önerilmektedir (Britto and Pozo, 2012; Li et al., 2011a; Nebro et al., 2009). Tüm bu teorik ve algoritmik özellikler, MOPSO'nun enerji ve hidrojen sistemlerindeki uygulamalarını doğrudan şekillendirmektedir. Enerji ve hidrojen sistemlerinin optimizasyon problemleri genellikle maliyet, emisyon, enerji güvenliği ve yenilenebilir enerji oranı gibi birden fazla hedefi içermektedir. Bu nedenle, çok amaçlı optimizasyon yöntemleri bu sistemlerin tasarım ve işletme analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. HydroMOPSO yaklaşımı, hidrolik ve çevresel modellerin çok amaçlı kalibrasyonunda NSGA-II ve NSGA-III ile karşılaştırılarak Pareto ön hattı stabilizasyonu açısından rekabetçi sonuçlar sergilemektedir (Marinao-Rivas and Zambrano-Bigiarini, 2022; Pantoja-García et al., 2019). PV mikroşebeke planlamasında kullanılan IMOPSO yaklaşımı, ekonomik maliyet, çevresel etki ve sistem güvenilirliği hedeflerini aynı anda optimize ederek dengeli Pareto çözümleri sağlamaktadır (Yu et al., 2025). Benzer şekilde, enerji geri kazanımına sahip elektromekanik sistem tasarımlarında da MOPSO'nun çok amaçlı dengeleme kabiliyetleri gösterilmektedir ve NSGA-II gibi diğer yöntemlerle karşılaştırmalı sonuçlar sağlanmaktadır (Fu et al., 2023). Bu çalışmalar, MOPSO'nun enerji ve hidrojen sistemlerinde tasarım ve operasyon kararlarını destekleyen verimli bir optimizasyon aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

### 2.13 NSGA-III ve MOPSO'nun enerji sistemleri optimizasyonunda karşılaştırılması

Enerji ve hidrojen sistemlerinin optimizasyon problemleri genellikle maliyet, emisyon, enerji güvenliği ve yenilenebilir enerji oranı gibi birden fazla hedefi içermektedir. Bu nedenle, çok amaçlı optimizasyon yöntemleri bu sistemlerin tasarım ve işletme analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. HydroMOPSO yaklaşımı, hidrolik ve çevresel modellerin çok amaçlı kalibrasyonunda NSGA-II ve NSGA-III ile karşılaştırılarak Pareto ön hattı stabilizasyonu açısından rekabetçi sonuçlar sergilemektedir (Marinao-Rivas and Zambrano-Bigiarini, 2022; Pantoja-García et al., 2019). PV mikroşebeke planlamasında kullanılan IMOPSO yaklaşımı, ekonomik maliyet, çevresel etki ve sistem güvenilirliği hedeflerini aynı anda optimize ederek dengeli Pareto çözümleri sağlamaktadır (Yu et al., 2025). Benzer şekilde, enerji geri kazanımına sahip elektromekanik sistem tasarımlarında da MOPSO'nun çok amaçlı dengeleme kabiliyetleri gösterilmektedir ve NSGA-II gibi diğer yöntemlerle karşılaştırmalı sonuçlar sağlanmaktadır (Fu et al., 2023). Bu çalışmalar, MOPSO'nun enerji ve hidrojen sistemlerinde tasarım ve operasyon kararlarını destekleyen verimli bir optimizasyon aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu genel çerçeve içerisinde, algoritmaların performansının değerlendirilmesinde en etkili unsurlardan biri yakınsama davranışdır. NSGA-III algoritması, baskın olmayan sıralama yöntemini referans vektörleriyle destekleyerek çok hedefli optimizasyon problemlerinde daha dengeli bir yakınsama sağlamaktadır. Referans doğruları, Pareto ön yüzünün çeşitli bölgelerinin temsil edilmesine yardımcı olur ve çözüm kümesinin sadece belli bir bölgede yoğunlaşmasını önlemektedir. Literatürde, özellikle hedef sayısının arttığı durumlarda, bu yöntemin NSGA-II algoritmasına kıyasla daha kararlı bir yakınsama sağlayabildiği belirtilmektedir (Hojjati et al., 2018; Saad et al., 2023; Vachhani et al., 2016).

MOPSO algoritmasında, yakınsama süreci parçacıkların hem bireysel deneyimlerini hem de sürünün kolektif deneyimini takip etmeye dayanmaktadır. Bu mekanizma, çoğu durumda parçacıkların çözüm uzayında daha hızlı ilerlemesine imkan tanıyarak erken aşamalarda hızlı yakınsama sağlamaktadır. DSMOPSO gibi gelişmiş varyantlar ise, crowding-distance temelli elitizm ve dinamik lider seçimi mekanizmaları kullanarak yakınsama hızını ve Pareto çözümlerinin kalitesini artırmayı amaçlamaktadır (Li et al., 2010; Tripathi et al., 2007).

Bununla birlikte, literatürde farklı sonuçların rapor edildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bazı enerji sistemi optimizasyon uygulamalarında NSGA-II veya NSGA-III

algoritmalarının MOPSO yöntemine kıyasla daha dengeli bir Pareto kapsamı sağlayabildiği belirtilmektedir (Hojjati et al., 2018; Hu et al., 2017). Bu durum yakınsama performansının yalnızca algoritma türüne değil, aynı zamanda problem yapısı ve hedef sayısına da bağlı olduğunu göstermektedir.

Yakınsama performansının yanı sıra, Pareto ön yüzü çeşitliliği de algoritma başarısını belirleyen bir diğer temel kriter olarak öne çıkmaktadır. Pareto ön yüzü çeşitliliği, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde dikkate değer bir kalite göstergesi olarak kabul edilmektedir. Optimizasyon algoritmalarının başarısı yalnızca Pareto ön yüzüne yakın çözümler üretmekle sınırlı değil, aynı zamanda bu çözümlerin hedef uzayında dengeli ve geniş dağılımını sağlayabilmesine bağlıdır. Özellikle enerji sistemleri gibi karmaşık tekno-ekonomik uygulamalarda, farklı politika seçenekleri veya tasarım stratejilerinin değerlendirilmesi için geniş ve dengeli bir çözüm kümesi elde etmek büyük önem taşımaktadır. NSGA-III algoritması, çözüm kümesini hedef uzayında daha homojen şekilde yaymak amacıyla referans vektörleri kullanmaktadır. Bu vektörler, Pareto ön yüzünün farklı bölgelerini temsil eder ve algoritmanın belirli bölgelerde yoğunlaşmasını engeller. Literatürde, bu metodun özellikle çok sayıda hedef içeren optimizasyonlarda Pareto ön yüzünün dengeli temsil edilmesine katkı sağladığı belirtilmektedir (Hilawie and Shewarega, 2023; Hu et al., 2017; Pires et al., 2013).

MOPSO algoritmasında, çözüm çeşitliliği genellikle dış arşiv yönetimi ve yoğunluk temelli mekanizmalar aracılığıyla korunmaktadır. Bu yöntemde Pareto-optimal çözümler bir arşivde tutulularak yeni çözümler, arşivdeki yoğunluk bilgisine göre seçilmektedir. DSMOPSO ve TV-MOPSO gibi gelişmiş varyantlar ise dinamik parametre ayarları ve gelişmiş arşiv stratejileri kullanarak Pareto çözüm kümesinin çeşitliliğini artırmayı amaçlamaktadır (Li et al., 2011b; Tripathi et al., 2007).

Karşılaştırmalı çalışmalar, NSGA-III algoritmasının Pareto ön yüzünü daha iyi kapsadığını ve daha dengeli bir çözüm dağılımı sağladığını gösterirken, MOPSO algoritmasının bazı çözüm bölgelerinde daha hızlı ve etkili çözümler bulabildiğini de ortaya koymaktadır (Fallah-Mehdipour et al., 2010; Saad et al., 2023).

Algoritma performansının değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken bir diğer dikkate değer boyut ise hesaplama maliyeti ve karmaşıklığıdır. NSGA-III algoritmasında hesaplama

maliyetleri büyük ölçüde baskın olmayan sıralama (non-dominated sorting) işlemleri ve referans vektörlerine dayalı seçim mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Popülasyon ve hedef sayısı arttıkça, bu süreçlerin hesaplama yükü de artabilmektedir. Özellikle yüksek boyutlu çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, referans noktalarının sayısındaki artış algoritmanın hesaplama karmaşıklığını doğrudan etkileyebilmektedir (Saad et al., 2023; Xu et al., 2022).

MOPSO algoritmasında hesaplama maliyeti genellikle parçacık sayısı, iterasyonlar ve dış arşiv yönetimiyle ilgilidir. Parçacıkların konum ve hız güncellemeleri görece basit matematiksel işlemlerden oluştuğundan, bazı araştırmalarda özellikle iki veya üç hedefli optimizasyon problemlerinde, MOPSO'nun NSGA-II veya NSGA-III algoritmalarına kıyasla daha düşük hesaplama maliyetine rağmen benzer performans gösterebildiği bildirilmektedir (Fallah-Mehdipour et al., 2010; Tripathi et al., 2007).

Enerji sistemleri optimizasyonu sırasında algoritma seçerken, yalnızca algoritmanın teorik karmaşıklığı değil, aynı zamanda amaç fonksiyonlarının hesaplama maliyeti de dikkate alınmalıdır. Özellikle simülasyon tabanlı enerji sistemi modellerinde her fitness değerlendirmesi, karmaşık model hesaplamalarını gerektirebilmekte ve bu da toplam optimizasyon süresini dikkate değer ölçüde uzatabilmektedir (Li et al., 2011b). Bu nedenle, çok amaçlı enerji sistemi optimizasyon çalışmalarında algoritmanın performansı incelenirken hem algoritmanın karmaşıklığı hem de model değerlendirme maliyetinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Tüm bu değerlendirmeler, algoritma seçiminin uygulama alanına bağlı olarak yapılması gerektiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji ve hidrojen sistemleri, çeşitli teknik ve ekonomik hedefleri aynı anda göz önüne almayı gerektiren karmaşık optimizasyon problemleri içermektedir. Bu sistemlerde maliyet, karbon emisyonları, yenilenebilir enerji kullanım oranı, altyapı ihtiyaçları ve sistem güvenilirliği gibi farklı hedefler birlikte dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, enerji sistemlerinin optimizasyonunda genellikle çok amaçlı yöntemler kullanılmaktadır. NSGA-III algoritması, referans vektörleri sayesinde Pareto ön yüzünü dengeli şekilde temsil ederek farklı tasarım seçeneklerinin karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Özellikle uç çözümlerin korunması ve “en düşük maliyet” ile “en düşük emisyon” gibi çeşitli hedeflerin aynı çözüm kümesi içinde birlikte değerlendirilmesini kolaylaştırır (Saad et al., 2023).

MOPSO algoritması, hızlı yakınsama özelliği sayesinde birçok tasarım senaryosunun daha kısa sürede analiz edilmesine imkan vermektedir. Bu nedenle, tekno-ekonomik hidrojen sistemleri üzerinde duyarlılık analizleri veya geniş senaryo taramaları yaparken tercih edilen avantajlı bir optimizasyon yöntemidir (Li et al., 2011b).

Literatürde, NSGA-III ve MOPSO algoritmaları arasında kesin bir üstünlük olduğuna dair genel bir görüş bulunmamaktadır. NSGA-III, özellikle çok sayıda hedef içeren optimizasyon problemlerinde Pareto ön yüzü çeşitliliğini daha dengeli şekilde koruyabilmektedir. Öte yandan, MOPSO algoritması, daha hızlı arama dinamiği sayesinde bazı problemlerde daha kısa sürede rekabetçi çözümler sunabilmektedir. Bu nedenle, enerji sistemi optimizasyonunda kullanılacak algoritmanın seçimi, problem yapısı, hedef sayısı, model karmaşıklığı ve hesaplama bütçesi gibi faktörlere göre değişebilmektedir. NSGA-III ve MOPSO algoritmalarının çok amaçlı enerji sistemleri optimizasyonundaki temel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2.3:** NSGA-III ve MOPSO algoritmalarının çok amaçlı enerji sistemi optimizasyonu açısından temel özelliklerinin karşılaştırılması.

ÖZELLİK	NSGA-III	MOPSO
<b>Algoritma Türü</b>	Evrimsel algoritma	Sürü zekâsı
<b>Arama Stratejisi</b>	Referans vektör tabanlı	Parçacık sürüsü
<b>Çeşitlilik Kontrolü</b>	Referans noktaları	Dış arşiv ve yoğunluk
<b>Konverjans</b>	Dengeli ve stabil	Hızlı
<b>Çok Amaçlı Problemler</b>	Çok güçlü	Orta
<b>Hesaplama Maliyeti</b>	Orta-yüksek	Genelde daha düşük
<b>Enerji Sistemi Uygulamaları</b>	Pareto analiz	Senaryo tarama

## 2.14 Pareto Ön Yüzü Analizi ve Sonuçlandırma Kararları: Teorik Çerçeve

### 2.14.1 Pareto ön yüzünün karar verme sürecindeki rolü

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde (MOO) tek bir optimal çözüm genellikle mümkün görünmemektedir. Bunun yerine, çatışan hedefler arasındaki çeşitli denge noktalarını temsil eden baskın olmayan çözümler kümesi elde edilmektedir. Bu küme Pareto ön yüzü olarak bilinmektedir. Pareto ön yüzündeki her çözüm, en az bir hedefte daha iyi olmakla birlikte diğer hedeflerde daha kötü olan başka bir çözüm tarafından domine edilmemektedir. Bu yüzden, çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının sonucu genellikle tek bir çözüm değil,

farklı tasarım alternatiflerini yansıtan bir çözüm kümesidir. Pareto ön yüzü analizi, sadece teknik bir çıktı olmaktan öte, aynı zamanda karar verme sürecinin dikkate değer bir parçası olarak görülmektedir. Literatürde, Pareto analizi yalnızca algoritma performansını değerlendirmekle sınırlı kalmaz, aynı zamanda karar vericilere farklı tasarım seçenekleri arasında seçim yapma imkânı sunan bir karar destek aracı olarak görev yapar. Bu çerçevede, diz analizi, hypervolume (HV) göstergesi ve çözüm çeşitliliği metrikleri gibi yöntemler, Pareto çözüm kümesinin yapısını incelemek ve farklı alternatifleri yorumlamak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır (Deb et al., 2002; Jiang et al., 2014; Wu and Azarm, 2000).

Pareto ön yüzündeki en etkili bölgelerden biri, diz noktası veya diz bölgesi olarak adlandırılan alanlardır. Bu nokta, farklı hedefler arasındaki takas oranının (ödünleşme) ani şekilde arttığı noktayı temsil etmektedir. Başka bir deyişle, bu noktada küçük bir hedef gelişimi, diğer hedeflerde dikkate değer kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle diz noktası, hedefler arasındaki dengeyi gösteren etkili bir çözüm bölgesi olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, diz bölgesi çoğu uygulamada en dengeli uzlaşım çözümlerini temsil eden adaylar olarak görülür. Pareto ön yüzünün uç noktalarında yer alan çözümler genellikle tek bir hedefi aşırı optimize ederken, diz bölgesinde bulunan çözümler farklı hedefler arasında daha dengeli bir performans sağlamaktadır. Özellikle enerji sistemleri optimizasyonunda, maliyet-emisyon veya maliyet-yenilenebilir enerji oranı gibi hedeflerin birlikte ele alındığı çalışmalar bu duruma dikkate değer katkılar sağlamaktadır. Ancak bazı durumlarda, Pareto ön yüzünün geometrik yapısı nedeniyle diz noktası net biçimde tanımlanamayabilir veya birden fazla diz bölgesi oluşabilir. Bu tür durumlarda, diz yaklaşımının tek başına yeterli olmayabileceği ve karar vericilerin tercihleri ile sistem gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır (Batista et al., 2011; Deb et al., 2002; Jiang et al., 2014).

Pareto ön yüzünün kalitesini ölçmede en dikkate değer gösterge hypervolume (HV) olup, bu gösterge, Pareto çözüm kümesinin belirli bir referans noktasına göre kapsadığı çok boyutlu hacmi ölçmektedir. HV, aynı anda Pareto ön yüzünün gerçek optimuma yakınlığı (kapanma) ve çözümlerin yüzey boyunca yayılımını (çeşitlilik) dikkate alır. Bu nedenle, HV göstergesi literatürde farklı algoritmalar tarafından elde edilen Pareto çözüm kümelerinin karşılaştırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, HV değeri seçilen referans noktasına duyarlıdır ve hedef sayısı artarken hesaplama maliyeti dikkate değer ölçüde yükselmektedir. Ayrıca, bazı durumlarda çözümlerin belirli bölgelerde yoğunlaşması

HV'nin gerçekte olduğundan daha yüksek görünmesine neden olabilmektedir. Bu sebeple, HV göstergesinin çoğu zaman spread veya yoğunluk temelli çeşitlilik ölçütleriyle birlikte kullanılması önerilmektedir (Coelho et al., 2010; Jiang et al., 2014; Kumar et al., 2008).

Pareto ön yüzünün kalitesini belirleyen dikkate değer unsurlardan biri, çözümlerin ön yüz boyunca ne kadar dengeli dağıldığıdır. Spread, crowding distance ve benzeri yoğunluk temelli metrikler, çözümlerin Pareto ön yüzündeki dağılımını inceleyerek, algoritmanın bazı bölgelerde yoğunlaşp yoğunlaşmadığını tespit etmede kullanılmaktadır. Dengeli bir çözüm dağılımı, karar vericilere daha çeşitli seçenekler sunar ve optimizasyonun sadece belirli bir bölgede sınırlı kalmadığını gösterir. Örneğin, NSGA-II algoritmasında kullanılan crowding-distance mekanizması, çözümlerin Pareto ön yüzü boyunca dengeli biçimde yayılmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Deb et al., 2002). Ayrıca, çeşitlilik ölçütleri yalnızca iyi bir optimizasyon performansını garanti etmeyip, çözümleri geniş bir alana yayılabilmektedir, fakat gerçek Pareto ön yüzüne yeterince yakın olamamaktadır. Bu yüzden, çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında yakınsama ve çeşitlilik ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır (Jiang et al., 2014; Phonrattanasak and Leeprechanon, 2016).

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin uygulamalarında genellikle Pareto ön yüzü içindeki çözümlerden tek bir tanesini seçmek gerekmektedir. Bu işlem, uzlaşım çözümü seçimi olarak bilinmektedir. Uzlaşım çözümünün belirlenmesi, hedefler arasındaki kabul edilebilir ödünleri veya karar vericinin tercihlerini dikkate alan bir post-optimizasyon problemidir. Literatürde, uzlaşım çözümü bulmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında değer fonksiyonuna dayalı yaklaşımlar, tercih tabanlı teknikler ve kriter temelli sıralama yöntemleri bulunmaktadır (Mohamed and Otero, 2022; Qin et al., 2009; Sardahi and Sun, 2016). Ayrıca, decomposition temelli optimizasyon algoritmaları (örneğin MOEA/D), karar verici tercihlerini doğrudan optimizasyon sürecine entegre etmek için ağırlık vektörlerini kullanma imkânı sağlamaktadır (Phonrattanasak and Leeprechanon, 2016). Bu yaklaşımlar, Pareto çözüm kümesinde bulunan alternatifler arasından karar vericinin önceliklerine en uygun olanı belirlemeye yardımcı olan etkili karar destek araçları olarak görülmektedir.

Bu çerçeve, özellikle birden fazla performans kriterinin eş zamanlı olarak değerlendirildiği enerji sistemleri optimizasyon problemlerinde doğrudan uygulama alanı bulmaktadır. Bu

bağlamda, enerji sistemleri optimizasyonunda Pareto ön yüzü analizi, maliyet, emisyon, yenilenebilir enerji oranı ve sistem güvenilirliği gibi çeşitli hedefleri birlikte değerlendiren çalışmalar için dikkate değer bir karar destek yöntemidir. Yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim sistemlerinde düşük maliyetli çözümler genellikle daha düşük yenilenebilir enerji kullanım oranına sahip olurken, daha yüksek yenilenebilir enerji oranları ise çoğunlukla daha yüksek yatırım maliyetleri gerektirmektedir.

Pareto ön yüzü analizi, ödünleşme ilişkilerini görünür hale getirerek farklı tasarım seçeneklerinin sistematik karşılaştırmasını sağlayabilir. Diz-point yaklaşımı, dengeli uzlaşım çözümlerini belirlerken, hypervolume ve çeşitlilik metrikleri ise elde edilen Pareto çözüm kümelerinin kalitesini değerlendirmede kullanılmaktadır (Jiang et al., 2014; Savsani et al., 2017). Bu bağlamda, Pareto analizi, çok amaçlı optimizasyon sonuçlarının karar destek sürecine dönüştürülmesinde etkili öneme sahiptir. Diz-point yöntemi uzlaşım bölgelerini tanımlarken, hypervolume çözüm kümesinin genel kalitesini ölçer ve çeşitli metrikler ise çözümlerin Pareto ön yüzü boyunca temsil gücünü analiz etmektedir. Bu göstergelerin birlikte kullanılması, Pareto çözüm kümesinin sadece teknik bir çıktı olmanın ötesine geçip, karar vericilere anlamlı ve savunulabilir alternatifler sunmasını sağlamaktadır. Enerji ve hidrojen sistemleri gibi çok kriterli tasarım problemlerinde, bu yaklaşım maliyet, emisyon ve yenilenebilir enerji oranı gibi hedefler arasındaki dengeyi daha net göstererek karar süreçlerinin şeffaflığını ve analitik temellerini güçlendirir.

### **2.15 Mekânsal, tekno-ekonomik ve optimizasyon tabanlı hidrojen çalışmaları**

Yenilenebilir enerji (RES) ve hidrojen sistemleri alanındaki karar verme süreçleri, giderek daha fazla şekilde üç temel analitik katman üzerinden incelenmektedir: mekânsal uygunluk ve saha seçimleri, tekno-ekonomik analiz (TEA) ile maliyet ve performansın sayısallaştırılması ve çok amaçlı optimizasyon aracılığıyla farklı hedefler arasındaki ödünleşimlerin Pareto düzleminde değerlendirilmesi. Literatür, bu üç unsurun birlikte ele alındığı bütünlük yaklaşımının karar kalitesini anlamlı ölçüde artırdığını göstermektedir. Ancak, mevcut çalışmaların büyük bölümü bu katmanlardan sadece ikisini kapsamlı şekilde birleştirmekte, üçüncü katmanı ise ikincil bir analiz bileşeni olarak görmektedir (Imam et al., 2024; Khan et al., 2022; O'Connell et al., 2023). Bu durum, özellikle hidrojen üretim sistemleri gibi mekânsal, ekonomik ve operasyonel faktörlerin aynı anda dikkate alınmasını gerektiren yatırımlarda, yöntemsellik ile ilgili bir parçalanma sorununa işaret etmektedir (Bösch and Rathmann, 2018; O'Connell et al., 2023).

Mekânsal analiz literatüründe CBS tabanlı yöntemler, yenilenebilir enerji ve hidrojen altyapılarının teknik olarak uygun alanlardan pratik olarak kullanılabilir bölgelere indirilmesini sağlamaktadır. Arazi kullanımı, kaynak potansiyeli, yerleşim sınırlamaları, korunan alanlar ve altyapı erişimi gibi çeşitli katmanların ortak şekilde değerlendirilmesi, sahayı sadece bir coğrafi konum olmaktan çıkarıp doğrudan karar verme sürecine katkıda bulunan bir faktör haline getirmektedir (Imam et al., 2024; Khan et al., 2022; O’Connell et al., 2023). Ancak literatürde mekânsal analizlerin sosyal ve ekonomik parametrelerle tam entegre edilmediği görülmektedir. Özellikle, bu değişkenlerin modelde kriter, kısıt veya senaryo olarak nasıl temsil edildiği konusunda çeşitli çalışmalar arasında belirgin farklılıklar mevcuttur. Bu durum, mekânsal uygunluk sonuçlarının pratikte kullanılabilirliği açısından dikkate değer bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Bösch and Rathmann, 2018; O’Connell et al., 2023).

Tekno-ekonomik analiz literatüründe, hibrit enerji sistemlerinin performans ve maliyet analizleri genellikle HOMER ve benzeri modelleme araçları kullanılarak yapılmaktadır (Aziz, 2017; Babatunde et al., 2020; Shams and Ahmadi, 2021). Ancak hidrojen üretim ve dağıtım sistemleri söz konusu olduğunda, TEA sadece üretim maliyetini hesaplamayla sınırlı değildir. Depolama yöntemleri, taşıma altyapısı, lojistik mesafeler ve tedarik zinciri kararları da maliyet yapısının vazgeçilmez parçalarıdır (Bekhti, 2025; Grant et al., 2024; Yang et al., 2025a). Bu nedenle, TEA’nın ortalama veya temsili parametrelerle değil, sahaya özgü maliyet ve altyapı koşullarıyla birlikte ele alınması gerekmektedir. Özellikle lojistik mesafe ve altyapı erişimi gibi mekâna duyarlı faktörler maliyetleri dikkate değer ölçüde etkileyebildiğinden, mekânsal analiz ile TEA arasındaki ilişkinin model yapısı içinde doğrudan kurulması büyük önem taşımaktadır (Imam et al., 2024; Khan et al., 2022; O’Connell et al., 2023).

Enerji sistemleri literatüründe üçüncü dikkate değer katman olan çok amaçlı optimizasyon, maliyet, emisyon, güvenilirlik ve yenilenebilir enerji oranı gibi çelişen hedeflerin aynı anda göz önüne alınmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, yalnızca bir “en iyi çözüm” değil, farklı hedefler arasındaki ödünleşimleri sergileyen Pareto çözüm kümeleri sunarak karar vericilerin çeşitli tasarım alternatiflerini daha kapsamlı değerlendirmesine imkân tanımaktadır (Carapellese et al., 2024; Grant et al., 2024; Mansir et al., 2024). Bununla birlikte, literatürde optimizasyon modellerinin mekânsal analizler ve tekno-ekonomik değerlendirmelerle tam entegrasyonu sağlayan çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bazı

araştırmalarda optimizasyon yöntemleri güçlü bir Şekilde kullanılırken, mekânsal değişkenler sınırlı biĉimde temsil edilmektedir. Diğer yandan, mekânsal uygunluk analizleri detaylı yapılmakla birlikte, optimizasyon hedefleri genellikle dar bir kapsamda ele alınmaktadır (Bekhti, 2025; Filipiĉ and Lorencin, 2012; Khan et al., 2022; O’Connell et al., 2023).

Bu ĉalıřmalar birlikte incelendiğinde, literatürdeki en belirgin sınırlılıklardan birinin mekânsal heterojenliğin teknoekonomik modellere sistematik Şekilde entegre edilememesi olduğu ortaya ĉıkmaktadır. ĉoęu ĉalıřmada, kaynak profili, altyapı erişimi, lojistik mesafe ve pazar yakınlığı gibi mekânsal değişkenler, modelin temel parametreleri yerine, daha ĉok sonradan eklenen senaryo bileşenleri olarak görülmektedir. Bu durum, sahaya zge maliyet yapılarını yeterince yansımada yatırım kararlarının ortalama parametreler üzerinden alınmasına neden olabilmektedir (Bendicho 2021; Cervi et al. 2019; Karras, Brosowski ve Thrn 2022; Villabona, Duden).

Literatürde ne ĉıkan diğer bir sınırlılık, belirsizlik ve sağlamlık analizlerinin ĉoęu ĉalıřmada sınırlı bir ĉerĉevede ele alınmasıdır. Talep, teknoloji performansı, maliyet parametreleri ve politika koşulları gibi değişkenlerin enerji sistemlerinin ekonomik başarısını dikkate değer lĉde etkilediği bilinmekle birlikte, birĉok modelde bu belirsizliklerin yalnızca tek bir senaryo üzerinden incelendiği gözlemlenmektedir (Hong and Apolinario, 2021; Sarhan et al., 2021). Ancak, ĉoęu belirsizliğin genellikle birlikte ve etkileşim halinde ortaya ĉıktıęı bilinmektedir. Bu nedenle, belirsizliklerin sistematik olarak modellenmemesi, belirli varsayımlarla en iyi görünen ĉzmlerin farklı durumlarda hızla etkinliğini kaybetmesine yol aĉabilmektedir (Hong and Apolinario, 2021; Kim, 2026).

Politika duyarlılığı, literatürde yeterince bütünleşik Şekilde ele alınmayan dikkate değer bir boyutu teşkil etmektedir. Teşvik mekanizmaları, vergi politikaları, karbon fiyatlandırması ve enerji tarifeleri, hidrojen ve yenilenebilir enerji yatırımlarının ekonomik fizibilitesi üzerinde doğrudan etkili faktörlerdir. Ancak, birĉok araştırmada politika değişkenleri teknik ve ekonomik modellerden ayrışık olarak incelenmekte, yalnızca karşılaştırmalı senaryo analizleriyle değerlendirilmektedir (Darwisman, 2025; Pompodakis et al., 2024; Streimikis, 2026). Bu yöntem, teknik performans ile kurumsal ve ekonomik koşullar arasındaki etkileşimin zayıf bir Şekilde yansıtılmasına neden olabilmektedir (Johanning et al., 2024; Streimikis, 2026).

Son olarak, mekânsal karar verme alanında CBS tabanlı çok kriterli karar verme yöntemlerinin yaygın şekilde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Ancak, bu yöntemlerin tekno-ekonomik modelleme ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarıyla entegre edilmesi hâlâ sınırlı seviyededir (Johanning et al., 2024; Karras et al., 2022). Bu durum sadece hesaplama karmaşıklığından değil, veri çözünürlüğü, katmanlar arası tutarlılık ve zamansal ölçek farklılıkları gibi metodolojik zorluklardan da kaynaklanmaktadır (Cervi et al. 2019; Rinner 2024). Bu yüzden, mekânsal analiz, tekno-ekonomik modelleme ve çok amaçlı optimizasyonun bir arada kullanıldığı entegre yaklaşımlar, literatürde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Genel olarak literatür, mekânsal saha seçimi, tekno-ekonomik analiz ve çok amaçlı optimizasyonun birlikte ele alınmasının yenilenebilir enerji ve hidrojen sistemleri açısından sağlam bir analitik çerçeve sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, mekânsal heterojenliğin sistematik şekilde entegre edilmesi, belirsizlik ve dayanıklılık analizlerinin modele daha güçlü biçimde katılması, politika hassasiyetinin teknik ve ekonomik hedeflerle birlikte dikkate alınması ve CBS tabanlı karar destek sistemlerinin optimizasyon yaklaşımlarıyla entegre edilmesi, literatürde hâlâ dikkate değer araştırma alanları arasında yer almaktadır (Hong and Apolinario, 2021; Johanning et al., 2024; Karras et al., 2022; Streimikis, 2026). Bu boşlukların kapatılmasının, enerji ve hidrojen sistemleriyle ilgili karar destek modellerinin hem daha gerçekçi hem de daha uygulanabilir sonuçlar ortaya koymasına dikkate değer ölçüde katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Tablo 2.3, literatürdeki çalışmaların TEA/LCOH, yer seçimi ve optimizasyon boyutlarını karşılaştırarak, bu tezde geliştirilen bütünleşik karar destek yaklaşımının hangi araştırma boşluğunu doldurduğunu göstermektedir.

**Tablo 2.4:** Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemlerine ilişkin literatür sentezi

Referans	Bölge / ülke	Kullanılan yöntem	TEA analizi	Optimizasyon	Temel boşluk
(Akarsu ve Serdar Genç, 2022)	Kayseri, Türkiye	HOMER Pro simülasyon ve sistem optimizasyonu	Var; NPC ve LCOE analizi	Var; HOMER-NPC minimizasyonu	CBS yer seçimi, çok amaçlı optimizasyon, su/depolama/degradasyon ve politika duyarlılığı yoktur
(Hasan ve Genç, 2022)	Basra, Irak	Yer seçimi ve LCOE/LCOH analizi	Var; LCOE ve LCOH	Açık değil; senaryo kıyaslaması	CBS ve LCOH birlikte ele alınsa da optimizasyon, depolama, degradasyon ve politika analizi sınırlıdır
(Xu et al., 2020)	Aksay, Gansu, Çin	RL tabanlı NSGA-II ve CRITIC-TOPSIS	Var; LCOE ve sistem maliyeti	Var; RL tabanlı NSGA-II	Çok amaçlı optimizasyon güçlüdür; ancak CBS yer seçimi, su/depolama, degradasyon ve politika duyarlılığı yoktur
(Colangelo et al., 2024)	Brindisi, İtalya	RETSscreen Expert fizibilite analizi	Var; NPV, IRR ve H <sub>2</sub> satış fiyatı	Belirtilmemiş; kapasite senaryoları	TEA yapılmış olsa da CBS yer seçimi, saatlik dinamik simülasyon ve çok amaçlı optimizasyon yoktur
(Al Garni and Awasthi, 2017)	Suudi Arabistan	CBS-AHP tabanlı PV yer seçimi	Yok; yalnızca LSI	Belirtilmemiş; MCDA sıralaması	Mekânsal analiz vardır; ancak hidrojen üretimi ile bağlantı kurulmamıştır
(Rouzbahani et al., 2026)	Tahran, İran	CBS, ANP ve HOMER entegrasyonu	Var; LCOH, NPC ve CF	Var; HOMER optimizasyonu	CBS ve LCOH birlikte ele alınmıştır; ancak depolama, degradasyon ve politika analizi sınırlıdır
(Minutillo et al., 2021)	Güney İtalya	PV-şebeke tabanlı TEA	Var; LCOH, CAPEX, OPEX	Açık değil; kapasite/şebeke senaryoları	TEA/LCOH odaklıdır; CBS yer seçimi, çok amaçlı optimizasyon, su kaynağı ve degradasyon analizi yoktur
(Kakavand et al., 2023)	İran	HOMER Pro, boyutlandırma ve taşıma modeli	Var; LCOE, LCOH ve LCOA	Var; HOMER Pro	TEA ve taşıma boyutu vardır; ancak CBS-ÇKKV, NSGA-III/MOPSO, depolama kıyası, degradasyon ve politika duyarlılığı sınırlıdır
(Olabi et al., 2023)	Küresel derleme	H <sub>2</sub> üretim yöntemleri ve SDG ilişkisi	Yok; sistem bazlı TEA/LCOH yok	Yok	Derleme niteliğindedir; CBS, saatlik simülasyon, TEA/LCOH ve çok amaçlı optimizasyon modeli yoktur
(Wimhurst et al., 2023)	Küresel derleme	Rüzgâr yer uygunluğu ve CBS/MCDA incelemesi	Yok	Yok	Mekânsal yöntemleri inceler; ancak hidrojen, LCOH, depolama, politika ve optimizasyonla bütünlük değildir
(Mallapragada et al., 2020)	ABD, 1487 lokasyon	Python tabanlı tasarım ve işletme optimizasyonu	Var; LCOH	Var; boyutlandırma ve saatlik işletme optimizasyonu	Saatlik optimizasyon ve LCOH güçlü, ancak CBS-ÇKKV yer seçimi, su, degradasyon ve politika duyarlılığı sınırlıdır

**Tablo 2.5 (devam)**

(Ransikarbum et al., 2024)	Tayland	DEA ve TOPSIS tabanlı iki aşamalı MCDA	Yok	Belirtilmemiş; MCDA sıralaması	Yer seçimi vardır; ancak LCOH, NPV/IRR, saatlik üretim, depolama, degradasyon ve çok amaçlı optimizasyon yoktur
(Sarhan et al., 2021)	IEEE test sistemi	PyPSA unit commitment optimizasyonu	Var; toplam üretim maliyeti	Var; doğrusal/TEA optimizasyonu	Maliyet optimizasyonu vardır; ancak hidrojen üretimi, CBS yer seçimi, LCOH, depolama, su ve politika analizi kapsam dışıdır

## 2.16 Tezin Metodolojik Yaklaşımı ve Karar Çerçevesi

Bu bölümde ortaya konan kuramsal çerçeve, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretim sistemlerinde teknoloji seçimi, işletme davranışı ve maliyet dinamiklerinin birbirinden bağımsız ele alınamayacağını açıkça göstermektedir. Elektrolizör performansı, kapasite faktörü, sistem verimliliği ve teknoloji öğrenme oranları gibi teknik parametreler, yatırım maliyetleri ve hidrojenin seviye maliyeti (LCOH) üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır. Bununla birlikte, bu teknik ve ekonomik unsurların etkisi, üretim tesisinin bulunduğu coğrafi koşullara ve yenilenebilir kaynakların yerel profiline bağlı olarak dikkate değer ölçüde değişebilmektedir.

Bu nedenle hidrojen üretim sistemlerinin gerçekçi biçimde değerlendirilebilmesi, yalnızca teknoloji ve maliyet analizleriyle sınırlı kalmaması; mekânsal planlama ve yer seçimi kararlarıyla birlikte ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen yaklaşım, hidrojen üretim sistemlerinin planlanmasını mekânsal analiz, ekonomik değerlendirme ve optimizasyonun bütünleşik biçimde ele alındığı kapsamlı bir karar çerçevesi içinde değerlendirmektedir.

Çalışmada kullanılan CBS tabanlı çok kriterli karar verme yöntemi, yalnızca uygunluk haritalarının oluşturulmasına odaklanmakla kalmayıp; yer seçimi problemini mekânsal belirsizlikler, kriterler arası çatışmalar ve karar güvenilirliği boyutlarıyla birlikte ele alan bir karar destek sistemi olarak yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda çalışma alanı, karşılaştırılabilir mekânsal karar birimlerine ayrılmış ve aday bölgeler grid temelli bir örnekleme yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Teknik, çevresel ve altyapısal kriterler raster veri katmanlarına dönüştürülerek ortak bir uygunluk ölçeğinde standardize edilmiş; telafi edilemeyen mekânsal kısıtlar ise modele ayrı bir filtreleme aşaması olarak entegre edilmiştir (Bailey et

al., 2003; Cromley and Huffman, 2006). Devamında, karar yüzeyleri ağırlıklandırma ve örtüştürme yaklaşımıyla oluşturulmuş; literatürde sıklıkla vurgulanan ağırlık özneliği ve ölçek etkilerini azaltmak amacıyla farklı karar mantıklarını temsil eden çeşitli ÇKKV yöntemleri birlikte değerlendirilmiştir (Delamater et al., 2012; Saleh and Setyowati, 2020). Bu yaklaşım, yer seçimi sonuçlarının yalnızca tek bir sıralamaya indirgenmesini önleyerek, farklı yöntemlerin ortaya koyduğu ortak mekânsal örüntülerin görünür hale getirilmesine olanak tanımıştır. Aynı zamanda, yöntemler arası uzlaşma ve kararlılık analizleriyle desteklenen daha sağlam bir karar çerçevesi oluşturulmuştur (Cromley and Huffman, 2006; Salinas-León and Ochoa-Correa, 2025).

Bu çalışmada yer seçimi problemi tek bir ağırlıklandırma yöntemine bağlı kalınarak ele alınmamıştır; bu durum dikkate değer bir metodolojik tercih olarak öne çıkmaktadır. Entropi temelli yaklaşımlar, kriterlerin alternatifler üzerindeki ayırt ediciliğini doğrudan veri üzerinden ortaya koyarken; AHP ve FAHP gibi uzman temelli yöntemler, enerji altyapısı planlamasında etkili olan normatif önceliklerin karar sürecine dahil edilmesini sağlamaktadır (Fathi et al., 2013; Findawati et al., 2018; Sitorus et al., 2019). Bu nedenle, objektif ve öznel ağırlıklandırma yaklaşımlarının birlikte ele alınması ve hibrit bir ağırlık seti üzerinden sonuçların test edilmesi, hem teknik güvenilirliği artırmayı hem de karar verme sürecinin gerekçelendirilmesini güçlendirmeyi amaçlamaktadır (Chen and Huang, 2022; Ilankumaran et al., 2013; Kınay and Tezel, 2021).

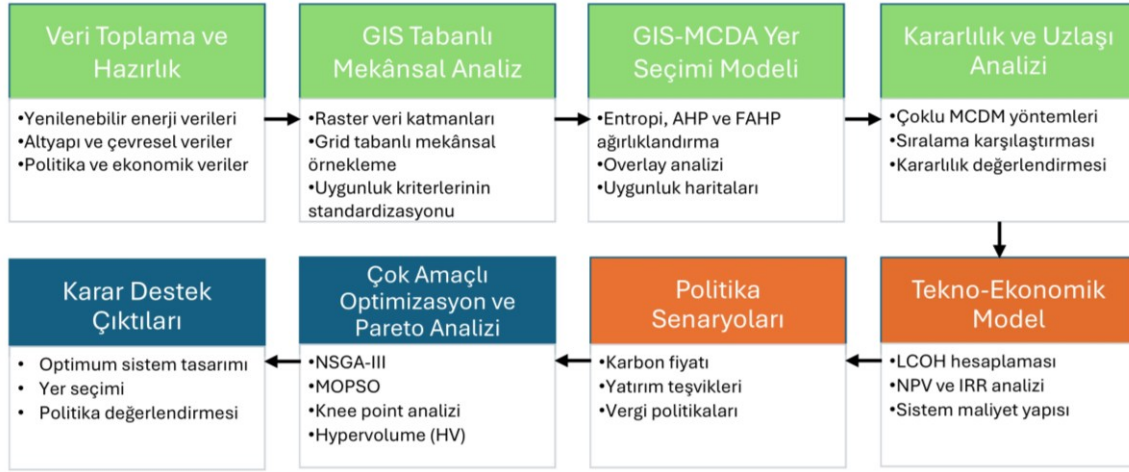
Enerji dönüşümü literatürü, karbon fiyatlandırması ve teşvik mekanizmalarının enerji yatırımlarının yönlendirilmesinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu politikaların inovasyon üzerindeki etkisinin büyük ölçüde politika tasarımının öngörülebilirliği ve güvenilirliği ile ilişkili olduğu da vurgulanmaktadır (Newell, 2010; Popp, 2006a; Taylor, 2012). Nitekim çeşitli çalışmalar, karbon fiyatlandırmasının teknoloji yayılımını destekleyen politikalarla birlikte uygulandığında daha etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir (Bosetti and Tavoni, 2009; Cian et al., 2011; Popp, 2004).

Bu çerçevede karbon fiyatlandırması ve teşvik mekanizmaları yalnızca çevresel politika araçları olarak değil, aynı zamanda hidrojen üretim sistemlerinin ekonomik fizibilitesini doğrudan etkileyen piyasa sinyalleri olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen bölümlerinde karbon fiyatı, yatırım teşvikleri ve vergi politikaları gibi değişkenler farklı senaryolar altında modele entegre edilmiş; bu politikaların hidrojen üretim maliyetleri

üzerindeki etkisi LCOH, net bugünkü değer (NPV) ve iç kârlılık oranı (IRR) gibi göstergeler aracılığıyla analiz edilmiştir (Schram et al., 2020; Takagi et al., 2023; Wu et al., 2022). Öte yandan, doğrusal olmayan ve karmaşık enerji sistemlerinde evrimsel algoritmaların kullanılması, Pareto çözüm uzayının daha kapsamlı biçimde keşfedilmesine ve farklı tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Deng et al., 2018; Shen et al., 2015; Widaningsih et al., 2021).

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenen hidrojen üretim sistemlerinin tasarımı ve işletme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Sistem maliyetinin minimize edilmesi ile yenilenebilir enerji kullanım oranının artırılması temel hedefler olarak birlikte ele alınmış ve bu doğrultuda NSGA-III algoritması tercih edilmiştir. Elde edilen Pareto çözüm kümeleri, farklı sistem boyutlandırma ve işletme stratejilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlayarak karar vericilere alternatif tasarım seçenekleri sunmaktadır. Buna ek olarak, MOPSO algoritması da sistem tasarım parametrelerinin farklı senaryolar altında değerlendirilmesinde tamamlayıcı bir araç olarak kullanılmıştır. MOPSO'nun hızlı yakınsama özelliği, çözüm uzayının ilk aşamada etkin biçimde taranmasını sağlarken; NSGA-III algoritması daha dengeli ve çeşitliliği yüksek Pareto çözümleri üretme açısından avantaj sunmaktadır. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, hem hızlı bir ön değerlendirme yapılmasına hem de kapsamlı bir Pareto analizi gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen metodolojik yaklaşım; mekânsal yer seçimi analizi, çok kriterli karar verme yöntemleri, ekonomik performans değerlendirmesi ve çok amaçlı optimizasyon tekniklerini bütünlük bir yapı içinde ele almaktadır. Bu sayede hidrojen üretim sistemlerinin planlanması, yalnızca teknik ya da ekonomik bir problem olmaktan çıkarak mekânsal, ekonomik ve politika boyutlarını

birlikte içeren kapsamlı bir karar destek sürecine dönüşmektedir. Çalışmada izlenen bu bütünlük metodolojik yaklaşım ve araştırma akışı Şekil 2.7’de özetlenmiştir.



**Şekil 2.7:** Çalışmanın metodolojik çerçevesi ve araştırma akışı.

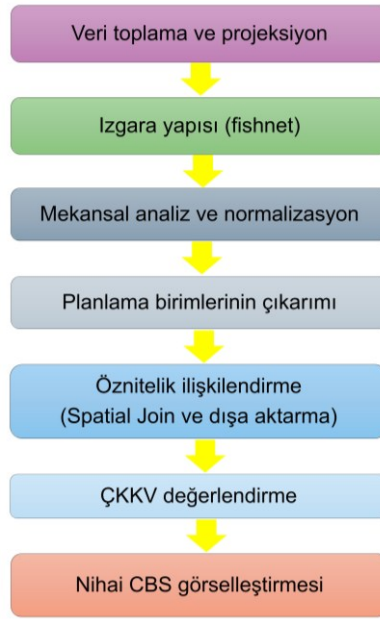
Bu çalışma, hidrojen üretim sistemlerinin planlanmasını bütüncül bir karar çerçevesi içinde ele almaktadır. Süreç; veri toplama, CBS tabanlı mekânsal analiz, çok kriterli karar verme, saatlik çözünürlüklü dinamik simülasyon, tekno-ekonomik modelleme ve çok amaçlı optimizasyon aşamalarından oluşmaktadır. Yer seçimi analizleri CBS-ÇKKV yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş; elde edilen bulgular tekno-ekonomik modeller ve farklı politika senaryoları ile birlikte değerlendirilmiştir. Sistem tasarımına ilişkin parametreler ise NSGA-III ve MOPSO algoritmaları kullanılarak optimize edilmiş, elde edilen Pareto çözüm kümeleri diz point analizi, hypervolume ve çeşitlilik göstergeleri aracılığıyla kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bu çalışmanın özgün katkısı, hidrojen üretim sistemlerinin planlanmasını yalnızca teknik veya ekonomik boyutta değil; mekânsal uygunluk, saatlik operasyonel davranış ve çok amaçlı optimizasyonu entegre eden bütüncül bir model çerçevesinde ele almasıdır. Özellikle 20 yıllık dönemi kapsayan 175200 saatlik yüksek zaman çözünürlüğüne sahip simülasyon yaklaşımı ile yenilenebilir enerji dalgalanmaları, elektrolizörün kısmi yük davranışı ve elektrik fiyatlarının zamansal değişimi birlikte değerlendirilmiş; bu çıktılar doğrudan optimizasyon sürecine entegre edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, literatürde çoğunlukla ayrı ayrı ele alınan mekânsal analiz, dinamik simülasyon ve optimizasyon yaklaşımlarını tek bir karar destek sistemi içinde birleştirerek, yeşil hidrojen sistemlerinin planlanmasına yönelik daha gerçekçi ve uygulanabilir bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu bölümde, Güney Marmara bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeşil hidrojen üretimi amacıyla planlanan bir elektrolizör tabanlı tesisin, mekânsal, teknik ve ekonomik boyutları bütüncül bir yaklaşımla ele alınarak kapsamlı bir analiz çerçevesi sunulmaktadır. Çalışma, yer seçimi, sistem tasarımı ve ekonomik değerlendirme süreçlerinin birbirleriyle etkileşimli yapısını dikkate alacak şekilde üç temel aşamada kurgulanmıştır. Bu kapsamda; (i) öncelikle Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak Güney Marmara bölgesi içerisinde yeşil hidrojen üretimi açısından en uygun lokasyonların belirlenmesi, (ii) belirlenen uygun lokasyonlar için yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre hidrojen üretim sistemlerinin modellenmesi ve sistem parametrelerinin çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı ile eniyilenmesi, (iii) son olarak ise tasarlanan sistemlerin tekno-ekonomik performanslarının değerlendirilerek maliyet, verimlilik ve sürdürülebilirlik göstergeleri açısından karşılaştırılması hedeflenmektedir. Bu üç aşamalı bütüncül yapı sayesinde, yer seçimi, sistem boyutlandırma ve ekonomik analiz süreçleri birbirinden bağımsız değil, aksine aynı metodolojik çerçeve içerisinde tutarlı, karşılaştırılabilir ve karar destekleyici bir biçimde ele alınmaktadır.

#### **3.1 CBS ve ÇKKV Tabanlı Mekânsal Uygunluk ve Yer Seçimi Metodolojisi**

Yeşil hidrojen üretim tesisleri için yer seçimi, çok sayıda etkili kriteri aynı anda değerlendirmeyi gerektiren ve karar vericilere kapsamlı bir bilgi temeli sunan dikkate değer bir süreçtir. Bu süreç, doğası gereği yalnızca yenilenebilir enerji potansiyeline dayalı değerlendirmelerle sınırlı kalmamakta; çevresel kısıtlar, altyapı olanakları, lojistik erişilebilirlik ve sosyo-ekonomik etkileşimler gibi farklı boyutların birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, Balıkesir ilinde yapılan analizlerde CBS tabanlı mekânsal modelleme ile ÇKKV yaklaşımlarını birleştiren aşamalı ve sistematik bir yöntem izlenmiştir. Uygulanan metodolojik çerçeve, veri hazırlığından nihai uygunluk haritalarının üretilmesine kadar uzanan süreci kapsamaktadır. Genel iş akışı ve yer seçimi sürecinin temel yapısı, Şekil 3.1’de sunulan mekânsal modelleme akış şeması ile özetlenmektedir.



**Şekil 3.1:** Yeşil hidrojen tesisi yer seçimine yönelik mekânsal modelleme ve çok kriterli karar verme sürecinin akış şeması.

İlk aşamada analizlerde kullanılacak mekânsal veriler, farklı açık erişimli ve kurumsal kaynaklardan temin edilmiştir. Elde edilen veriler ortak bir koordinat sistemine dönüştürülerek çalışma alanıyla uyumlu hale getirilmiştir. Daha sonra, Balıkesir ili sınırları içerisinde yaklaşık 10 hektar büyüklüğünde eş alanlı poligonlardan oluşan bir ızgara yapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda çalışma alanı, 10 ha büyüklüğünde homojen planlama birimlerine ayrılmış ve her bir birim çok kriterli karar verme sürecinde ayrı bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretim sistemlerinin arazi gereksinimleri dikkate alındığında, literatürde 1 MW kurulu güç için fotovoltaik (PV) sistemlerde yaklaşık 20–60 ha, rüzgâr sistemlerinde ise 10–100 ha aralığında alan gereksinimi olduğu belirtilmektedir (Lantz et al., 2016; Weber et al., 2021; Yang et al., 2025b). Bu değerler, yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim tesislerinin hektar mertebesinde geniş alanlara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan 10 ha büyüklüğündeki eş alanlı poligonlar, doğrudan nihai tesis alanını temsil etmekten ziyade, CBS tabanlı yer seçimi analizinde kullanılan mekânsal karar/planlama birimini ifade etmektedir. Başka bir deyişle, gerçek bir hidrojen üretim tesisi, seçilecek sistem büyüklüğüne, PV ve rüzgâr türbini kapasitesine, elektrolizör ölçeğine ve yardımcı altyapı gereksinimlerine bağlı olarak birden fazla 10 ha’lık planlama biriminden oluşabilir. Bu nedenle 10 ha çözünürlük, tesis alanının birebir karşılığı

olarak değil; uygunluk analizinin yapılabilmesi, alternatif alanların karşılaştırılabilmesi ve veri çözünürlüğü–hesaplama maliyeti dengesinin sağlanabilmesi için tercih edilen mekânsal analiz ölçeği olarak değerlendirilmiştir (Elmansour et al., 2022; Flora, 2025).

Her bir poligon potansiyel bir alternatif alan olarak tanımlanmış olup, bu yaklaşım tüm alternatiflerin aynı mekânsal çözünürlükte değerlendirilmesine imkân tanıyarak karşılaştırılabilirliği artırmaktadır. Her bir kriter için fiziksel büyüklüklere dayalı mekânsal analizler, oluşturulan ızgara yapısı üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sürekli yüzeyler ortak bir değerlendirme ölçeğine normalize edilmiştir. Daha sonra, literatürde yaygın olarak kullanılan dışlama kriterleri uygulanmış ve teknik, çevresel ile mevzuat açısından uygun olmayan alanlar analiz dışı bırakılmıştır. Bu elemeler sonucunda kalan poligonlar çalışmanın nihai planlama birimlerini oluşturmuştur.

Sonraki aşamada, her bir planlama birimi için kriter bazında uygunluk değerleri öznitelik ilişkilendirme işlemi ile öznitelik tablolarına aktarılmış ve çok kriterli karar verme analizlerinde kullanılabilecek sayısal bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti üzerinde, kriterlerin görece önemlerini dikkate alan ÇKKV yöntemleri uygulanarak alternatif alanların bütüncül bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Son aşamada, ÇKKV analizlerinden elde edilen sonuçlar CBS ortamında mekânsal olarak görselleştirilmiş ve yeşil hidrojen üretim tesisleri için en uygun alanların mekânsal dağılımı haritalar aracılığıyla ortaya konmuştur. Böylece, teknik uygulanabilirlik, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik erişilebilirliği birlikte ele alan entegre bir yer seçimi yaklaşımı oluşturulmuştur.

### **3.1.1 Çalışma alanının tanımı, coğrafi ve enerji potansiyeli özellikleri**

Bu çalışma, Türkiye'nin batısında ve Güney Marmara Bölgesi içerisinde yer alan Balıkesir ilinde yapılmıştır. Balıkesir ili, 39°06'K–40°38'K enlemleri ile 26°38'D–28°43'D boylamları arasında konumlanmakta olup yaklaşık 14.500 km<sup>2</sup>'lik bir yüzölçümüne sahiptir. Çalışma alanının Türkiye içindeki konumu ve il sınırları Şekil 3.2'de verilmiştir.



**Şekil 3.2:** Türkiye haritası üzerinde çalışma alanının konumu (EEA, 2020).

Balıkesir hem Ege Denizi'ne hem de Marmara Denizi'ne kıyısı olan az sayıda ilden biridir. Bu nedenle farklı topoğrafik ve iklimsel özellikleri bir arada barındırmaktadır. İl genelinde kıyı alanları, dağlık ve ormanlık bölgeler ile geniş tarımsal alanlar bir arada bulunmaktadır. Bu heterojen yapı yenilenebilir enerji potansiyelinin mekânsal dağılımını doğrudan etkilemektedir. Balıkesir hem güneş hem de rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından Türkiye'nin öne çıkan bölgelerinden biridir. İlde yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2.700–2.800 saat ve küresel yatay ışınım (GHI) değeri yaklaşık 1.600–1.800 kWh/m<sup>2</sup>-yıl aralığında olup, bu durum güneş enerjisi yatırımları için elverişli bir ortam sunmaktadır. Rüzgâr enerjisi açısından ise 50–80 m yüksekliklerde ortalama rüzgâr hızlarının 6–7 m/s ve üzeri değerlere ulaşması, geniş alanlarda teknik olarak değerlendirilebilir bir potansiyel bulunduğunu göstermektedir (Yildiz, 2021). Bu potansiyelin bir sonucu olarak, il genelinde rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı toplam kurulu gücün birkaç bin MW seviyesine ulaştığı ve özellikle Bandırma çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir (Güven and Mete, 2021). Bu özellikler, Balıkesir'i büyük ölçekli yenilenebilir enerji ve yeşil hidrojen üretim yatırımları açısından stratejik bir konuma taşımaktadır. Bunun yanında Balıkesir; gelişmiş karayolu ve demiryolu bağlantıları ile stratejik limanlara erişim imkânı sunan ulaşım altyapısı, organize sanayi bölgeleri ve gelişmekte olan endüstriyel yapısı sayesinde güçlü bir enerji–sanayi etkileşimine sahiptir. Bu özellikler, ilin yalnızca yenilenebilir elektrik üretimi için değil, aynı zamanda yeşil hidrojen üretimi gibi ileri enerji teknolojilerinin uygulanması açısından da uygun bir çalışma alanı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Balıkesir'in Marmara Bölgesindeki enerji ve sanayi ağlarıyla bütünleşik konumu ve Avrupa pazarlarına görece yakınlığı, ilin sürdürülebilir enerji projeleri açısından stratejik önemini artırmaktadır (Yildiz, 2023).

İlaveten bu çalışma, Balıkesir’de yürütölmekte olan Hidrojen Vadisi Projesi ile doğrudan ilişkilendirilerek kurgulanmıştır (GMKA, 2023). Bu bağlamda elde edilen yer seçimi ve sistem boyutlandırma sonuçları, yalnızca teorik bir optimizasyon çerçevesi sunmakla kalmayıp, bölgedeki yatırım planları ve stratejik hedeflerle uyumlu olacak şekilde değerlendirilmiştir. Böylece çalışma, akademik düzeyde geliştirilen optimizasyon modelleri ile gerçek ölçekli yatırım ve planlama süreçleri arasındaki boşluğun azaltılmasına katkı sağlamayı amaçlamakta; politika yapıcılar ve yatırımcılar için uygulanabilir ve karşılaştırılabilir çıktılar sunmaktadır.

### **3.1.2 Kriter setinin tanımlanması ve hiyerarşik yapılandırılması**

Yöntemsel süreç, yeşil hidrojen üretim tesisleri için potansiyel sahaların uygunluğunu değerlendirmeye yönelik on üç mekânsal kriterin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan kriterlerin seçimi; ilgili akademik literatürün kapsamlı bir incelemesine, ulusal ve uluslararası politika belgelerine, teknik dokümanlara ve enerji sistemleri, mekânsal planlama ile çevre mühendisliği alanlarında uzman görüşlerinden elde edilen değerlendirmelere dayanmaktadır (Malczewski, 2006; Wu et al., 2021; Yılmaz and Uyan, 2025). Yeşil hidrojen için saha seçimi sürecinin çok boyutlu yapısını yakalayabilmek amacıyla kriterler Şekil 3.3’te görüldüğü şekliyle beş ana kategori altında sınıflandırılmıştır.

Kriter Grupları ve Değerlendirme Kriterleri	
Teknik Faktörler	T1 — Arazi kullanım türü
	T2 — Eğitim
	T3 — Küresel Yatay Işınım (GHI)
	T4 — Ortalama rüzgâr hızı
Çevresel Faktörler	Ç1 — Fay hatlarına uzaklık
	Ç2 — Kıyı şeridine uzaklık
	Ç3 — Su kaynaklarına uzaklık
Altyapısal Faktörler	A1 — İletim hatlarına uzaklık
	A2 — Gaz şebekesine uzaklık
	A3 — Yollara uzaklık
	A4 — Mevcut rüzgâr santrallerine uzaklık
Lojistik ve Endüstriyel Erişim	L1 — OSB'lere yakınlık
Sosyo-ekonomik Faktörler	S1 — Yerleşim yerlerine uzaklık

Not: Kodlar (T, Ç, A, L, S) kriter grubunu temsil eder.

**Şekil 3.3:** Çalışmada kullanılan değerlendirme kriterlerinin faktör gruplarına göre sınıflandırılması ve hiyerarşik gösterimi.

Bu yapı; kaynak potansiyeli, ekolojik kısıtlar, altyapının mevcut durumu, lojistik erişilebilirlik ve bölgesel kalkınma dinamiklerini birlikte dikkate alan bütüncül bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Her bir kriterin modele dâhil edilmesi hem uygulamaya dönük pragmatik gerekçelere hem de uzun vadeli stratejik planlama ihtiyaçlarına dayanmaktadır. Çalışma alanı yeşil hidrojen üretim zincirinin gereksinimleri doğrultusunda tasarlandığından, kriter seti klasik yenilenebilir enerji saha seçimlerinden daha kapsamlı hâle getirilmiştir.

Su kaynaklarına yakınlık, yeşil hidrojen üretiminin temel girdisi olan suyun sürekliliği ve maliyeti açısından belirleyici bir unsurdur. Bu nedenle, potansiyel tesis alanlarının değerlendirilmesinde etkili kriterlerden biri olarak ele alınmıştır. Benzer şekilde, lojistik altyapı ve liman bağlantıları da üretilen hidrojenin sanayi kümelerine, organize sanayi bölgelerine ve uluslararası pazarlara etkin biçimde ulaştırılabilmesi açısından stratejik önem taşımaktadır. Özellikle Avrupa Birliği'nin Karbon Sınır Ayarlama Mekanizması (CBAM)

kapsamında karbon yoğun üretime yönelik düzenlemeleri dikkate alındığında, ihracat odaklı ve düşük karbon ayak izine sahip üretim senaryolarında güçlü lojistik entegrasyonun önemi daha da artmaktadır.

Öte yandan, yerleşim alanlarına, korunan bölgelere ve hassas ekosistemlere olan mesafe gibi göstergeler; olası sosyal kabul sorunlarını en aza indirmek, çevresel sürdürülebilirliği güvence altına almak ve mevzuata uyum riskini azaltmak amacıyla modele dahil edilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, tesis yer seçimi yalnızca teknik ve ekonomik uygunluk temelinde değil, aynı zamanda çevresel hassasiyetler ve sosyo-ekonomik etkiler çerçevesinde de değerlendirilmiş; böylece yeşil hidrojen yatırımlarının uzun vadeli sürdürülebilirliğini destekleyen dengeli bir karar yapısı oluşturulmuştur.

### **3.1.3 Veri kaynakları, veri ön-işleme ve CBS çalışma ortamı**

Bu çalışmada kullanılan mekânsal veri tabanı, analizlerin tematik tutarlılığını ve mekânsal doğruluğunu sağlamak amacıyla, farklı açık erişimli ve kurumsal veri kaynaklarından derlenmiştir. Arazi kullanım ve arazi örtüsü verileri, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından Copernicus Arazi İzleme Servisi kapsamında üretilen CORINE Land Cover (CLC) 2018 (Version 2020\_20u1) veri setinden temin edilmiştir (EEA, 2020). Topografik değişkenler kapsamında değerlendirilen yükseklik ve eğim bilgileri ise United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer platformu üzerinden erişilen Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model, DEM) kullanılarak elde edilmiştir (USGS, 2024).

Güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde, Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) tarafından sağlanan küresel yatay ışınım (GHI) verilerinden yararlanılmıştır (European Commission Joint Research Centre, 2025). Rüzgâr enerjisi potansiyeline ilişkin veriler ise Global Wind Atlas veri tabanından elde edilmiştir (World Bank Group and DTU, 2025). Jeolojik yapı ve aktif fay hatlarına ilişkin mekânsal bilgiler, Türkiye Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından sağlanan veri setleri aracılığıyla temin edilmiştir (MTA, 2025).

Ulaşım ve altyapı bileşenlerine ilişkin veriler; karayolu ağları, yerleşim alanları ve organize sanayi bölgelerini kapsayacak şekilde OpenStreetMap (OSM) katkıcılarından alınmış ve Google Earth Pro (v7.3) uydu görüntüleri kullanılarak görsel doğrulama sürecinden

geçirilmiştir (Google, 2025; OpenStreetMap contributors, 2025). Bu yaklaşım, özellikle vektör tabanlı altyapı katmanlarında konumsal doğruluğun artırılmasını amaçlamaktadır.

Analiz kapsamında kullanılan tüm mekânsal veriler, konumsal tutarlılığın sağlanabilmesi amacıyla WGS 84 / UTM Zone 35N koordinat referans sistemine dönüştürülmüştür. Raster standartlaştırma, yeniden sınıflandırma ve yakınlık analizleri başta olmak üzere tüm mekânsal işlemler ArcCBSPro 3.2 yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada dikkate alınan kriterlerin faktör gruplarına göre sınıflandırılması, kullanılan veri türleri, ilgili veri kaynakları ve dışlama/uygunluk eşik değerleri Tablo 3.1’de ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 3.1:** Hidrojen üretim tesislerinin yer seçimi analizinde kullanılan kriter seti.

Kategori	Kriter	Veri Türü	Veri Kaynağı	Dışlama / Uygunluk Eşiği
Teknik Faktörler	Arazi kullanım türü	Raster	(EEA, 2020)	CORINE 122, 123, 124, 131, 132, 141, 142, 311, 312, 313, 324, 411, 511, 512, 111, 112, 223
	Eğim	DEM türevi raster	(United States Geological Survey (USGS), 2024)	Eğim > 10°
	Küresel Yatay Işınım (GHI)	Raster	(European Commission Joint Research Centre, 2025)	GHI < 1500 kWh/m <sup>2</sup> /yıl
Çevresel Faktörler	Ortalama rüzgâr hızı	Raster	(European Commission Joint Research Centre, 2025)	Rüzgâr hızı < 5.5 m/s
	Fay hatlarına uzaklık	Vektör	(Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), 2025)	< 1000 m
	Kıyı şeridine uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	> 40 km
	Su kaynaklarına uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	< 100 m

**Tablo 3.1** (devam)

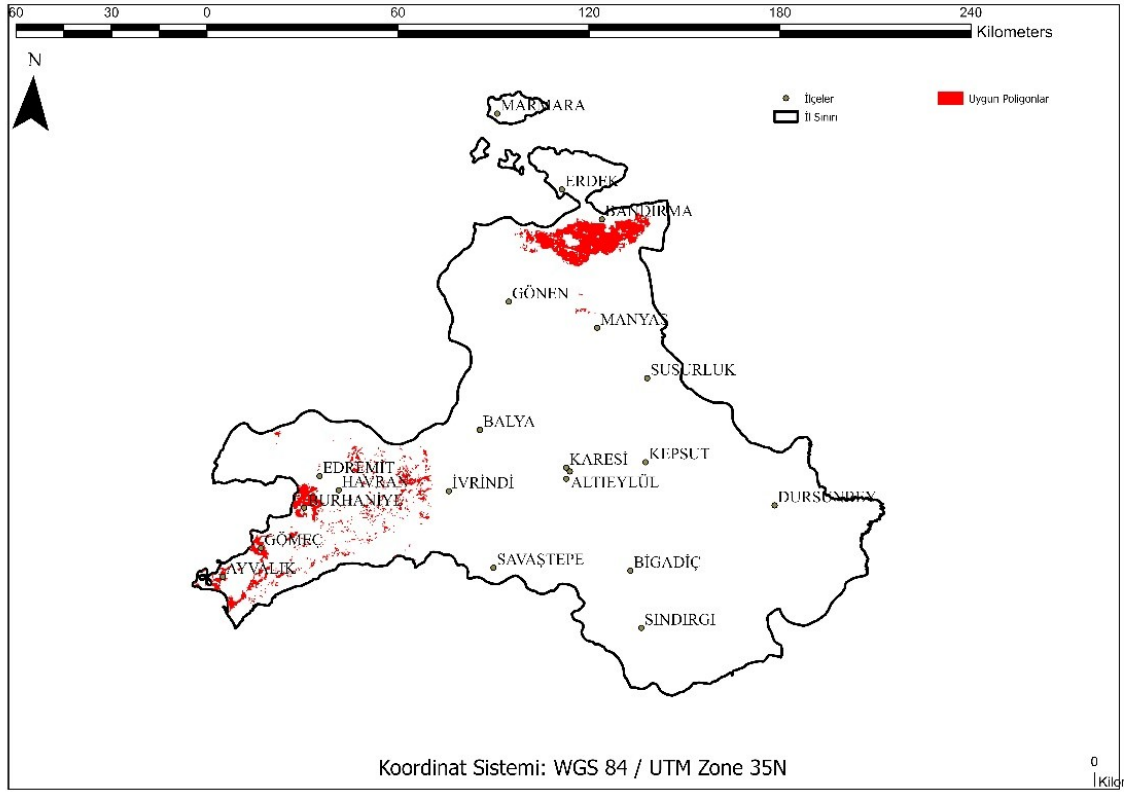
<b>Altyapısal Faktörler</b>	İletim hatlarına uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	–
	Doğalgaz şebekesine uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	–
	Yollara uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	<25 m
	Mevcut rüzgâr santrallerine uzaklık	Vektör	(Google, 2025)	<1000 m
<b>Lojistik ve Endüstriyel Erişim</b>	OSB'lere uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	–
<b>Sosyo-Ekonomik Faktörler</b>	Yerleşim alanlarına uzaklık	Vektör	(OpenStreetMap contributors, 2025)	<300 m

#### 3.1.4 Alternatif planlama birimlerinin oluşturulması (eş alanlı ızgara yaklaşımı)

Balıkesir ili genelinde potansiyel hidrojen üretim alanlarının sistematik biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla, çalışma alanı öncelikle eş alanlı mekânsal birimlere ayrılmıştır. Bu kapsamda, il sınırları içerisinde kalan kara alanı yaklaşık 10 hektar büyüklüğünde düzenli poligonlara bölünmüş ve her bir poligon potansiyel bir alternatif alan olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım hem mekânsal karşılaştırılabilirliği sağlamak hem de çok kriterli karar verme analizlerinde tüm alternatiflerin eşit ağırlıkta değerlendirilmesine imkân tanımak amacıyla tercih edilmiştir.

Oluşturulan başlangıç poligon seti üzerinde, Tablo 3.1'de verilen ve literatürde yaygın biçimde kullanılan dışlama kriterleri uygulanmıştır (Baseer et al., 2017; El-hosiny et al., 2021; Metegam et al., 2024; Przewoźniak et al., 2024; Villacreses et al., 2017). Yerleşim alanlarına belirli bir mesafeden daha yakın bölgeler, aktif fay hatlarına yakın alanlar, yüksek eğimli sahalarda, uygun olmayan arazi kullanım sınıfları ve benzeri kısıtlar analiz dışı bırakılarak, teknik, çevresel ve mevzuat kaynaklı risklerin en baştan elenmesi hedeflenmiştir. Bu eleme süreci sonucunda, başlangıçta tanımlanan poligonların bir bölümü analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Dışlama kriterleri sonrasında geriye kalan 4795 adet poligon (Şekil 3.4), çalışmanın nihai alternatif setini oluşturmuştur. Bu poligonlar, hidrojen

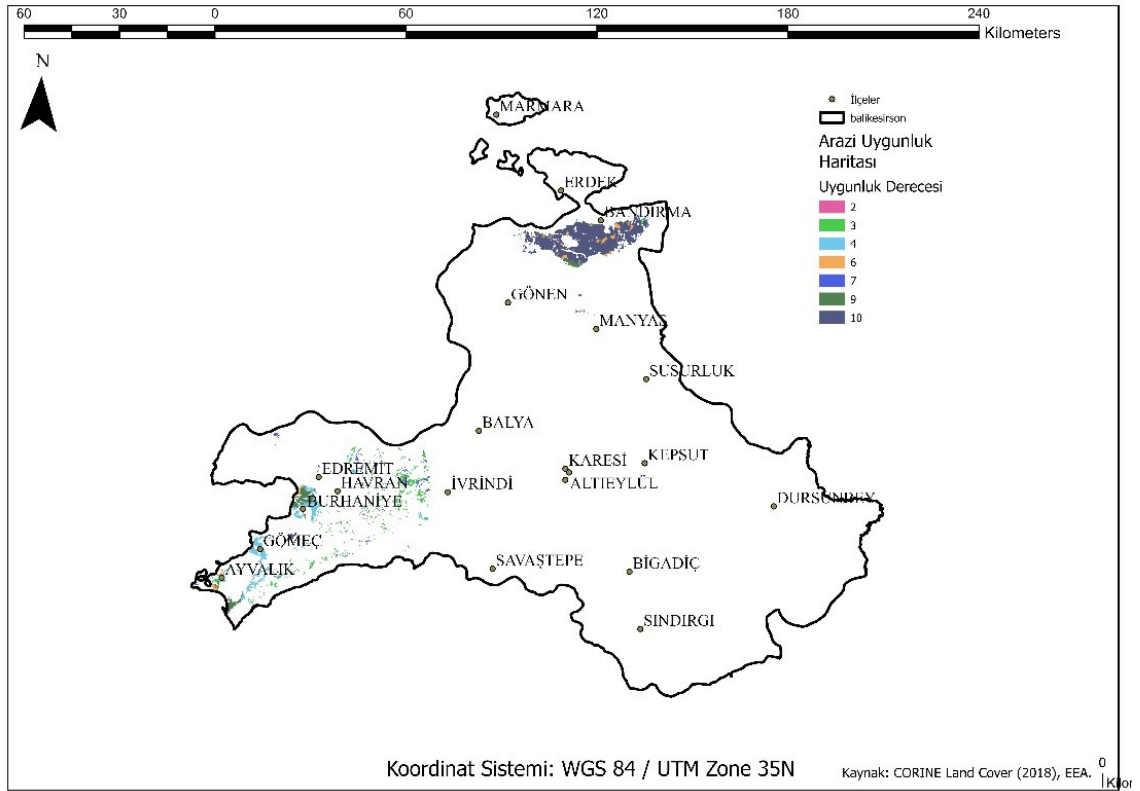
üretim tesislerinin yer seçimi açısından asgari koşulları sağlayan, karşılaştırılabilir ve uygulanabilir alanlar olarak değerlendirilmiştir. Takip eden aşamada, her bir poligon için belirlenen teknik, çevresel, altyapısal, lojistik ve sosyo-ekonomik kriterlere ilişkin sayısal değerler hesaplanmıştır.



**Şekil 3.4:** Dışlama kriterleri uygulanması sonrasında Balıkesir ili içerisinde hidrojen üretim tesisleri için uygun bulunan potansiyel alanların mekânsal dağılımı.

- *Arazi kullanım türüne göre uygunluk analizi;*

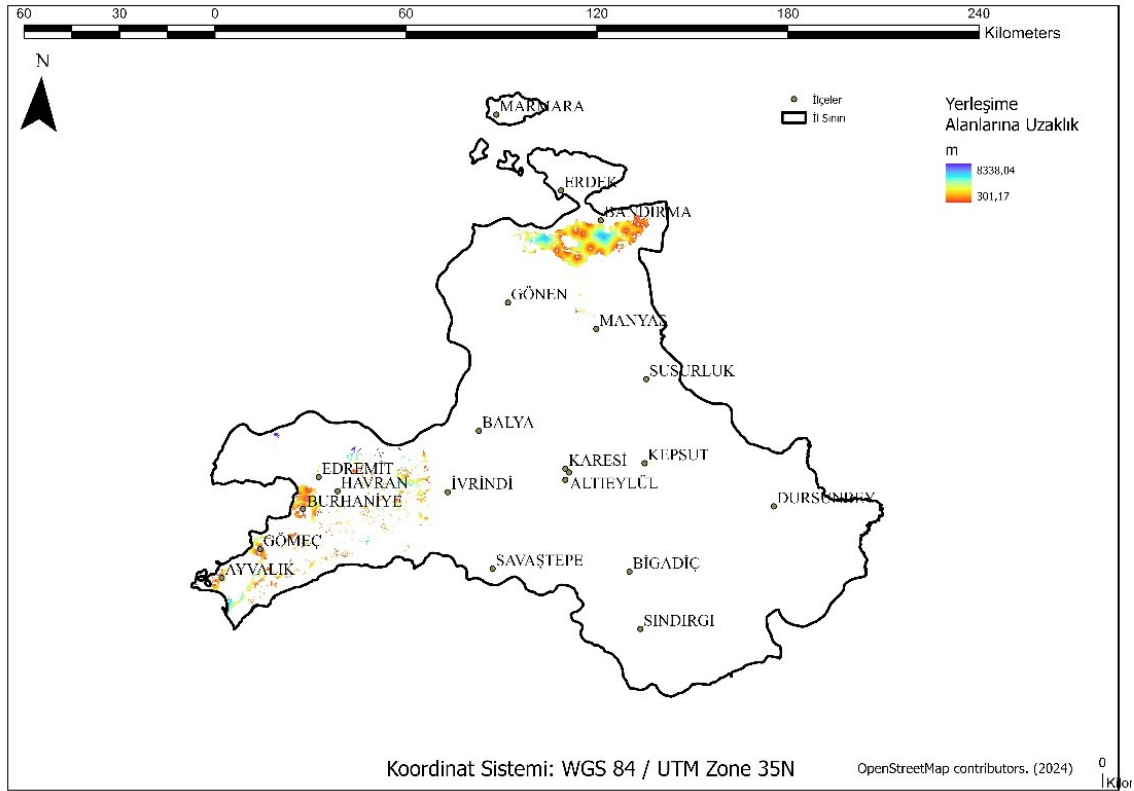
Arazi kullanım türüne göre oluşturulan uygunluk haritası (Şekil 3.5), hidrojen üretim tesislerinin kurulumu açısından mekânsal olarak uygulanabilir alanların belirlenmesinde temel bir ön eleme işlevi görmektedir. CORINE Land Cover sınıflandırması esas alınarak yapılan değerlendirmede, yerleşim alanları, yoğun tarım alanları ve yapılaşmış bölgeler analiz dışı bırakılmış; teknik olarak uygun ve mevzuat açısından daha az kısıt içeren alanlar öne çıkarılmıştır. Bu yaklaşım, ilerleyen aşamalarda değerlendirilecek poligonların arazi kullanım kaynaklı risklerini en baştan azaltmayı amaçlamaktadır.



**Şekil 3.5:** Arazi kullanım türlerine göre hidrojen üretim tesisleri için uygunluk haritası.

- *Yerleşim alanlarına uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

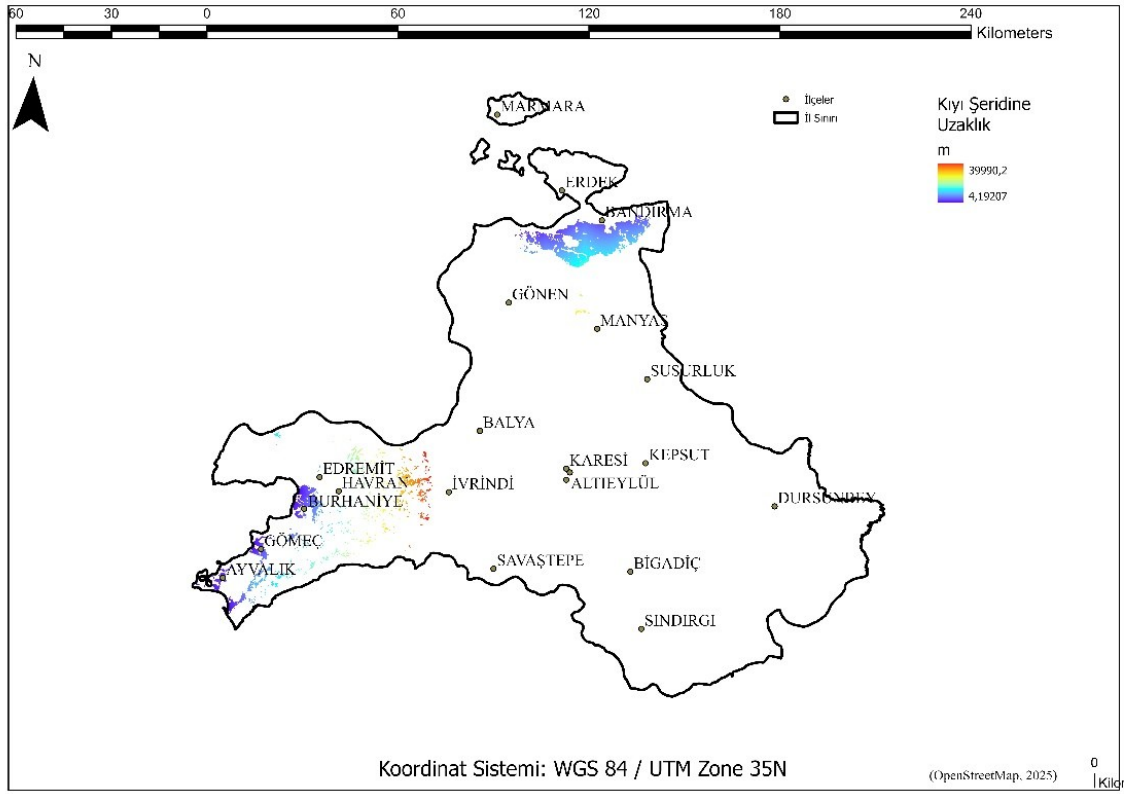
Yerleşim alanlarına uzaklık kriterine göre üretilen uygunluk haritası (Şekil 3.6), olası sosyal çatışma risklerini azaltmak ve çevresel–sosyal kabul düzeyini artırmak amacıyla değerlendirilmiştir. Belirlenen eşik değer doğrultusunda yerleşim alanlarına belirli bir mesafeden daha yakın bölgeler dışlanmış, bu alanların dışında kalan poligonlar ise uzaklıklarına bağlı olarak derecelendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle kentsel yoğunluğun azaldığı kırsal alanlarda uygunluk değerlerinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir.



**Şekil 3.6:** Yerleşim alanlarına uzaklık kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası.

- *Kıyı şeridinde uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

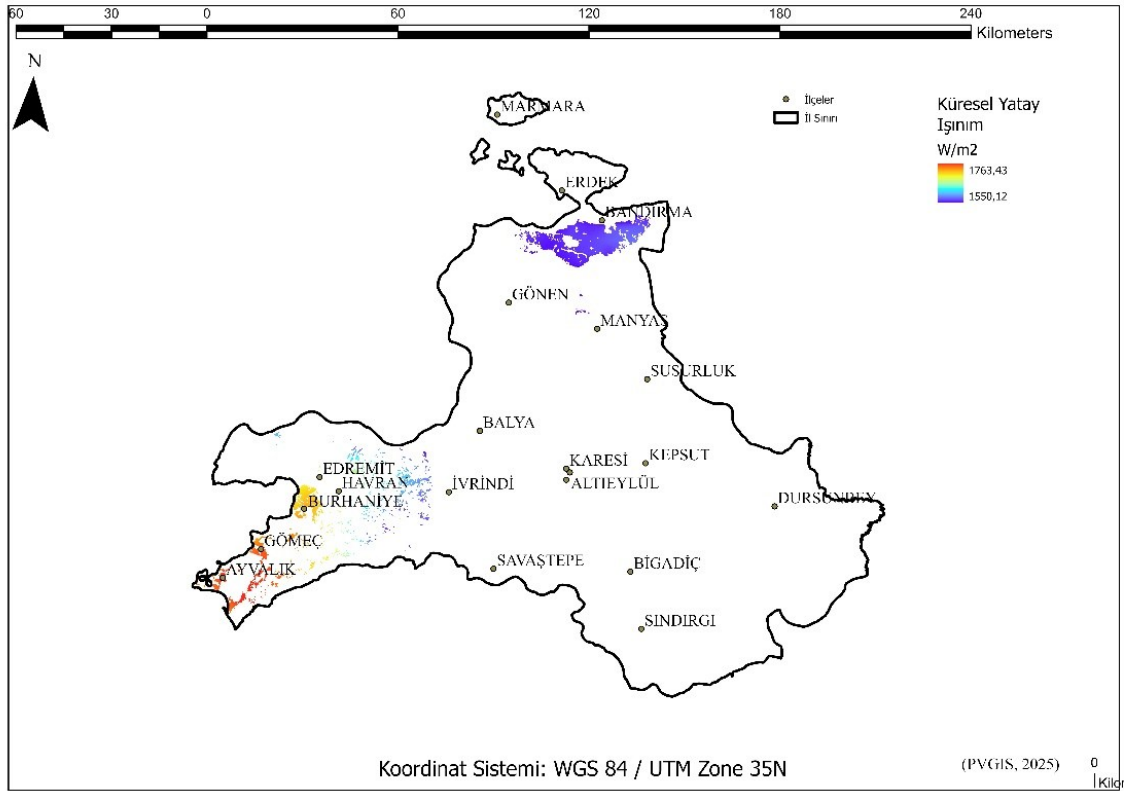
Kıyı şeridinde uzaklık kriteri hem çevresel hassasiyetlerin korunması hem de kıyı alanlarında yoğunlaşan arazi kullanım baskılarının dışlanması amacıyla analiz kapsamına alınmıştır. Bu çerçevede, kıyı çizgisine çok yakın alanlar düşük uygunluk sınıflarında değerlendirilmiş veya analiz dışı bırakılmıştır. Harita (Şekil 3.7), kıyıdan uzaklaştıkça uygunluk düzeyinin arttığını ve özellikle iç kesimlerde daha dengeli bir dağılım oluştuğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.7:** Kıyı çizgisine olan mesafeye bağlı olarak oluşturulan hidrojen üretim tesisleri için uygunluk haritası.

- *Küresel yatay ışınım (GHI) kriterine göre uygunluk analizi;*

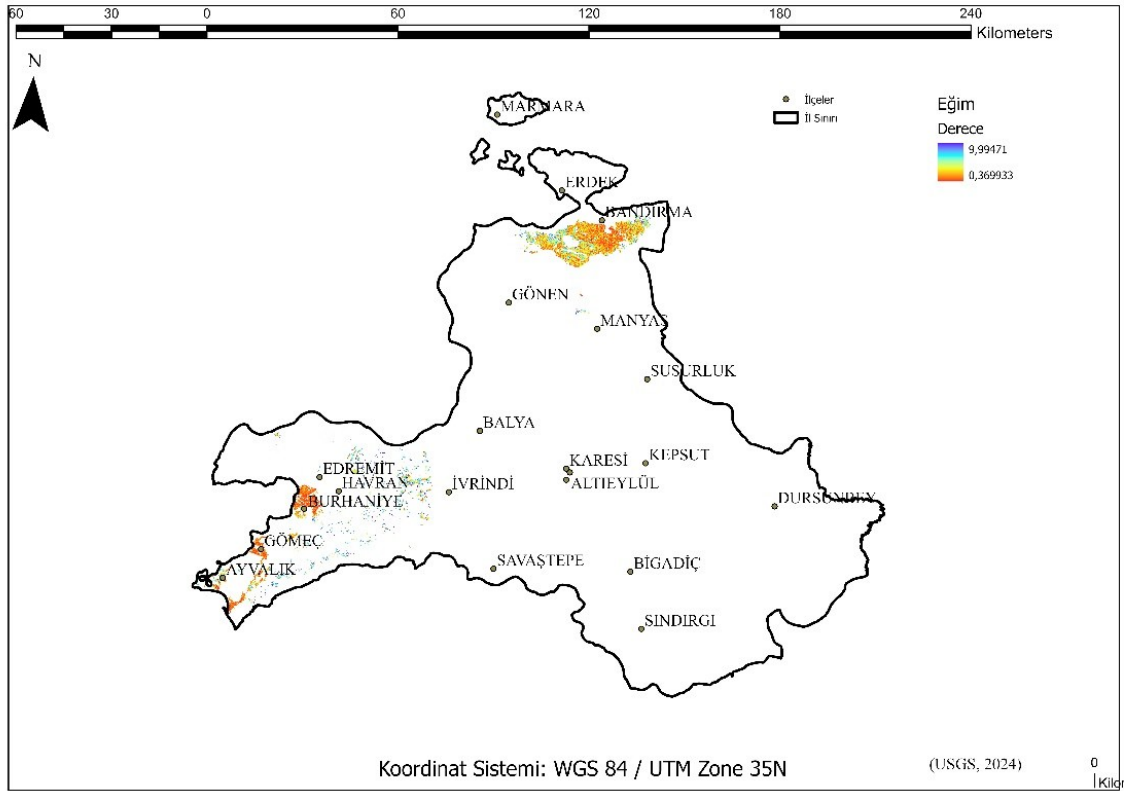
Küresel yatay ışınım verilerine dayalı olarak üretilen uygunluk haritası (Şekil 3.8), güneş enerjisi potansiyelinin mekânsal dağılımını yansıtmaktadır. Belirlenen minimum GHI eşiğinin altında kalan alanlar düşük uygunluk sınıflarında değerlendirilirken, yüksek ışınım değerlerine sahip bölgeler daha yüksek uygunluk dereceleri ile temsil edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemleri açısından güneş kaynaklı avantajlı alanların belirlenmesine katkı sağlamaktadır.



**Şekil 3.8:** Küresel yatay ışınım (GHI) verilerine göre hidrojen üretim tesisleri için oluşturulan mekânsal uygunluk haritası.

- *Eğim kriterine göre uygunluk analizi;*

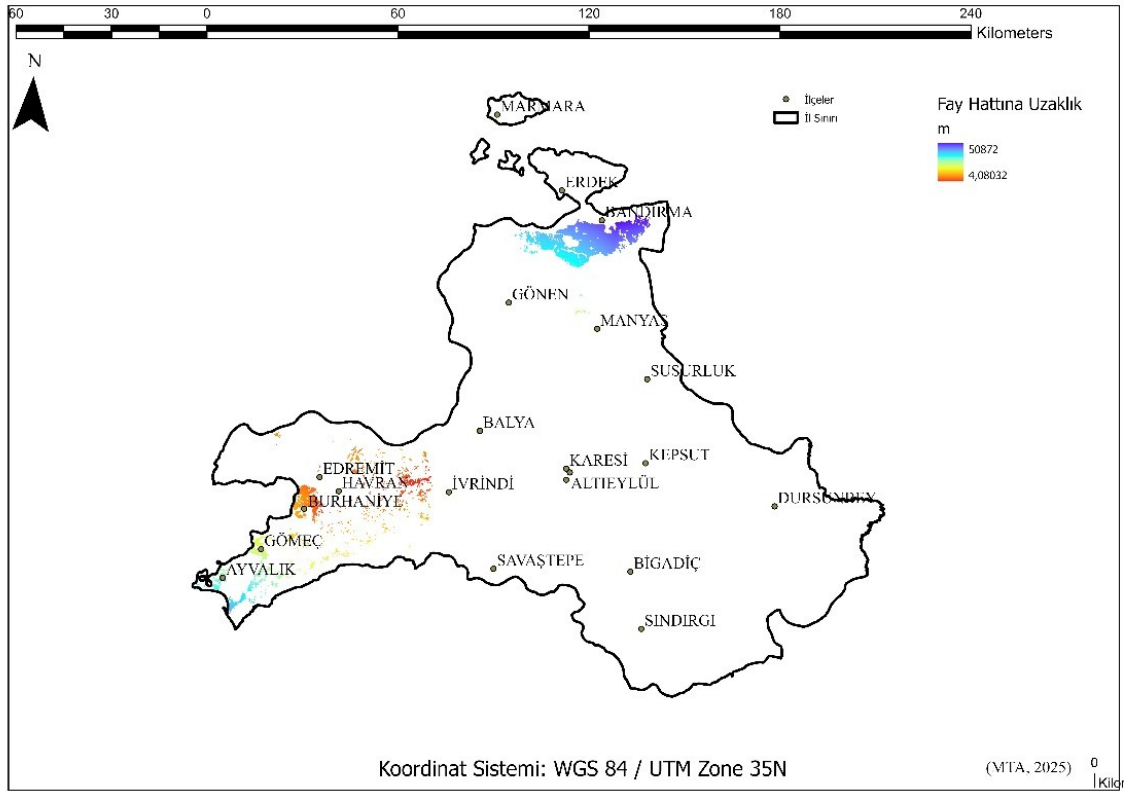
Eğim kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası (Şekil 3.9), tesis kurulum maliyetleri ve mühendislik uygulanabilirliği açısından etkili bir gösterge sunmaktadır. Yüksek eğimli alanlar, inşaat ve altyapı maliyetlerini artırması nedeniyle dışlanmış veya düşük uygunluk sınıflarında değerlendirilmiştir. Buna karşılık, düşük eğime sahip alanlar daha yüksek uygunluk değerleri olarak öne çıkmıştır. Harita, topoğrafik olarak daha düz alanların alternatif poligonlar açısından avantaj sağladığını açık biçimde ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.9:** Balıkesir ili için arazi eğimi (°) verilerine dayalı topoğrafik uygunluk haritası.

- *Fay hatlarına uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

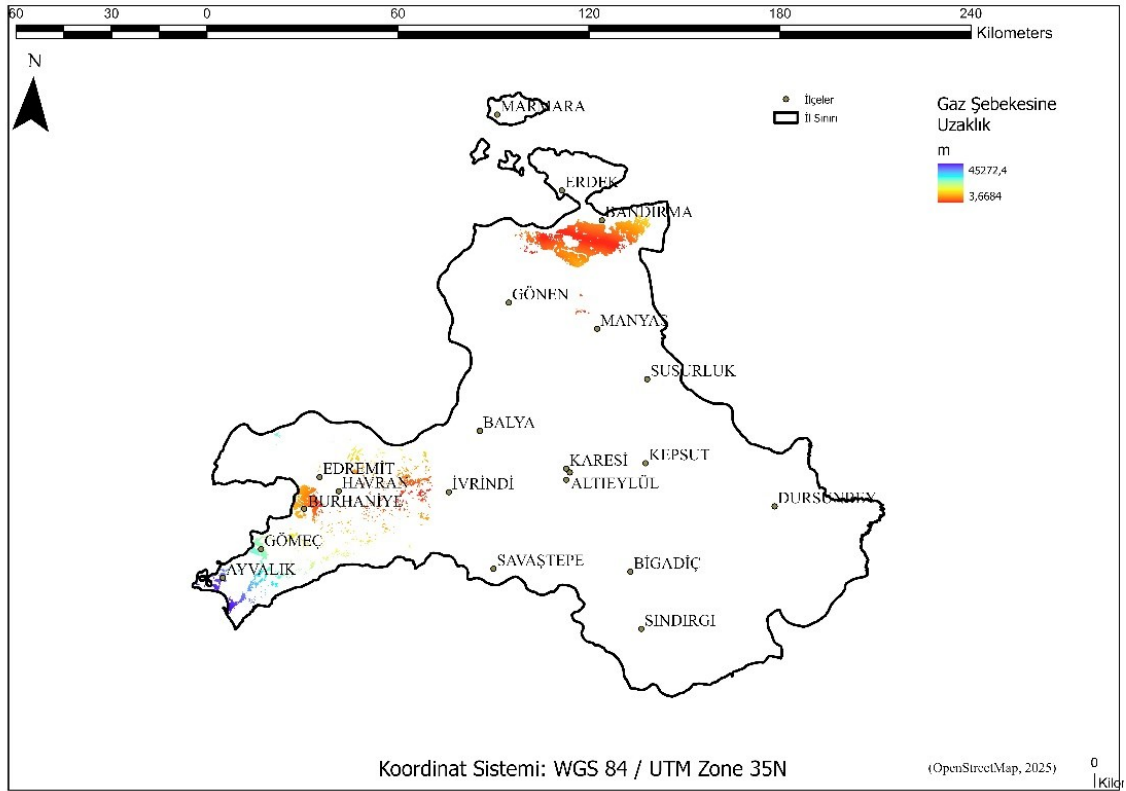
Aktif fay hatlarına uzaklık kriteri, tesis güvenliği ve sismik risklerin azaltılması amacıyla analizde yer almıştır. Fay hatlarına belirlenen eşik mesafeden daha yakın alanlar analiz dışı bırakılmış, daha uzak bölgeler ise mesafeye bağlı olarak derecelendirilmiştir. Bu kapsamda üretilen uygunluk haritası (Şekil 3.10), jeolojik açıdan daha güvenli alanların mekânsal olarak ayrıştırılmasına olanak sağlamıştır.



**Şekil 3.10:** Balıkesir ilinde aktif fay hatlarına uzaklık (m) kriterine göre elde edilen uygunluk sınıflarının mekânsal dağılımı.

- *Doğalgaz şebekesine uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

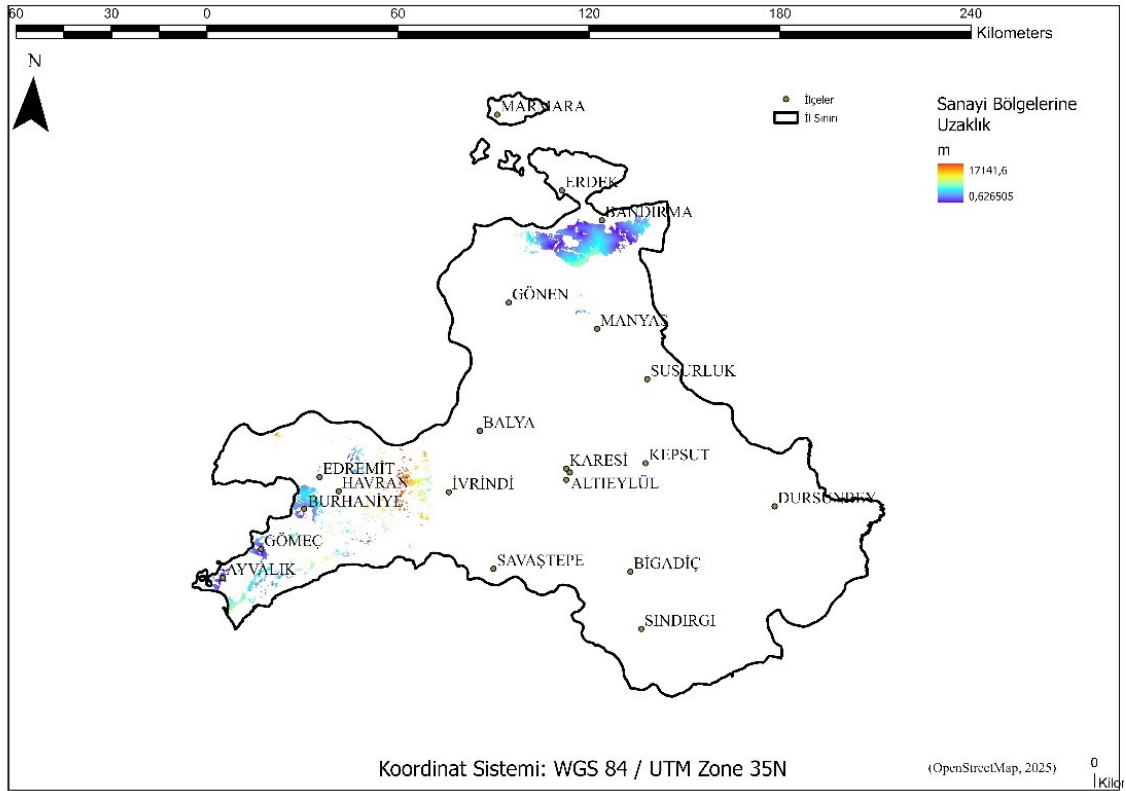
Doğalgaz şebekesine uzaklık kriteri, özellikle hidrojen üretim tesislerinin mevcut enerji altyapısı ile entegrasyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Şebekeye daha yakın alanlar, yatırım ve işletme maliyetlerini azaltma potansiyeli nedeniyle daha yüksek uygunluk sınıflarında yer almıştır. Bu harita (Şekil 3.11), altyapı erişiminin alternatif poligonlar üzerindeki belirleyici etkisini açık biçimde göstermektedir.



**Şekil 3.11:** Balıkesir ilinde doğalgaz şebekesine uzaklık (m) kriterine göre altyapı erişim uygunluk haritası.

- *Organize sanayi bölgelerine uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

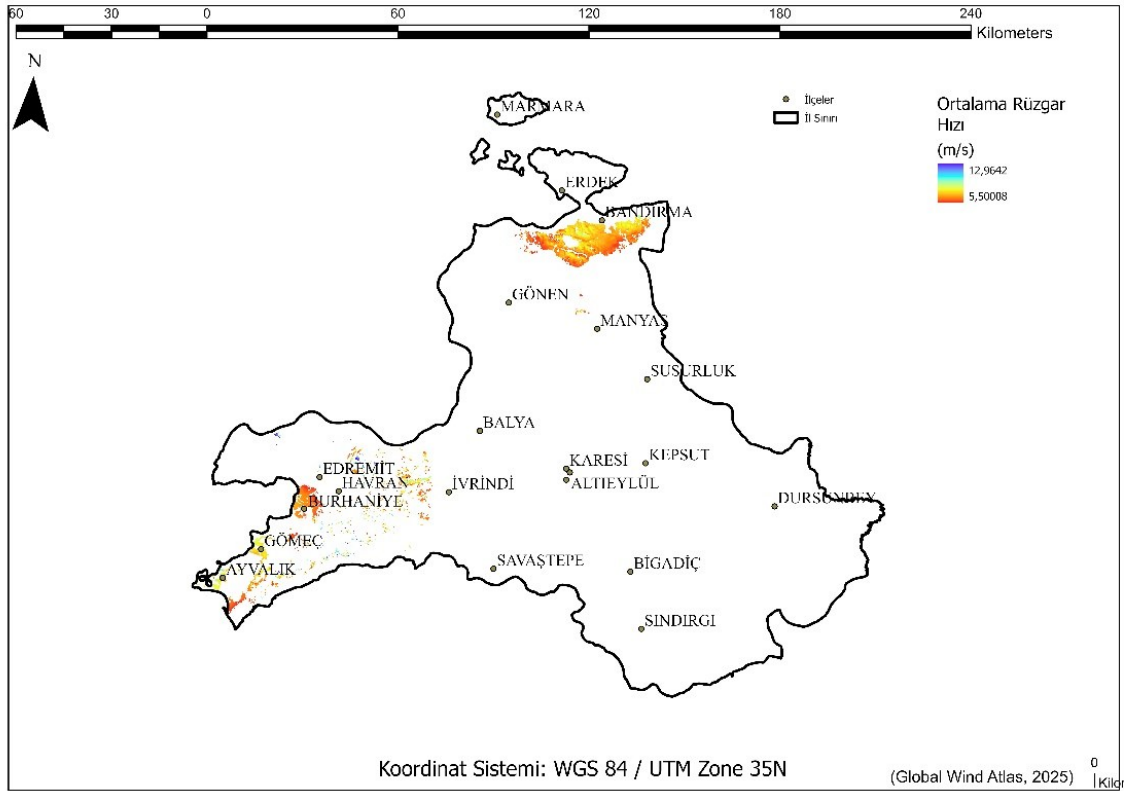
Organize sanayi bölgelerine (OSB) uzaklık kriteri, hidrojenin sanayiye entegrasyonu ve potansiyel talep merkezlerine erişim açısından değerlendirilmiştir. OSB'lere yakın poligonlar, lojistik avantaj ve sanayi kümeleriyle bütünleşme potansiyeli nedeniyle daha yüksek uygunluk değerleri ile temsil edilmiştir (Şekil 3.12). Bu sonuçlar, üretim-tüketim zincirinin mekânsal olarak daha etkin kurgulanabileceği alanları işaret etmektedir.



**Şekil 3.12:** Balıkesir ilinde organize sanayi bölgelerine uzaklık kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası.

- *Ortalama rüzgâr hızı kriterine göre uygunluk analizi;*

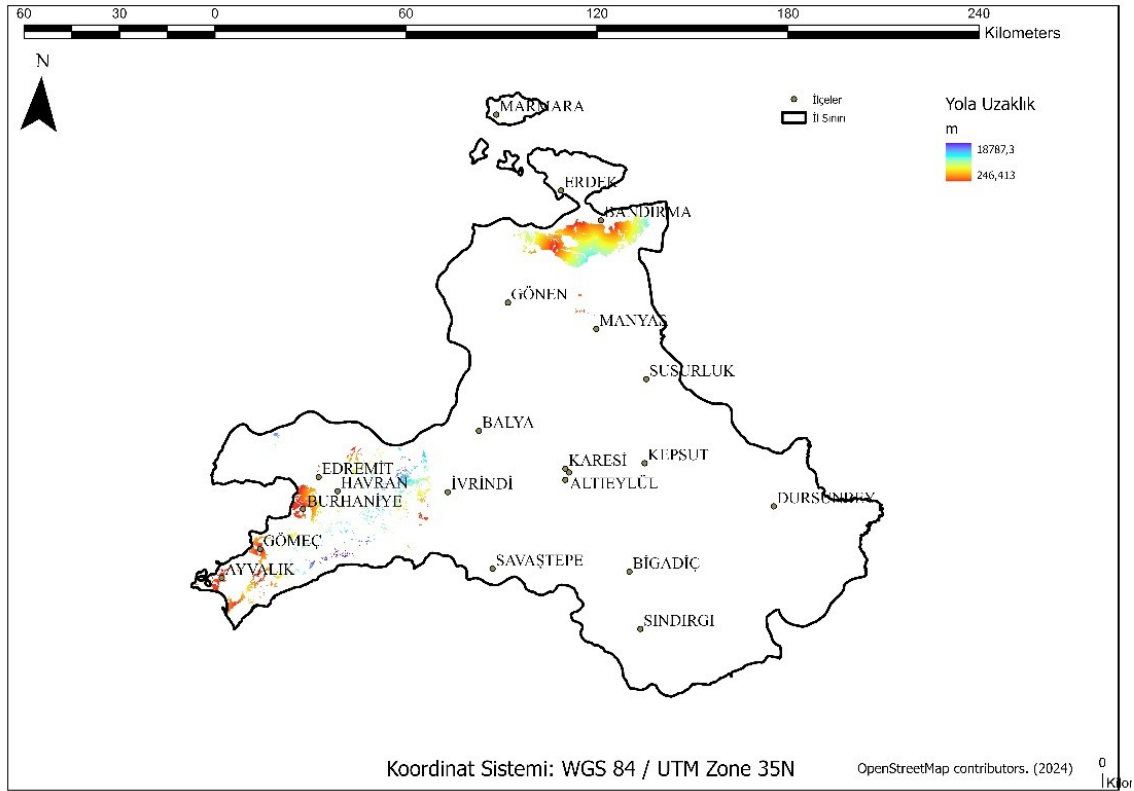
Ortalama rüzgâr hızı kriterine dayalı uygunluk haritası (Şekil 3.13), rüzgâr enerjisi potansiyelinin hidrojen üretim sistemlerine katkısını değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Belirlenen eşik değerin üzerindeki rüzgâr hızlarına sahip alanlar daha yüksek uygunluk dereceleri almıştır. Harita, rüzgâr potansiyelinin belirli bölgelerde yoğunlaştığını ve bu alanların yenilenebilir enerji destekli üretim açısından avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.13:** Balıkesir ilinde ortalama rüzgâr hızı (m/s) kriterine göre oluşturulan rüzgâr enerjisi potansiyeli uygunluk haritası.

- *Yollara uzaklık kriterine göre uygunluk analizi;*

Yol ağına uzaklık kriterine göre oluşturulan uygunluk haritası (Şekil 3.14), hidrojen üretim tesislerinin inşaat, montaj ve işletme aşamalarında ihtiyaç duyulan lojistik erişilebilirliğin mekânsal dağılımını değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Karayolu altyapısına daha yakın poligonlar, ağır ekipman taşımacılığı, şantiye kurulumu ve bakım faaliyetlerinin daha düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesi nedeniyle daha yüksek uygunluk dereceleri ile değerlendirilmiştir. Buna karşılık, yol ağına uzaklığı arttıkça erişim maliyetlerinin yükselmesi ve operasyonel esnekliğin azalması nedeniyle bazı alanlar daha düşük uygunluk sınıflarında yer almıştır. Elde edilen harita, özellikle ana ulaşım akslarına yakın bölgelerde alternatif poligonların belirgin biçimde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.14:** Balıkesir ilinde yol ağına uzaklık kriterine göre oluşturulan ulaşım erişim uygunluk haritası.

### 3.1.5 Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi, hidrojen üretim tesisi yer seçimi gibi çok kriterli karar problemlerinde; nihai uygunluk haritalarını ve sıralama sonuçlarını doğrudan etkilediği için, tek bir bakış açısına dayanmayan bir ağırlıklandırma kurgusu tercih edilir (Shafiee, 2022). Bu kapsamda Entropi, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ve Entropi-FAHP Hibrit yaklaşımı birlikte kullanılarak hem veriye dayalı (nesnel) hem de uzman bilgisine dayalı (öznel) önem düzeyleri aynı çerçevede temsil edilir. Entropi yöntemi, her bir kriterin alternatifler (veya pikseller/poligonlar) üzerindeki dağılımından türetilen “bilgi içeriğini” esas alır; ayırt ediciliği yüksek olan, yani mekânsal olarak daha fazla değişkenlik gösteren kriterler daha yüksek ağırlık alma eğilimindedir. Bu yaklaşım, Shannon’un bilgi entropisi kavramına dayanan ölçüm mantığıyla, kriterlerin karar uzayına kattığı “bilgi” miktarını nicel olarak yakalar (Shannon, 1948). FAHP ise klasik AHP’nin hiyerarşik karşılaştırma mantığını korurken, karar vericilerin belirsiz/linguistik yargılarını üçgensel bulanık sayılarla modelleyerek “eşit derecede dikkate değer”, “biraz daha dikkate değer” gibi ifadeleri matematiksel olarak işleyebilir; böylece uzman değerlendirmelerindeki muğlaklık, bulanık küme teorisinin üyelik dereceleri üzerinden sisteme dâhil edilir. Uygulamada FAHP için

önce kriter çiftleri uzmanlarca dilsel ölçekle karşılaştırılır, bu yargılar bulanık sayılara dönüştürülerek bulanık ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur ve ardından sentez/öncelik vektörü elde edilerek kriter ağırlıkları türetilir. Literatürde bu dönüşüm için farklı prosedürler bulunmakla birlikte, üçgensel bulanık sayılarla “extent analysis” türü çözümler de yaygın biçimde raporlanmıştır (Chang, 1996). Bununla birlikte yalnızca Entropi kullanımı uzman bilgisini dışarıda bırakırken, yalnızca FAHP kullanımı da uzman yargısına bağımlılık nedeniyle farklı uzman profillerinde ağırlıkların değişmesine daha açık olabilir. Bu nedenle Hibrit Entropi–FAHP şeması, iki yaklaşımın tamamlayıcı doğasından yararlanır: Entropi ile elde edilen nesnel ağırlıklar kriterlerin verideki ayırt ediciliğini temsil ederken; FAHP ile elde edilen öznel ağırlıklar, hidrojen tesisleri için güvenlik, mevzuat ve altyapı gerçekliğini taşıyan uzman önceliklerini temsil eder. Hibritleştirme adımı çoğunlukla basit ve şeffaf bir birleştirme kuralıyla yürütülür, böylece tek kaynağa aşırı duyarlılık azaltılarak daha dengeli ve yorumlanabilir bir ağırlık seti üretilir. Bu tür AHP–Entropi hibrit ağırlıklandırma yaklaşımları farklı uygulama alanlarında karar kararlılığını artırma motivasyonu ile yaygın biçimde kullanılmaktadır (Wang et al., 2018).

### 3.1.5.1 Entropi tabanlı nesnel ağırlıklandırma

Bu çalışmada, hidrojen üretim tesisleri için gerçekleştirilen çok kriterli mekânsal değerlendirme sürecinde kriterlerin nesnel ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla Entropi tabanlı ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Entropi yöntemi, bilgi teorisine dayanan ve kriterlerin alternatifler arasındaki değer dağılımını esas alarak her bir ölçütün karar probleminde sağladığı bilgi miktarını nicel olarak değerlendiren bir yaklaşımdır (Vaid et al., 2022). Bu bağlamda, alternatifler arasında yüksek değişkenlik gösteren kriterlerin daha fazla bilgi içerdiği ve karar sürecinde daha yüksek öneme sahip olduğu kabul edilmektedir. Yöntemin ilk aşamasında, tüm kriter ve alternatifleri kapsayan karar matrisi oluşturulmuştur. Karar matrisi, Denklem (3.1)’de verildiği üzere tanımlanmaktadır (Shannon, 1948):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada  $x_{ij}$ , i’inci alternatifin j’inci kritere ait değerini ifade etmektedir. Farklı ölçü birimlerine sahip kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi amacıyla karar matrisi normalize edilmiştir. Bu normalizasyon işlemi, literatürde yaygın olarak kullanılan oranlama

yaklaşımı temel alınarak gerçekleştirilmiş olup Denklem (3.2)'de sunulmuştur Shannon, 1948):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3.2)$$

Normalize edilmiş karar matrisi kullanılarak her bir kriter için Entropi değeri hesaplanmıştır. Entropi değeri, kriterin alternatifler arasındaki belirsizlik ve düzensizlik düzeyini temsil etmekte olup, Shannon'un bilgi entropisi tanımına dayalı olarak Denklem (3.3) yardımıyla elde edilmiştir (Shannon, 1948):

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \quad (3.3)$$

Burada  $k$ , Entropi değerlerinin 0 ile 1 aralığında normalize edilmesini sağlayan katsayıdır ve  $k = -1/\ln(m)$  olarak tanımlanmaktadır. Entropi değeri yüksek olan kriterler alternatifler arasında daha homojen bir dağılım sergilerken, düşük Entropi değerine sahip kriterler daha yüksek ayırt ediciliğe sahip olmaktadır (Zeleny, 1982). Son aşamada, kriterlerin nesnel ağırlıkları, Entropi değerlerine bağlı olarak Denklem (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu aşamada Entropi değeri daha düşük olan kriterlere daha yüksek ağırlık atanmıştır (Shannon, 1948):

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (3.4)$$

Bu tez kapsamında, CBS ortamında yürütülen analizler sonucunda 4795 aday lokasyon için toplam 13 mekânsal kriter elde edilmiştir. Eğim, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı gibi sürekli raster veriler zonal istatistikler yöntemiyle poligon bazında özetlenirken; yol, yerleşim alanları ve enerji iletim hatlarına uzaklık gibi mesafe temelli kriterler Öklidyen mesafe analizi kullanılarak türetilmiştir. Elde edilen tüm kriter katmanları normalize edilerek, Denklem (3.1) – (3.4) kapsamında tanımlanan Entropi yöntemi kullanılarak kriterlerin nesnel ağırlıkları hesaplanmıştır.

### 3.1.5.2 FAHP tabanlı öznel ağırlıklandırma (Chang genişlik analizi)

Bu çalışmada, mekânsal kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde yalnızca veriye dayalı nesnel yaklaşımlarla yetinilmeyerek, karar sürecine uzman görüşlerinin belirsizlik altında dâhil edilebilmesi amacıyla Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) yöntemi

uygulanmıştır. FAHP, klasik AHP yönteminin ikili karşılaştırma yapısını korurken, uzman yargılarındaki belirsizlik ve muğlaklığı bulanık küme teorisi aracılığıyla modele dâhil etmesi bakımından özellikle karmaşık ve çok boyutlu karar problemleri için uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Bu kapsamda, farklı disiplinlerden gelen yedi uzmanın değerlendirmeleri kullanılmıştır. Uzman grubu; bir enerji alanında çalışan akademisyen, bir yatırımcı, bir kamu yönetimi uzmanı, bir coğrafyacı, bir çevre mühendisi, bir politika yapıcı ve yeşil hidrojen uygulamaları konusunda deneyimli bir uygulayıcıdan oluşmaktadır. Böylece teknik, çevresel, ekonomik ve yönetsel bakış açılarının karar sürecine dengeli biçimde yansıtılması hedeflenmiştir. Uzmanlar, kriter çiftlerini karşılaştırırken doğrudan sayısal değerler yerine dilsel ifadeler kullanmış; bu ifadeler daha sonra üçgensel bulanık sayılara (TFN) dönüştürülmüştür. Çalışmada kullanılan dilsel terimler ve bunlara karşılık gelen bulanık sayılar Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

**Tablo 3.2** İkili karşılaştırmalarda kullanılan göreceli önem düzeyleri, üçgensel bulanık sayılar ve karşılık gelen ters bulanık değerler.

<b>Alt Kriterler Arasındaki Göreceli Önem</b>	<b>Üçgensel Bulanık Sayı (Tfn)</b>	<b>Ters Üçgensel Bulanık Sayı</b>
<b>Eşit Derecede Dikkate değer</b>	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
<b>1 İle 3 Arası (Ara Değer)</b>	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
<b>Az Derecede Dikkate değer</b>	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
<b>3 İle 5 Arası (Ara Değer)</b>	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
<b>Dikkate değer</b>	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
<b>5 İle 7 Arası (Ara Değer)</b>	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
<b>Güçlü Derecede Dikkate değer</b>	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
<b>7 İle 9 Arası (Ara Değer)</b>	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)
<b>Aşırı Derecede Dikkate değer</b>	(9, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/9)

Her bir uzman tarafından oluşturulan bulanık ikili karşılaştırma matrisleri, grup kararını temsil edecek tek bir matris elde edebilmek amacıyla geometrik ortalama yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yaklaşım, bireysel aşırı yargıların etkisini azaltırken, her uzmanın değerlendirmesinin oransal yapısını koruması nedeniyle FAHP literatüründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Eğer  $k$ 'ncı uzman tarafından verilen bir kriter çiftine ait değerlendirme  $(l_k, m_k, u_k)$  biçiminde ifade edildiğinde, yedi uzmanın görüşlerinden elde

edilen birleşik üçgensel bulanık sayı Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır (Hsieh et al., 2004):

$$l' = \left( \prod_{k=1}^k l_k \right)^{\frac{1}{n}}, m' = \left( \prod_{k=1}^k m_k \right)^{\frac{1}{n}}, u' = \left( \prod_{k=1}^k u_k \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.5)$$

Bu işlem sonucunda, her bir elemanı  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$  biçiminde tanımlanan  $13 \times 13$  boyutlu birleşik bulanık ikili karşılaştırma matrisi elde edilmiştir. Bu matris, kriter i'nin kriter j'ye göre önem derecesine ilişkin uzman grubunun ortak bulanık değerlendirmesini temsil etmektedir.

Birleşik bulanık karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra, kriter ağırlıklarının hesaplanmasında Chang'ın genişlik (extent) analizi yöntemi uygulanmıştır (Chang, 1996). Bu yöntem, her bir kriterin bulanık ağırlığını, diğer tüm kriterlere göre göreceli üstünlüğünü dikkate alarak belirlemeye imkân tanımaktadır. FAHP uygulaması bu aşamada üç temel adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, her bir kriter için bulanık geometrik ortalama değeri Denklem (3.6) yardımıyla hesaplanmıştır (Hsieh et al., 2004):

$$\tilde{r}_i = \left( \prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right)^{1/n} \quad (3.6)$$

İkinci adımda, her bir kriterin bulanık ağırlığı, elde edilen geometrik ortalamaların toplamına oranlanarak Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanmıştır (Hsieh et al., 2004):

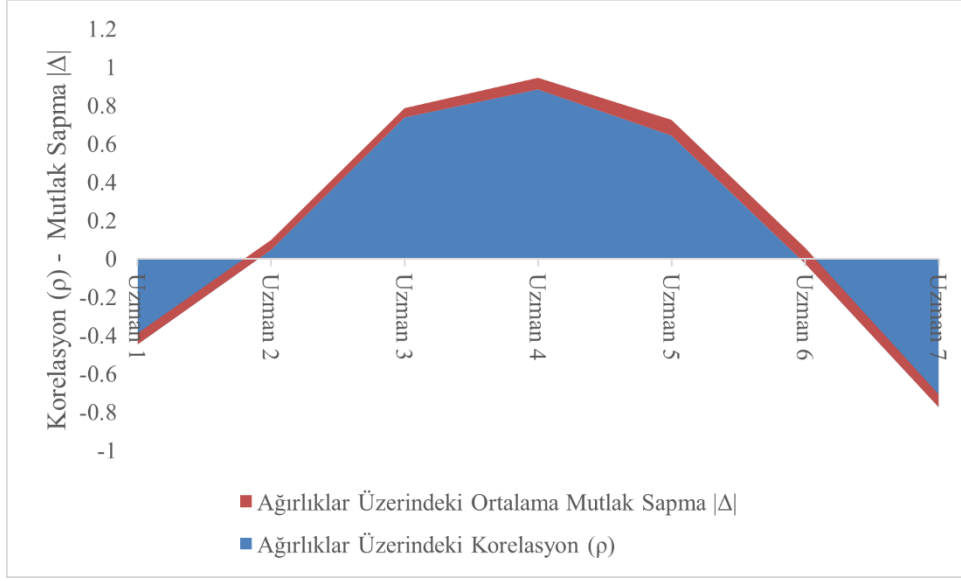
$$\tilde{w}_i = \frac{\tilde{r}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{r}_i} \quad (3.7)$$

Son adımda ise, bulanık ağırlıkların karar modellerinde kullanılabilmesi amacıyla durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan merkez yöntemi tercih edilerek her bir kriterin kesin ağırlığı Denklem (3.8) ile elde edilmiştir (Hsieh et al., 2004):

$$w_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (3.8)$$

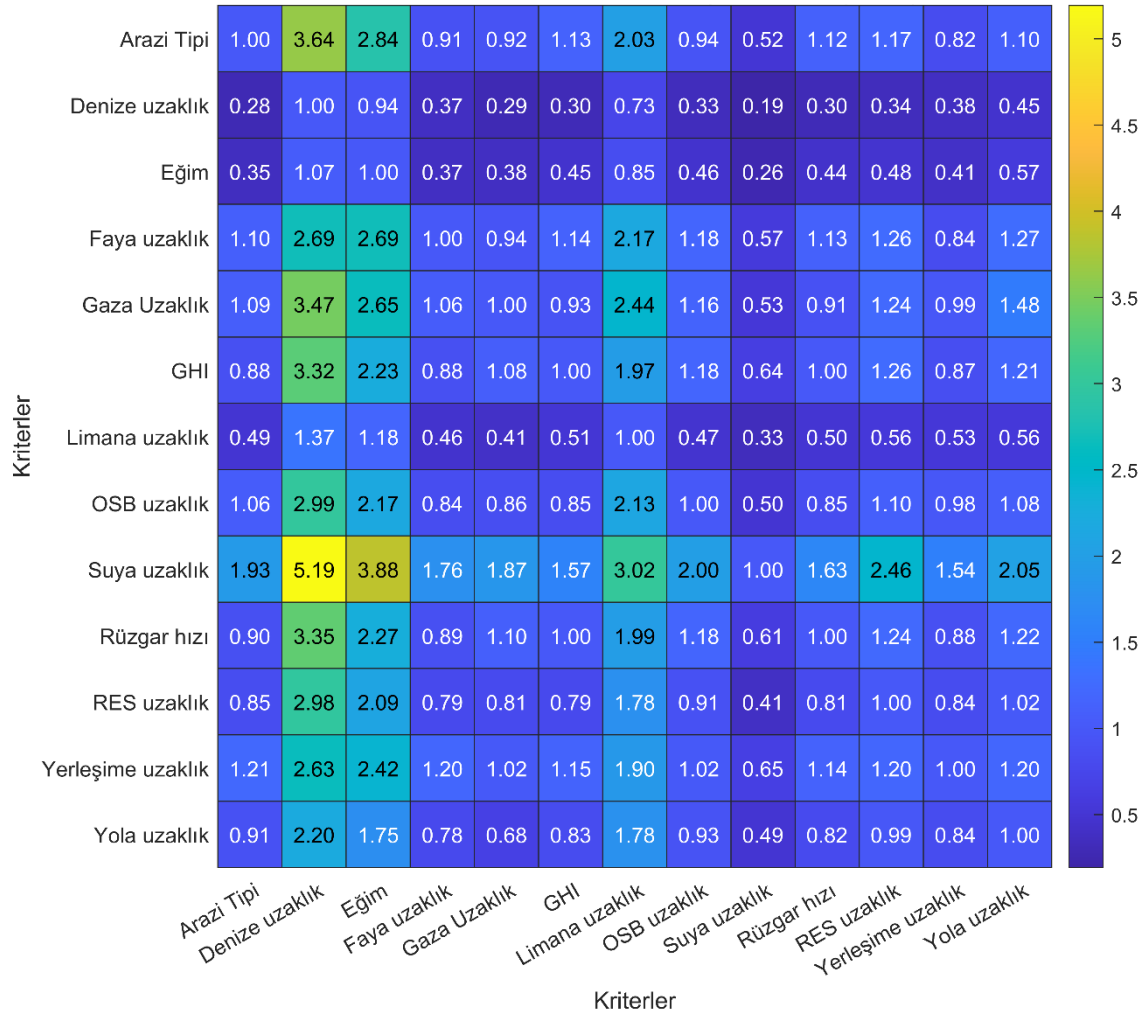
Durulaştırma sonucunda elde edilen ağırlıklar normalize edilerek toplamlarının 1 olması sağlanmış ve bu değerler, kriterlerin nihai FAHP ağırlıkları olarak sonraki mekânsal karar verme analizlerinde kullanılmıştır.

FAHP yöntemi kapsamında kullanılan uzman değerlendirmeleri, yapılandırılmış bir anket formu aracılığıyla toplanmıştır. Uzmanlara sunulan bu anket formunda, her bir mekânsal kriter çifti için Tablo 3.2’de verilen dilsel önem ölçeği esas alınarak ikili karşılaştırmalar yapılması istenmiştir. Uzmanlar, kendi bilgi birikimleri ve mesleki deneyimleri doğrultusunda değerlendirmelerini bağımsız olarak gerçekeştirmiştir. Anket uygulaması sonucunda, enerji alanında akademisyen, yatırımcı, kamu yönetimi uzmanı, coğrafya uzmanı, çevre mühendisi, politika yapıcı (siyaset bilimci) ve yeşil hidrojen alanında uygulamalı çalışmalarda bulunan uzman olmak üzere toplam yedi farklı uzmandan elde edilen bireysel bulanık ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Uzman görüşlerinden kaynaklanabilecek olası yanlılıkları azaltmak ve grup kararının tutarlılığını değerlendirmek amacıyla, her bir uzmanın bireysel ağırlık vektörü ile FAHP yöntemiyle elde edilen birleşik ağırlık vektörü karşılaştırılmıştır. Şekil 3.15’te sunulan korelasyon ve ortalama mutlak sapma değerlerine göre, uzman görüşleri ile birleşik sonuçlar arasında ortalama 0,15 korelasyon ve 0,064 ortalama sapma elde edilmiştir. Düşük korelasyon değeri, uzmanlar arasında kriter öncelikleri açısından belirgin bir görüş çeşitliliği bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle birleşik ağırlıklar, güçlü bir bireysel görüş uyumundan ziyade, farklı uzman değerlendirmelerini geometrik ortalama yöntemiyle dengeleyen grup temelli bir ağırlık seti olarak yorumlanmıştır. Ortalama mutlak sapma değerinin sınırlı düzeyde kalması ise birleşik sonucun bireysel değerlendirmelerden tamamen kopmadığını ve karar süreci için dengeli bir toplulaştırma sağladığını göstermektedir.



**Şekil 3.15:** Uzman görüşleri ile birleşik FAHP ağırlıkları arasındaki korelasyon ve ortalama sapma değerleri.

Şekil 3.16’da, çalışma kapsamında görüşleri alınan 7 uzmanın değerlendirmeleri sonucunda oluşturulan 13 kriterlik ikili karşılaştırma matrisi sunulmaktadır. Uzmanlardan elde edilen üçgensel bulanık sayılar  $(l, m, u)$  üzerinde geometrik ortalama yöntemi uygulanmış ve görselleştirme aşamasında özellikle karar sürecinin merkezini temsil eden  $m$  değerleri dikkate alınmıştır. Böylece, uzman görüşlerinin birleşik etkisi ortaya konmuş ve bireysel farklılıkların etkisi minimize edilmiştir.



**Şekil 3.16:** Uzman değerlendirmeleri sonucunda oluşturulan 13 kriterlik ikili karşılaştırma matrisi.

Şekil incelendiğinde, özellikle suya uzaklık, güneş radyasyonu (GHI) ve rüzgâr hızı kriterlerinin birçok kritere karşı yüksek değerler aldığı görülmektedir. Örneğin, suya uzaklık kriterinin denize uzaklık ve eğim kriterlerine göre sırasıyla yaklaşık 5,19 ve 3,88 gibi yüksek oranlarla baskın olduğu; benzer şekilde GHI ve rüzgâr hızı kriterlerinin arazi tipi, eğim ve çeşitli mesafe temelli kriterlere kıyasla daha yüksek öneme sahip olduğu açıkça gözlemlenmektedir. Bu durum, uzmanların hidrojen üretim tesisleri için yenilenebilir enerji potansiyelini ve su erişimini temel belirleyiciler olarak değerlendirdiğini göstermektedir.

Buna karşılık, denize uzaklık, RES uzaklık ve yola uzaklık gibi altyapı ve erişilebilirlik odaklı kriterlerin, enerji potansiyeline dayalı kriterlere kıyasla daha düşük ve daha dengeli değerler sergilediği görülmektedir. Bu kriterler çoğunlukla 1'in altında veya 1'e yakın değerler almakta olup, uzmanlar tarafından ikincil düzeyde belirleyici faktörler olarak

algılanmaktadır. Ancak bu durum, söz konusu kriterlerin tamamen önemsiz olduğu anlamına gelmemekte; aksine, tesis yer seçimi sürecinde tamamlayıcı ve sınırlayıcı rol üstlendiklerini ortaya koymaktadır. Ayrıca matrisin genel simetrik yapısı, uzman değerlendirmelerinin tutarlı bir biçimde birleştiğini ve geometrik ortalama yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılıklılık ilkesini sağladığını göstermektedir. Yüksek değerlerin belirli kriterlerde yoğunlaşması, uzmanlar arasında yenilenebilir kaynak potansiyeli ve çevresel uygunluk konularında güçlü bir fikir birliği bulunduğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 3.16'da sunulan ikili karşılaştırma matrisi, FAHP yöntemiyle elde edilen öznel ağırlıkların ardındaki uzman algısını sayısal ve görsel olarak açık biçimde ortaya koymakta ve bir sonraki aşamada gerçekleştirilen ağırlık hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır.

### 3.1.5.3 Hibrit (Entropi–FAHP) ağırlıklandırma ve birleştirme kuralı

Bu tez kapsamında, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde yalnızca öznel ya da yalnızca nesnel bir yaklaşımın kullanılmasının, karar sürecini tek yönlü hâle getirebileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, uzman görüşlerine dayalı öznel değerlendirmeler ile veri temelli nesnel bilgiyi aynı çerçevede ele alabilmek amacıyla Hibrit bir ağırlıklandırma yöntemi benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, Bulanık AHP (FAHP) ve Entropi yöntemlerinden elde edilen ağırlıklar birlikte kullanılarak kriterlerin nihai önem dereceleri belirlenmiştir.

FAHP yöntemi, uzmanların deneyim ve bilgi birikimlerini belirsizlik altında modele dâhil edebilmesi açısından güçlü bir araç sunarken; Entropi yöntemi, kriterlerin mekânsal veri seti içerisindeki dağılım ve ayırt edicilik düzeylerini tamamen nesnel biçimde ortaya koymaktadır. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, bir yandan uzman algılarının karar sürecine yansıtılmasını sağlarken, diğer yandan veri yapısının içsel özelliklerinin göz ardı edilmesini engellemektedir. Dolayısıyla hibrit yaklaşım, tek bir ağırlıklandırma yöntemine kıyasla daha dengeli ve güvenilir bir değerlendirme zemini sunmaktadır.

Bu çalışmada, FAHP yöntemiyle elde edilen ve toplamları 1 olacak şekilde normalize edilmiş öznel ağırlıklar ve Entropi yöntemiyle hesaplanan ve yine normalize edilen nesnel ağırlıklar ile birleştirilmiştir. Her bir kriter için hibrit ağırlıklar, bu iki ağırlık kümesinin eşit önemde kabul edilmesiyle Denklem (3.9) yardımıyla hesaplanmıştır (Sharma et al., 2025):

$$H_i = \frac{F_i + E_i}{2} \quad (3.9)$$

Burada  $H_i$ ,  $i$ 'inci kriterin hibrit ağırlığını;  $F_i$ , FAHP yöntemiyle elde edilen öznel ağırlığı;  $E_i$  ise Entropi yöntemiyle hesaplanan nesnel ağırlığı ifade etmektedir. Bu eşit ağırlıklı birleştirme yaklaşımı, uzman yargıları ile veri tabanlı bilginin karar sürecine eşdeğer katkı sağlamasını hedeflemektedir. Elde edilen hibrit ağırlıklar, çalışmanın ana omurgasını oluşturan uzamsal çok kriterli karar verme analizinde kullanılmıştır. Böylece, hem uzmanların hidrojen üretim tesislerine ilişkin algıları hem de mekânsal veri setinin istatistiksel özellikleri aynı anda değerlendirilerek daha gerçekçi ve sağlam bir uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir.

### **3.1.6 Çok kriterli karar verme modelleri ile alternatiflerin sıralanması**

Balıkesir ili genelinde belirlenen 4795 aday planlama biriminin görelî uygunluk düzeylerinin değerlendirilmesi amacıyla üç farklı ÇKKV yöntemi kullanılmıştır: TOPSIS, MOORA ve VIKOR. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, elde edilen sonuçların yöntemsel duyarlılığının incelenmesine ve alternatif sıralamalarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Yöntemler arası karşılaştırmanın sağlıklı ve tutarlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla, tüm analizlerde aynı normalize edilmiş karar matrisi kullanılmıştır. Ayrıca kriterlerin görelî önemlerini yansıtan ağırlıklar, Entropy, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ve Hibrit ağırlık setleri aracılığıyla belirlenmiş ve her bir ÇKKV yöntemine aynı şekilde uygulanmıştır. Bu yaklaşım, normalizasyon ve ağırlıklandırma kaynaklı farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisini ortadan kaldırarak, yöntemlerin yalnızca kendi karar mekanizmaları üzerinden karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır. Bu sayede, aday planlama birimlerinin sıralanmasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir, tekrarlanabilir ve metodolojik açıdan tutarlı bir yapı kazanmış; farklı ÇKKV yöntemlerinin mekânsal karar verme problemlerindeki performansları nesnel bir biçimde değerlendirilmiştir.

#### **3.1.6.1 TOPSIS yöntemi**

İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS), alternatifleri pozitif ideal çözüme yakınlıkları ve negatif ideal çözümden uzaklıklarını dikkate alarak sıralayan bir ÇKKV yöntemidir (Behzadian et al., 2012; Ye and Li, 2014). Bu çalışmada, kriter değerleri vektör normalizasyonu ile boyutsuzlaştırıldı ve elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturuldu. Fayda ve maliyet yönleri dikkate alınarak pozitif ve negatif ideal çözümler belirlendi, ardından her planlama biriminin bu çözümlere

olan Öklidyen uzaklıkları hesaplandı. Alternatiflerin ideal çözüme görelî yakınlık katsayısı aşağıdaki Denklem (3.10) elde edilmiştir (Hwang and Yoon, 1981):

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (3.10)$$

Yakınlık katsayısının değeri 0 ile 1 arasında değışmekte olup,  $C_i$  değeri 1'e yaklaştıkça ilgili alternatifin ideal çözüme daha yakın olduğu kabul edilmektedir. Bu doğrultuda, alternatifler  $C_i$  değerlerine göre azalan sırada sıralanarak nihai karar elde edilmektedir.

### 3.1.6.2 MOORA yöntemi

MOORA, Brauers ve Zavadskas (2006) tarafından geliştirilen ve alternatifleri fayda ve maliyet kriterleri altındaki görelî performanslarına göre sıralayan bir ÇKKV yöntemidir. Bu çalışmada, kriter değerleri vektör normalizasyonu ile boyutlandırıldı ve elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturuldu. Her bir alternatifin genel performans değeri Denklem (3.11) kullanılarak, fayda kriterlerine ait ağırlıklı normalize değerlerin toplamından maliyet kriterlerine ait değerlerin çıkarılmasıyla hesaplanmıştır (Karel et al., 2006):

$$Y_i = \sum_{j \in B} v_{ij} - \sum_{j \in C} v_{ij} \quad (3.11)$$

Burada  $B$ , fayda türündeki kriterler kümesini;  $C$  ise maliyet türündeki kriterler kümesini temsil etmektedir. Elde edilen  $Y_i$  değerleri, alternatiflerin genel uygunluk düzeylerini yansıtmaktadır. Bu doğrultuda, alternatifler  $Y_i$  değerlerine göre azalan sırada sıralanmış olup, daha yüksek  $Y_i$  değerine sahip alternatifler daha uygun olarak değerlendirilmiştir.

### 3.1.6.3 VIKOR yöntemi

Uzlaşık Çözüm Temelli Çok Kriterli Optimizasyon Yöntemi (VIKOR), grup faydasının maksimize edilmesi ile bireysel pişmanlığın minimize edilmesi arasındaki dengeyi esas alan bir uzlaşık çözüm yaklaşımıdır. Bu çalışmada, her kriter için en iyi ve en kötü değerler belirlendi ve kriter ağırlıkları kullanılarak alternatiflerin toplam sapmasını gösteren grup faydası değeri ( $S_i$ ) ile en yüksek kriter sapmasını gösteren bireysel pişmanlık değeri ( $R_i$ ) hesaplandı. Alternatiflerin uzlaşık sıralamasında kullanılan VIKOR indeksi Denklem (3.12) kullanılarak elde edildi (Opricovic and Tzeng, 2007):

$$Q_i = v \cdot \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (3.12)$$

Burada  $S^* = \min_i S_i$ ,  $S^- = \max_i S_i$ ,  $R^* = \min_i R_i$  ve  $R^- = \max_i R_i$  değerlerini göstermektedir. Grup faydası ile bireysel pişmanlığa eşit önem verilmesi amacıyla  $v = 0,5$  olarak alınmıştır. Alternatifler  $Q_i$  değerlerine göre artan sırada sıralanmış ve daha düşük  $Q_i$  değerine sahip planlama birimleri daha uygun kabul edilmiştir. Nihai uzlaşık çözüm, kabul edilebilir üstünlük ve karar istikrarı koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir.

#### 3.1.6.4 Tutarlılık, uzlaş ve sağlamlık analizleri

Çok sayıda alternatifin ve birden fazla ağırlıklandırma–karar verme kombinasyonunun kullanıldığı mekânsal ÇKKV problemlerinde, elde edilen sıralamaların belirli bir yönteme veya varsayıma aşırı derecede bağımlı olması dikkate değer bir metodolojik risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen sıralama sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla, yöntemler arası tutarlılık, uzlaş ve sağlamlık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, farklı karar verme mantıkları altında üretilen sıralamaların ne ölçüde örtüştüğünü ve hangi alternatiflerin yöntemden bağımsız olarak istikrarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

- *Spearman sıra korelasyonu ile yöntemler arası tutarlılık analizi*

Farklı ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma yaklaşımları altında elde edilen sıralamalar arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi amacıyla Spearman sıra korelasyon katsayısı ( $\rho$ ) kullanılmıştır. Spearman katsayısı, parametrik varsayımlara dayanmayan ve sıralama temelli karşılaştırmalar için uygun bir ölçüt olup, iki sıralama arasındaki monoton ilişkiyi değerlendirmektedir (Spearman, 1904). Spearman korelasyon katsayısı Denklem (3.13) ile hesaplanmaktadır:

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (3.13)$$

Burada  $d_i$ , aynı alternatif için iki farklı sıralamadaki sıra farkını,  $n$  ise toplam alternatif sayısını ifade etmektedir. Katsayının 1'e yaklaşması güçlü bir pozitif ilişkiyi, 0'a yaklaşması ilişkisizliği, -1'e yaklaşması ise ters yönlü güçlü bir ilişkiyi göstermektedir.

- *Kendall's uyum katsayısı ( $W$ ) ile küresel uzlaş düzeyi analizi*

Birden fazla sıralama seti arasındaki genel uyum düzeyini değerlendirmek amacıyla Kendall'ın Uyum Katsayısı ( $W$ ) kullanılmıştır. Kendall's  $W$ , çoklu sıralamaların ne ölçüde ortak bir düzen sergilediğini tek bir istatistiksel gösterge ile ifade etmekte ve ÇKKV literatüründe yöntemler arası uzlaşmayı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Kendall and Smith, 1939). Kendall'ın uyum katsayısı Denklem (3.14) ile hesaplanmaktadır:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \quad (3.14)$$

Burada  $m$ , sıralama yapan yöntem sayısını,  $n$  alternatif sayısını,  $S$  ise alternatiflerin toplam sıralarının ortalamadan sapmalarının kareler toplamını ifade etmektedir.  $W$  katsayısının 1'e yaklaşması güçlü bir uzlaşmayı, 0'a yaklaşması ise zayıf bir uyumu göstermektedir.

- *Ortalama sıra ve standart sapma ile alternatif istikrarı analizi*

Yöntemden bağımsız olarak istikrarlı performans gösteren alternatifleri belirlemek amacıyla, her bir alternatif için tüm ÇKKV konfigürasyonları altında elde edilen sıralamalar kullanılarak ortalama sıra değeri ve standart sapma hesaplanmıştır. Ortalama sıra, alternatifin genel uygunluk düzeyini temsil ederken; standart sapma, sıralamanın yöntemler arasında ne ölçüde değiştiğini göstermektedir (Ilić et al., 2025). Ortalama sıra ( $\bar{r}_i$ ) ve standart sapma ( $\sigma_i$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Denklemler 3.15 ve 3.16):

$$\bar{r}_i = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k r_{ij} \quad (3.15)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k (r_{ij} - \bar{r}_i)^2} \quad (3.16)$$

Burada  $k$ , kullanılan toplam ÇKKV konfigürasyonu sayısını,  $r_{ij}$  ise  $i$ 'inci alternatifin  $j$ 'inci sıralamadaki konumunu ifade etmektedir. Düşük ortalama sıra ve düşük standart sapma değerlerine sahip alternatifler, yöntemden bağımsız olarak güvenilir ve sağlam adaylar olarak değerlendirilmiştir.

- *Borda sayımı ile birleşik sıralama (Consensus ranking)*

Birden fazla ÇKKV konfigürasyonundan elde edilen sıralamaların bütüncül bir değerlendirmesini sağlamak amacıyla, destekleyici bir sentez yöntemi olarak Borda Sayım

Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, her alternatif her bir sıralamadaki konumuna göre puanlandırılmakta ve toplam puanlar üzerinden birleşik bir sıralama elde edilmektedir (Saşabun and Urbaniak, 2020). Bir alternatif için Borda puanı Denklem 3.17 hesaplanmaktadır:

$$B_i = \sum_{k=1}^m (n - r_{ik}) \quad (3.17)$$

Burada  $n$  alternatif sayısını,  $r_{ij}$   $i$ 'inci alternatifin  $j$ 'inci sıralamadaki konumunu ve  $k$  toplam sıralama sayısını ifade etmektedir. Yüksek Borda puanına sahip alternatifler, yöntemler arası uzlaşa açısından daha güçlü adaylar olarak değerlendirilmiştir.

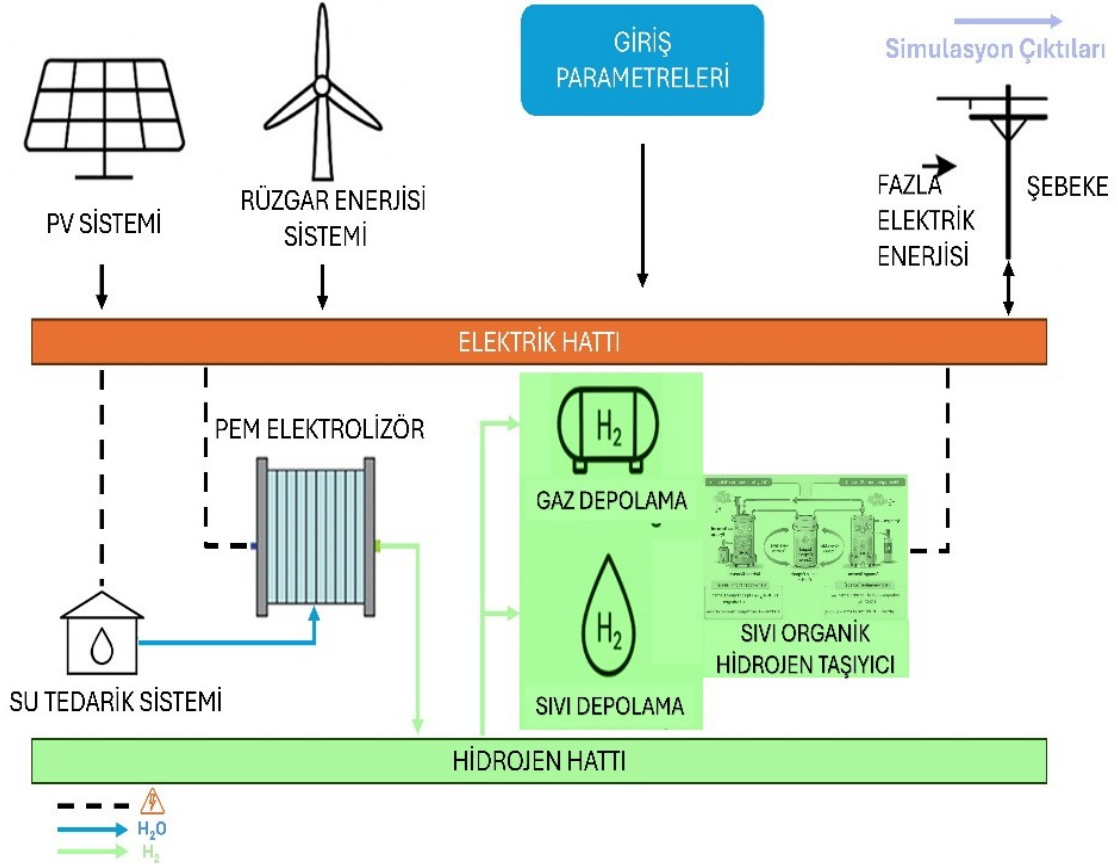
### 3.1.7 CBS entegrasyonu ve uygunluk haritalarının üretilmesi

Çalışmada, elde edilen tüm ÇKKV sonuçlarının mekânsal bağlamda yorumlanabilmesi amacıyla, sıralama, tutarlılık ve uzlaşa analizlerinden elde edilen çıktılar CBS ortamına entegre edilmiştir. CBS entegrasyonu, sayısal karar çıktılarının yalnızca tablo bazlı değil, aynı zamanda mekânsal örüntüler üzerinden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, her bir aday planlama birimi için hesaplanan ÇKKV skorları, sıralamalar, ortalama sıra değerleri, standart sapmalar ve uzlaşaya dayalı performans göstergeleri, ilgili mekânsal poligon verileri ile ilişkilendirilmiştir. Söz konusu ilişkilendirme işlemi, her bir planlama birimine ait benzersiz tanımlayıcılar (ID) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm sonuçlar öznetelik tablolarına aktarılmıştır. CBS ortamında gerçekleştirilen bu entegrasyon sayesinde, farklı ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma yaklaşımlarının ürettiği sonuçlar tematik haritalar aracılığıyla görselleştirilmiştir. Böylece, yöntemler arası benzerlikler ve farklılıklar mekânsal olarak karşılaştırılabilir hâle gelmiş; belirli bölgelerde ortaya çıkan tutarlı yüksek uygunluk alanları ile yöntemsel duyarlılığa sahip alanlar açık biçimde ayırt edilebilmiştir. Ayrıca, uzlaşa ve sağlamlık analizleri kapsamında elde edilen göstergeler kullanılarak, yöntemden bağımsız olarak istikrarlı performans sergileyen aday alanlar mekânsal olarak vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, tek bir ÇKKV yöntemine dayalı kararların ötesine geçerek, farklı karar mantıklarının ortaklaştığı bölgelerin belirlenmesine olanak sağlamış ve mekânsal karar verme sürecinin güvenilirliğini artırmıştır. Bu sebeple, CBS entegrasyonu, çalışmada kullanılan ÇKKV yaklaşımlarını mekânsal karar destek sistemi çerçevesinde bütünleştirerek, elde edilen uygunluk sonuçlarının hem analitik hem de görsel açıdan daha kolay yorumlanabilir olmasına katkı sağlamıştır. Bu entegrasyon, yeşil hidrojen üretim tesisleri için potansiyel lokasyonların belirlenmesinde karar vericilere çok katmanlı ve yöntemler arası tutarlılığı gözetilen bir değerlendirme altyapısı sunmaktadır.

### 3.2 Yeşil Hidrojen Üretim Sisteminin Teknik Modellemesi

Bu bölümde geliştirilen metodolojik çerçeve (Şekil 3.17), yüksek zamansal çözünürlüklü teknik simülasyonlar ile uzun ddikkate değer tekno-ekonomik değerlendirmeyi bütüncül bir yapı altında birleştirmektedir. Literatürde yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemlerine yönelik mevcut tekno-ekonomik modellerin büyük bölümü, fotovoltaik sistemler için sabit verim varsayımları, rüzgâr türbinleri için üreticiye ait statik güç eğrileri ve elektrolizörler için termal etkileri ve yaşlanma mekanizmalarını ihmal eden analizler üzerine kuruludur. Bu tür yaklaşımlar, özellikle kısmi yük koşullarında sistem davranışını yeterince temsil edememekte ve zamana bağlı performans değişimlerini olduğundan düşük tahmin etmektedir.

Geliştirilen MATLAB/Simulink tabanlı modelin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla PV, rüzgâr türbini ve elektrolizör alt modelleri ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Bu kapsamda, aynı meteorolojik veriler ve benzer sistem kabulleri kullanılarak HOMER Pro ortamında eşdeğer referans senaryolar oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar geliştirilen model çıktılarıyla karşılaştırılmıştır. HOMER Pro bu çalışmada deneysel bir doğrulama aracı olarak değil, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ticari bir yazılım olması nedeniyle karşılaştırmalı bir referans olarak değerlendirilmiştir. Böylece PV ve rüzgâr üretimi, elektrolizörün elektrik tüketimi ve hidrojen üretim miktarı açısından model çıktılarının beklenen eğilimleri takip edip etmediği ve makul değer aralıklarında kalıp kalmadığı incelenmiştir.



**Şekil 3.17:** Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemi için dinamik Simulink modellemesi ve çok amaçlı optimizasyon iş akışının genel şeması.

Bu çalışmada söz konusu sınırlamalar, tüm alt sistemlerin fizik temelli ve zamana bağlı olarak modellenmesine olanak tanıyan tamamen dinamik bir Simulink tabanlı çerçeve ile aşılmıştır. Model, saatlik meteorolojik verilerle beslenmekte ve her bir alt sistem için ayrıntılı teknik alt modeller içermektedir. Böylece, enerji üretimi, hidrojen üretimi ve ekonomik göstergeler arasında zamansal tutarlılığı yüksek bir model bütünlüğü sağlanmaktadır.

Fotovoltaik alt sistem, tek diyotlu elektriksel model kullanılarak tanımlanmış ve Newton–Raphson yöntemi ile iteratif olarak çözülmüştür. Modül sıcaklığı, NOCT yaklaşımı ile ışınlam ve çevresel koşullara bağlı olarak hesaplanmıştır; sıcaklık geri beslemesi ve saatlik bazda tanımlanan performans kaybı etkileri modele dâhil edilmiştir. Bu yaklaşım, PV dizisinin I–V ve güç–sıcaklık tepkilerini gerçekçi bir şekilde temsil etmektedir.

Rüzgâr türbini modelinde, literatürde yaygın olarak kullanılan sabit güç eğrileri yerine, rotor aerodinamiğine dayalı  $C_p(\lambda)$  formülasyonu kullanılmıştır. Bu sayede uç hız oranına bağlı geçici davranışlar, Betz sınırının altındaki verim değişimleri ve rüzgâr hızındaki kısa süreli dalgalanmaların güç çıktısına etkisi modellenmiştir.

PEM elektrolizör alt sistemi, elektrokimyasal ve termal süreçlerin birlikte ele alındığı ayrıntılı bir yapı ile temsil edilmiştir. Aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon aşırı gerilimleri, hücre içi ısı üretimi, zamana bağlı sıcaklık değişimi ve her 80 000 saatlik çalışma periyodunda tanımlanan gerilim bozunumu modele entegre edilmiştir. Bu yapı sayesinde, elektrolizörün yük takibi kabiliyeti ve yaşam döngüsü boyunca performans değişimi önceki çalışmalara kıyasla daha gerçekçi şekilde analiz edilebilmektedir.

Yardımcı sistemler kapsamında, hidrojen sıkıştırma ve sıvılaştırma süreçlerine ait enerji gereksinimleri dinamik olarak hesaplanmış; ayrıca su arıtma sistemine ait yatırım (CAPEX) ve işletme (OPEX) maliyetleri açık biçimde ekonomik modele bağlanmıştır. Böylece teknik işletme koşulları ile ekonomik çıktılar arasında doğrudan bir ilişki kurulmuştur.

Tüm alt sistemlerden elde edilen saatlik durum değişkenleri, yaklaşık 175200 saatlik (20 yıl) bir simülasyon süresi boyunca izlenmiş ve indirgenmiş nakit akışları ile ilişkilendirilmiştir. Bu yapı; sistem bozunumu, karbon vergisi senaryoları ve oksijen yan ürününün ekonomik değeri gibi unsurların, LCOH üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Geliştirilen bu çerçeve, önceki durağan veya yarı-ampirik yaklaşımları aşarak, enerji dengeleri, yaşlanma eğilimleri ve ekonomik göstergeler arasında fizik temelli ve zamana bağlı bir tutarlılık sağlamaktadır.

### **3.2.1 Yeşil hidrojen üretim sisteminin fiziksel ve dinamik modellemesi**

Bu çalışmada yer alan tüm alt sistemler, yüksek zamansal çözünürlükte çıktı elde edebilmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Simulink, elektriksel, mekanik ve kontrol tabanlı alt sistemlerin aynı platformda bütünlük olarak temsil edilmesine olanak sağlayan, çok alanlı dinamik sistemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir simülasyon ortamıdır (MathWorks, 2024). Bu yapı sayesinde, yenilenebilir enerji üretimi, hidrojen üretimi ve sistem işletimi saatlik bazda birlikte değerlendirilebilmiştir.

Önceki bölümde gerçekleştirilen CBS tabanlı yer seçimi analizi sonucunda, Bandırma ilçesi hidrojen üretim tesisi kurulumu için en uygun lokasyon olarak belirlenmiştir. Bu nedenle Bandırma, çalışmanın mekânsal açıdan optimal çözümünü temsil etmektedir. Bununla birlikte, tekno-ekonomik modelleme aşamasının amacı yalnızca tek bir lokasyonun performansını incelemek değil; geliştirilen modelin farklı yenilenebilir kaynak profillerine sahip bölgelerde de uygulanabilir ve güvenilir olduğunu ortaya koymaktır.

Bu doğrultuda, Bandırma'ya ek olarak Çeşme ve Mersin olmak üzere iki farklı lokasyon daha analize dâhil edilmiştir. Çeşme, rüzgâr enerjisinin baskın olduğu bir kıyı bölgesini temsil ederken; Mersin yüksek güneşlenme potansiyeline sahip, fotovoltaik üretimin ön planda olduğu bir bölgeyi temsil etmektedir. Bandırma ise rüzgâr ve güneş kaynaklarının birbirini tamamladığı dengeli bir hibrit yapıya sahiptir. Bu üç lokasyonun birlikte ele alınması, sistem davranışının farklı PV-rüzgâr bileşimleri ve şebeke etkileşimleri altında karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân sağlamaktadır.

Fotovoltaik ve rüzgâr türbini alt modelleri, her bir lokasyona ait meteorolojik veriler kullanılarak saatlik yenilenebilir elektrik üretimini hesaplamaktadır. Tüm lokasyonlar için aynı teknik yapı ve modelleme yaklaşımı kullanılmış, böylece sonuçlar arasındaki farkların yalnızca yenilenebilir kaynak potansiyeli ve zamansal değişkenlikten kaynaklanması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, önerilen tekno-ekonomik çerçevenin belirli bir bölgeye özgü olmadığını, uygun iklim ve maliyet verileri sağlandığında farklı ülkeler ve bölgeler için de doğrudan uygulanabileceğini göstermektedir.

Simülasyonlarda kullanılan saatlik meteorolojik veriler; küresel yatay ışıınım (ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN), 2 m hava sıcaklığı (T2M) ve 50 m rüzgâr hızı (WS50M) parametrelerini içermekte olup, NASA POWER veri tabanı üzerinden Bandırma (40.35° K, 27.97° D), Çeşme (38.32° K, 26.30° D) ve Mersin (36.80° K, 34.63° D) lokasyonları için temin edilmiş ve 20 yıl için türetilmiştir (NASA POWER Project, 2025).

PEM elektrolizör modeli; yığın gerilimini, elektrik tüketimini, hidrojen kütesel debisini ve su dengesini dinamik olarak hesaplamaktadır. Sıkıştırma ve su arıtma alt sistemleri hem enerji tüketimi hem de işletme kısıtları dikkate alınarak modellenmiştir. Tüm alt sistemler sistem genelinde bir enerji dengesi içerisinde birleştirilmiş; fazla elektrik enerjisi şebekeye satılırken, yetersiz kaldığı durumlarda şebekeden elektrik temin edilmiştir. Elektrolizörün

başlangıç ve duruş saatleriyle tanımlanan işletme programı, kapasite faktörü ve yenilenebilir enerji oranının hesaplanmasında temel alınmıştır.

### 3.2.1.1 Fotovoltaik güç üretim modeli

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve günümüzde en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir. Bu sistemlerde enerji dönüşümü, yarı iletken yapıya sahip fotovoltaik hücreler sayesinde gerçekleşmektedir. PV sistemlerin hareketli parça içermemesi, bakım ihtiyacının düşük olması ve işletme sırasında çevreye zarar vermemesi dikkate değer avantajlar sağlamaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan PV teknolojileri monokristal, polikristal ve ince film panellerdir. Monokristal paneller daha yüksek verim sunarken, polikristal paneller maliyet açısından daha avantajlıdır. İnce film teknolojileri ise daha düşük verimlerine rağmen esnek yapıları ve bazı çalışma koşullarındaki performansları ile tercih edilebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde PV sistemler, özellikle yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim sistemlerinde temel elektrik kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Duffie and Beckman, 2013; Kalogirou, 2009).

Bu çalışmada fotovoltaik (PV) alt sistem, literatürde yaygın olarak kullanılan ve dizi I–V karakteristiklerini yeterli doğrulukla temsil edebilen tek diyotlu eşdeğer devre modeli esas alınarak modellenmiştir (Villalva et al., 2009a). Model parametreleri üretici firma veri sayfalarından elde edilmiş, PV dizisi boyutu ise kurulu PV kapasitesine bağlı olarak ölçeklendirilmiştir.

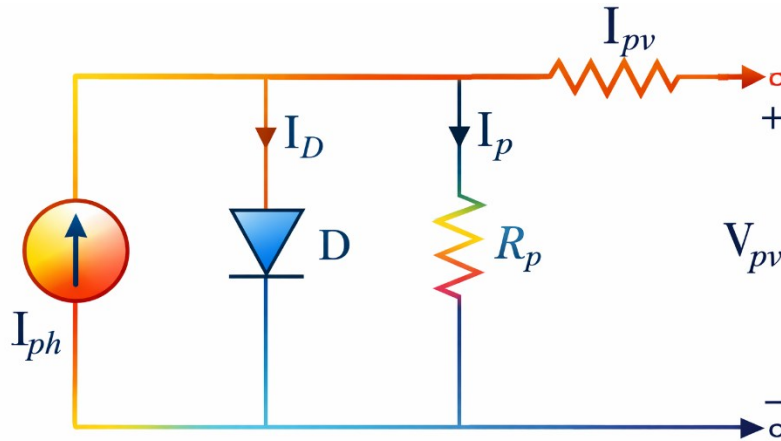
Saatlik zaman adımlarında güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı verileri kullanılarak PV hücresinde oluşan fotoakım ( $I_{ph}$ ) ve hücre sıcaklığı hesaplanmıştır; elde edilen bu parametreler kullanılarak PV dizisinin akım–gerilim (I–V) karakteristiği belirlenmiş ve sistemin doğru akım (DC) çıkış gücü hesaplanmıştır. Uzun dikkate değer işletme koşullarının gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi amacıyla, PV modüllerinde meydana gelen yıllık performans düşüşü modele dâhil edilmiştir. Ayrıca, değişken çevresel koşullar altında PV dizisinden maksimum gücün elde edilebilmesi için maksimum güç noktası izleme (MPPT) stratejisi uygulanmıştır. Fotovoltaik modül, güneş ışınımını doğrudan doğru akım (DC) elektriğe dönüştüren, sessiz çalışan ve işletme sırasında çevresel etkileri oldukça sınırlı olan bir enerji dönüşüm teknolojisidir. PV modülleri, seri ve/veya paralel bağlanmış fotovoltaik hücrelerden oluşmakta olup, bu hücreler güneş ışığına maruz bırakıldığında elektrik üreten

p–n birleşimine sahip yarı iletken diyotlar olarak davranmaktadır (Ramos Hernanz Ja et al., 2024; Villalva et al., 2009a). İstenen kurulu güce ulaşmak amacıyla PV modülleri bir araya getirilerek fotovoltaik diziler oluşturulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan PV modülü, 54 hücreden oluşan ve 200 W nominal güce sahip ticari bir paneldir. Toplam sistem kapasitesi, kullanılan modül sayısına bağlı olarak ölçeklendirilmiştir. Modüle ait temel elektriksel özellikler Tablo 3.3’te sunulmuştur (Kyocera Corporation, 2008).

**Tablo 3.3:** Simulasyonda kullanılan PV hücresinin 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım altındaki özellikleri.

Özellik	Değer	Birim
Açık Devre Gerilimi ( $V_{oc}$ )	32,9	V
Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )	8,21	A
Hücre Sayısı	54	–
Modül Alanı	1,41	m <sup>2</sup>
Maksimum Güç Akımı ( $I_{mp}$ )	7,61	A
Maksimum Güç Gerilimi ( $V_{mp}$ )	26,3	V

PV hücresinin tek diyotlu eşdeğer devresi Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Bu modelde seri direnç ( $R_s$ ) hücre içi iletim kayıplarını, paralel direnç ( $R_{sh}$ ) ise sızıntı akımlarını temsil etmektedir.



**Şekil 3.18:** PV Panelin Tek Diyot Eşdeğer Devresi (Villalva et al., 2009b).

PV dizisinde kullanılan panel sayısı, kurulu PV gücü  $PV_{size}$ (MW) ve tek bir panelin nominal gücü  $P_{panel}$ (W) kullanılarak Denklem 3.18 ile hesaplanmıştır:

$$N_{panels} = \frac{PV_{size}}{P_{panel}} \quad (3.18)$$

Hücre çalışma sıcaklığı, ortam sıcaklığı  $T_{amb}$  ve yatay düzleme gelen güneş ışınımı  $G$  kullanılarak NOCT yaklaşımı ile Denklem 3.19 ve 3.20 ile hesaplanmıştır (Villalva et al., 2009a):

$$T_{cell,^{\circ}C} = T_{amb} + \frac{G}{800} \cdot (T_{NOCT} - 20) \quad (3.19)$$

$$T_{cell} = T_{cell,^{\circ}C} + 273,15 \quad (3.20)$$

Burada  $T_{NOCT}$ , nominal çalışma hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Fotoakım ( $I_{ph}$ ), hücre sıcaklığı ve ışınımına bağlı olarak Denklem 3.21 ile hesaplanmıştır (Villalva et al., 2009a):

$$I_{ph} = I_{sc,ref} + K_i \cdot (T_{cell} - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (3.21)$$

Bu denklemde  $I_{sc,ref}$  referans koşullardaki kısa devre akımını,  $K_i$  sıcaklık katsayısını,  $T_{ref}$  referans sıcaklığı (298.15 K) ve  $G_{ref} = 1000 \text{ W m}^{-2}$  referans ışınım değerini temsil etmektedir. Ters doyma akımı Denklem 3.22 ve 3.23 ile ifade edilmiştir (Alrahim Shannan et al., 2013):

$$I_{rs} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc,ref}}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T_{ref}}\right) - 1} \quad (3.22)$$

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T_{cell}}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right] \quad (3.23)$$

Burada  $q$  elektron yükünü,  $k$  Boltzmann sabitini,  $N_s$  seri bağlı hücre sayısını,  $n$  diyot idealite faktörünü,  $V_{oc,ref}$  referans koşullardaki açık devre gerilimini ve  $E_g$  yarı iletken bant aralığı enerjisini ifade etmektedir. Tek diyotlu PV modeli, seri direnç ( $R_s$ ) ve paralel direnç ( $R_{sh}$ ) etkilerini içeren örtük bir denklem yapısına sahiptir. Belirli bir deneme gerilimi  $V$  için akım değeri, Newton–Raphson iterasyonu kullanılarak çözülmüştür. Bu işlem, maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması kapsamında tekrarlanarak en uygun çalışma noktası belirlenmiştir (Uoya and Koizumi, 2015).

$$f(I) = I - N_p \cdot I_{ph} + N_p \cdot I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T_{cell}} \right) - 1 \right] + \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.24)$$

Yakınsama sağlandıktan sonra, modül gücü dizi seviyesine ölçeklendirilmiş ve gerilim taraması yoluyla maksimum güç noktası belirlenmiştir (Uoya and Koizumi, 2015):

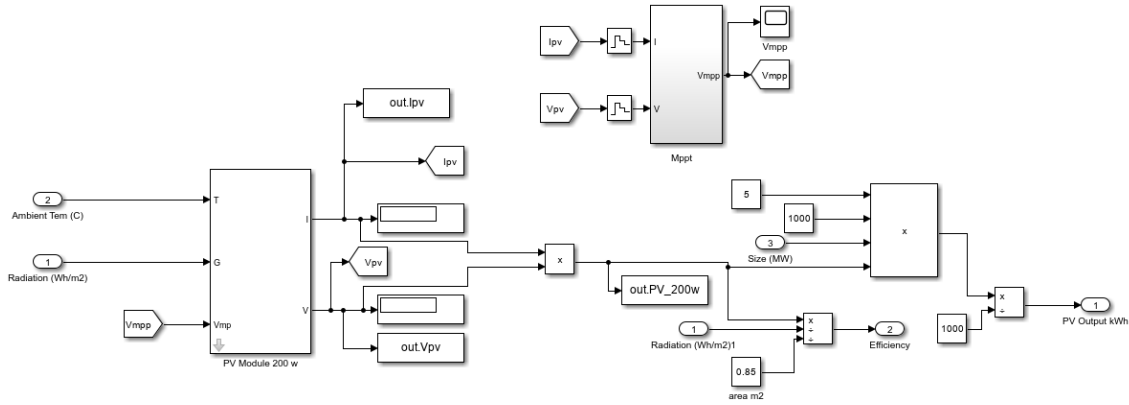
$$P(W) = V \cdot I \cdot N_{panels} \quad (3.25)$$

$$P_{out} = \max(P), V_{opt} = \arg \max(P) \quad (3.26)$$

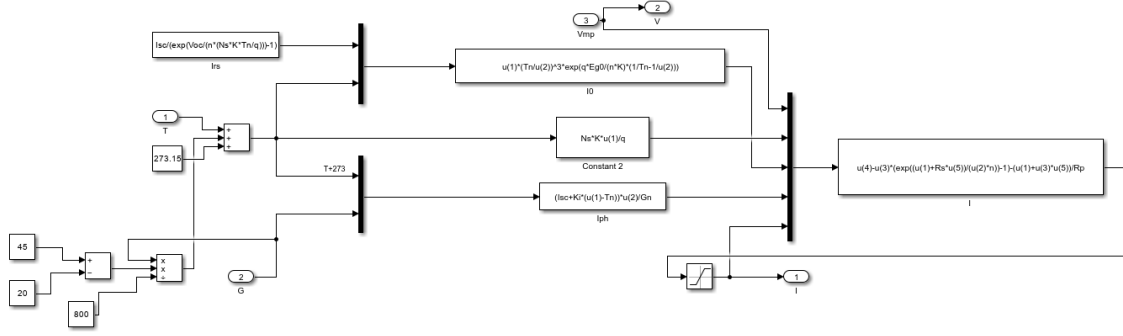
Anlık PV verimi ise aşağıdaki Denklem 3.27 kullanılarak hesaplanmıştır (Alrahim Shannan et al., 2013):

$$\eta = \frac{P_{out,deg}}{G \cdot A_{pv} \cdot N_{panels}} \quad (3.27)$$

Bu denklemler kullanılarak oluşturulan PV alt sistemine ait Simulink modeli Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de sunulmuştur. Geliştirilen model, farklı ışınım ve sıcaklık koşulları altında PV sisteminin elektriksel tepkisini saatlik bazda çözerek enerji üretim potansiyelinin doğru ve tutarlı biçimde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.



**Şekil 3.19:** PV-Simulink Modeli-1.



Şekil 3.20: PV-Simulink Modeli-2.

### 3.2.1.2 Rüzgâr türbini güç üretim modeli

Bu çalışmada rüzgâr türbini alt sisteminin modellenmesi, rüzgâr hızının mekanik ve elektriksel güce dönüştürülmesini esas alan aerodinamik prensiplere dayandırılmıştır. Rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek teorik maksimum verim, Betz yasasına göre %59,26 ile sınırlıdır. Betz limiti olarak bilinen bu sınır, ideal koşullar altında bir rüzgâr türbininin rüzgârın kinetik enerjisinden çekebileceği en yüksek enerji oranını tanımlamaktadır. Gerçek çalışma koşullarında ise aerodinamik kayıplar, mekanik iletim verimi ve jeneratör kayıpları nedeniyle bu değerlerin altında bir performans elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan rüzgâr türbini modeli, söz konusu fiziksel sınırlamalar ve gerçek işletme koşulları dikkate alınarak formüle edilmiştir. Modelde rüzgârın kinetik enerjisinin rotor kanatları tarafından yakalanması, mekanik güce dönüştürülmesi ve jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretimine aktarılması süreci bütüncül olarak ele alınmıştır. Böylece türbinin farklı rüzgâr hızları altındaki davranışı ve enerji üretim potansiyeli gerçekçi bir şekilde temsil edilmiştir. Bir rüzgâr türbininin rotorundan elde edilen mekanik güç, aşağıdaki Denklem 3.28 ile hesaplanmaktadır (Giannakis et al., 2018; Slootweg et al., 2003):

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda_i) \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3.28)$$

Burada  $P_m$  türbinin mekanik gücünü (W),  $C_p(\lambda_i)$  türbin performans katsayısını,  $\rho$  hava yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  rotor kanatlarının süpürdüğü alanı ( $\text{m}^2$ ) ve  $V$  rüzgâr hızını (m/s) ifade etmektedir. Bu denklem, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olan enerji içeriğinin, türbin aerodinamiği ve rotor geometrisi aracılığıyla nasıl güce dönüştürüldüğünü göstermektedir. Özellikle rüzgâr hızı ve performans katsayısı, türbin verimliliğini doğrudan etkileyen temel parametrelerdir. Rüzgâr türbininin performans katsayısı  $C_p$ , türbinin rüzgâr enerjisini ne kadar verimli kullandığını tanımlamakta olup, uç

hız oranına ( $\lambda_i$ ) bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada performans katsayısı, Denklem 3.29 kullanılarak modellenmiştir (Heier, 2014):

$$C_p = C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot \lambda_i)} + C_3 \cdot e^{(C_4 \cdot \lambda_i)} \quad (3.29)$$

Burada  $C_1, C_2, C_3$  ve  $C_4$ , türbinin aerodinamik tasarım özelliklerine bağlı olarak belirlenen ampirik katsayılardır. Bu ifade, rotor kanatlarının geometrisi ve çalışma koşulları altında performans katsayısının hız oranı ile nasıl değiştiğini temsil etmektedir.

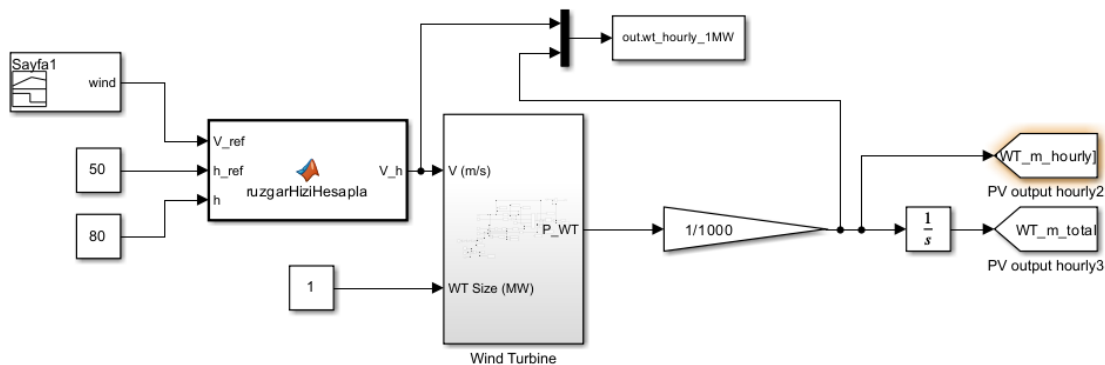
Uç hız oranı  $\lambda_i$ , kanat açısı ( $\beta$ ) ile performans katsayısını belirleyen dikkate değer bir parametredir ve Denklem 3.30 ile tanımlanmıştır (Heier, 2014):

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3} \quad (3.30)$$

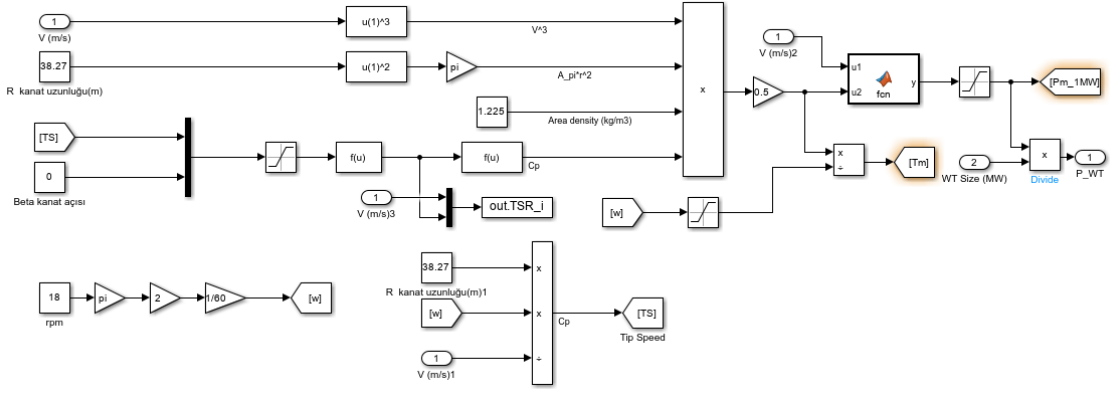
Bu çalışmada kanat açısı  $\beta = 0$  olarak alınmıştır. Temel uç hız oranı  $\lambda$ , rotor uç hızının rüzgâr hızına oranı olup Denklem 3.31 ile tanımlanmaktadır (Heier, 2014):

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V} \quad (3.31)$$

Burada  $\omega_r$  rotorun açısal hızını (rad/s),  $R$  rotor kanadının yarıçapını (m) ve  $V$  rüzgâr hızını (m/s) ifade etmektedir. Rüzgâr hızına bağlı olarak türbinin çalışabileceği aralık, başlama (cut-in), anma (rated) ve kesme (cut-out) rüzgâr hızları ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlar, türbinin güvenli ve verimli çalışma bölgesini tanımlamakta ve güç üretimi bu işletme zarfı içerisinde hesaplanmaktadır. Bu matematiksel denklemler ve rüzgâr verileri kullanılarak oluşturulan rüzgâr türbini alt sistemine ait Simulink modeli Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilmiştir. Geliştirilen model, rüzgâr rejiminin zamana bağlı değişimini dikkate alarak türbinin saatlik elektrik üretimini hesaplamakta ve sistem genelindeki enerji dengesi ile bütünleşik olarak çalışmaktadır.



Şekil 3.21: Rüzgâr Türbininin Simulink Modeli-1.



Şekil 3.22: Rüzgâr Türbininin Simulink Modeli-2.

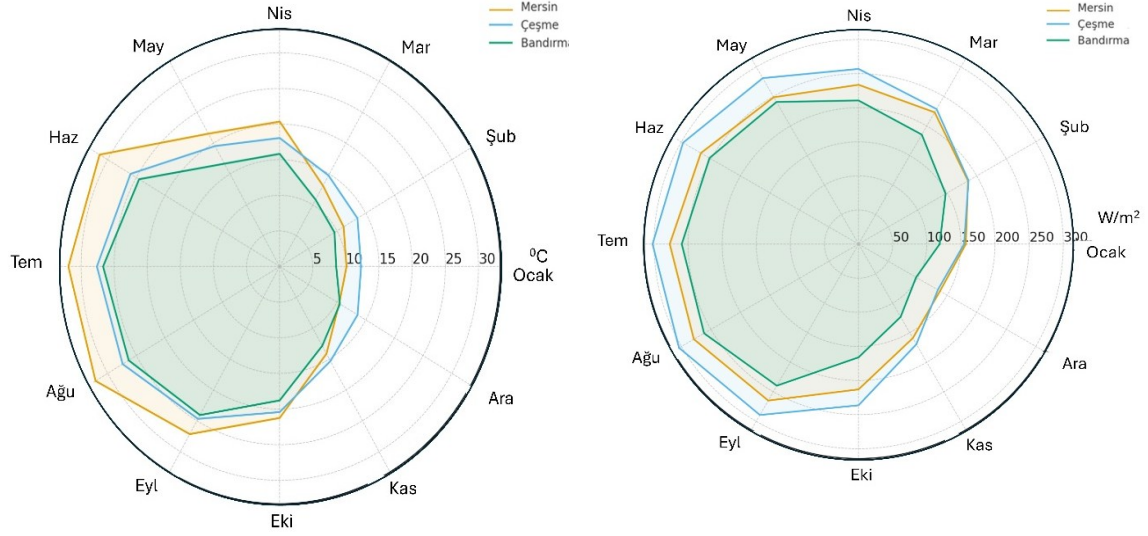
Çalışmada kullanılan rüzgâr türbinine ait temel teknik özellikler Tablo 3.4’te sunulmuştur.

Tablo 3.4: Modellenen Rüzgâr Türbininin Teknik Özellikleri.

Özellik	Değer
Üretici	LEITWIND AG / SPA (İtalya)
Model	LTW77
Başlama Rüzgâr Hızı	3 m/s
Kesme Rüzgâr Hızı	25 m/s
Rotor Alanı	4608 m <sup>2</sup>
Rotor Çapı	76,6 m
Rotor Kanat Sayısı	3
Maksimum Rotor Hızı	18 dev/dak
Hub Yüksekliği	80 m
Nominal Güç	1000 kW
Kanat Açısı $\beta$	0 <sup>0</sup>

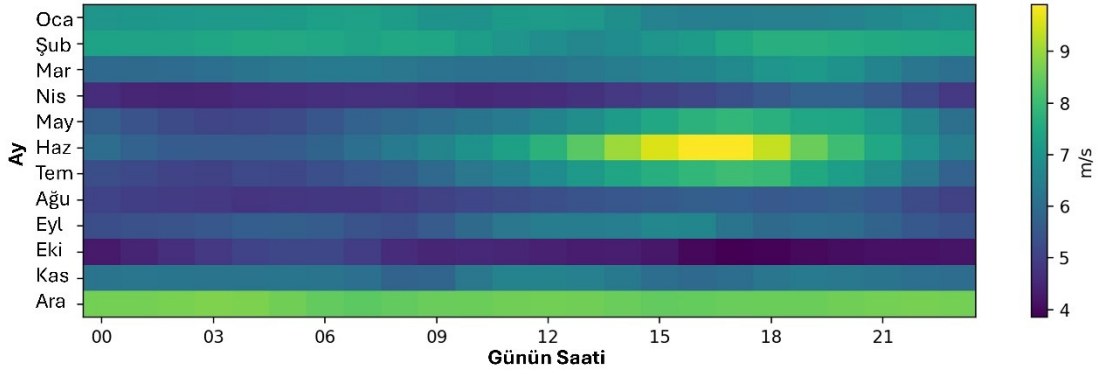
### 3.2.1.3 Meteorolojik girdi parametreleri ve zaman serisi yapısı

Şekil 3.23’te Mersin, Çeşme ve Bandırma lokasyonları için saatlik verilerden elde edilen aylık ortalama güneş ışınımı ve çevresel sıcaklık profilleri sunulmuştur. Polar grafikler, lokasyonlar arasındaki mevsimsel farklılıkları açık biçimde ortaya koymaktadır. Mersin en yüksek güneş ışınımı ve sıcaklık değerlerine sahip olup fotovoltaik üretim açısından en avantajlı lokasyon olarak öne çıkmaktadır. Çeşme orta düzey bir potansiyel sunarken, Bandırma özellikle kış aylarında daha düşük ışınım ve sıcaklık değerleri göstermektedir. Bu iklimsel farklılıklar, PV alt sisteminin yıllık enerji üretimi ve işletme koşulları üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır.

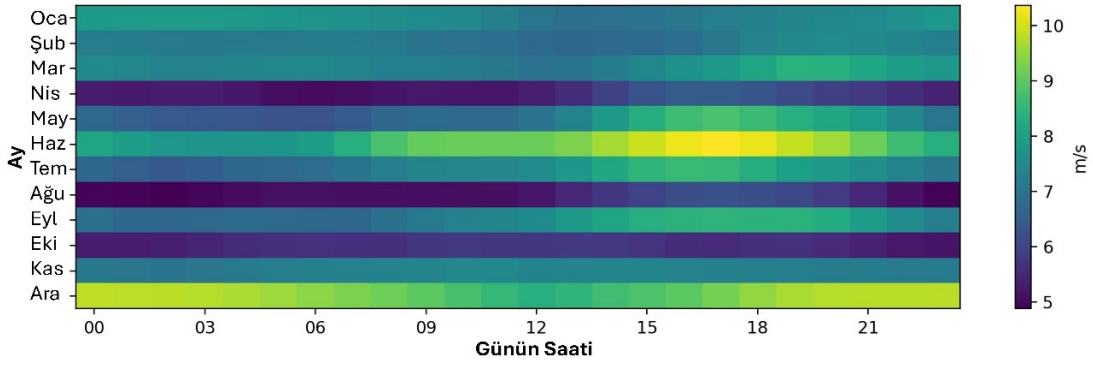


**Şekil 3.23:** Mersin, Çeşme ve Bandırma lokasyonlarında saatlik verilerden elde edilen aylık ortalama güneş ışınımı ve sıcaklık dağılımları.

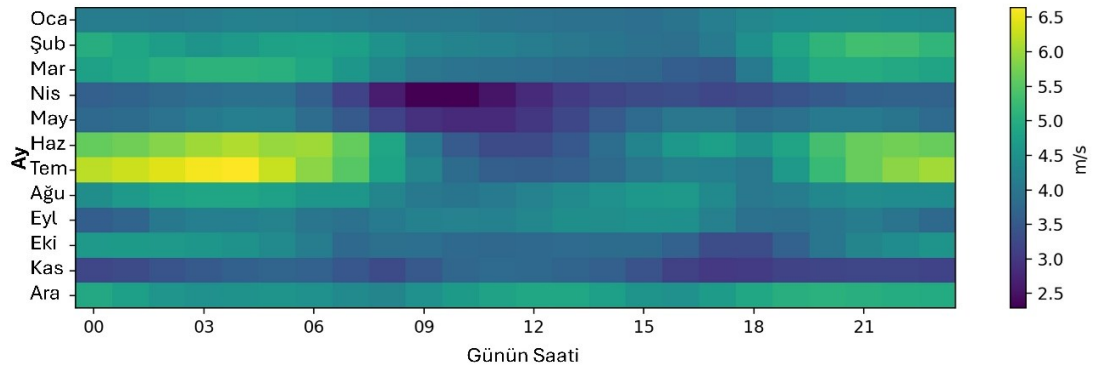
Saatlik rüzgâr hızı verileri, türbin göbek yüksekliğine (hub height) uyarlanarak modele dâhil edilmiştir. Böylece rüzgâr türbininin gerçek işletme koşullarına daha yakın bir rüzgâr profili altında çalışması sağlanmıştır. Bu çalışmada, Mersin, Çeşme ve Bandırma lokasyonlarına ait saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Şekil 3.24'te bu üç lokasyon için rüzgâr hızının ay ve günün saati fonksiyonu olarak değişimini gösteren iki boyutlu dağılımlar sunulmuştur. Sonuçlar, Mersin'de yaz aylarında daha belirgin tepe değerleri ve yüksek değişkenlik olduğunu, Çeşme'de yıl boyunca daha kararlı ve güçlü rüzgâr rejimi bulunduğunu, Bandırma'da ise özellikle öğleden sonra saatlerinde belirgin maksimumlar ile orta düzeyde mevsimsel bağımlılık gözlemlendiğini ortaya koymaktadır.



a)



b)



c)

Şekil 3.24: a) Bandırma, b) Çeşme ve c) Mersin bölgeleri için aylık ve saatlik ortalama rüzgâr hızı dağılımları.

### 3.2.1.4 PEM elektrolizör tabanlı hidrojen üretim modeli

- *Yardımcı sistemler (Balance of Plant – BoP)*

Bu çalışmada, dengeleme sistemlerine ve hidrojen depolama süreçlerine ait enerji tüketimi, süreç verimliliği ve sistem boyutlandırma parametreleri dinamik bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Modelleme kapsamında, çok kademeli hidrojen sıkıştırma termodinamiği,

hidrojen sıvılaştırma süreçlerine ait özgül enerji tüketim eğrileri ve yardımcı ekipmanların (pompa, ısıtıcı vb.) elektriksel yükleri eş zamanlı olarak dikkate alınmıştır.

Sermaye yatırım maliyetleri (CAPEX) ile elektrik dışı sabit işletme giderleri (OPEX), MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen ekonomik alt model aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu modelde; kompresör, basınçlı gaz tankı, sıvılaştırıcı ve pompalar gibi bileşenlerin maliyetleri, DOE tarafından geliştirilen HDSAM v3.1 (Mintz et al., 2006) çalışmasıyla uyumlu olacak şekilde, ampirik güç yasası ölçekleme bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.

- Isı eşanjörü ve yardımcı sistemler;

Besleme suyunun hedef sıcaklığa ulaştırılması için gerekli toplam ısı yükü Denklem 3.32 ile hesaplanmıştır (Çengel and Boles, 2019):

$$Q_{total} = \dot{m}_{feed} \cdot C_p \cdot (T_{target} - T_{feed,in}) \quad (3.32)$$

Burada  $Q_{total}$  toplam ısı yükünü (W),  $\dot{m}_{feed}$  besleme suyunun kütleli debisini (kg/s),  $C_p$  özgül ısı kapasitesini (J/kg·K),  $T_{target}$  hedef sıcaklığı (K) ve  $T_{feed,in}$  giriş sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Yardımcı sistemler kapsamında besleme ve soğutma devrelerine ait pompalar ile elektrikli ısıtıcı yer almaktadır. Pompa güç ihtiyacı Denklem 3.33 ile modellenmiştir (White, 2016):

$$P_{pump} = \frac{\Delta p_{feed} \cdot Q_{vol,feed}}{\eta_{pump}} + \frac{\Delta p_{cool} \cdot Q_{vol,cool}}{\eta_{pump}} \quad (3.33)$$

Burada  $P_{pump}$  toplam pompa gücünü (W),  $\Delta p_{feed}$  besleme hattındaki basınç farkını (Pa),  $Q_{vol,feed}$  besleme hattındaki hacimsel debiyi (m<sup>3</sup>/s),  $\Delta p_{cool}$  soğutma hattındaki basınç farkını (Pa),  $Q_{vol,cool}$  soğutma hattındaki hacimsel debiyi (m<sup>3</sup>/s) ve  $\eta_{pump}$  pompa verimini (–) ifade etmektedir.

- *PEM elektrolizörün elektrokimyasal modellenmesi*

Bu çalışmada, proton değişim membranlı (PEM) bir su elektrolizörü, hücre seviyesinde elektrokimyasal gerilim kayıpları, Faraday temelli kütle dengeleri ve yığılmış ısı enerjisi dengesi birlikte ele alınarak MATLAB/Simulink ortamında dinamik olarak modellenmiştir. Model saatlik zaman adımıyla çalışacak şekilde kurgulanmış ve uzun ddikkate değer (çok yıllık) performans, enerji tüketimi ve hidrojen üretimi analizlerine olanak sağlayacak biçimde

yapılandırılmıştır. Modelleme yaklaşımı, PEM elektrolizörlerin sistem düzeyinde analizinde yaygın olarak kullanılan fizik-temelli ve yarı ampirik yöntemlerle uyumludur (Barbir, 2005b; Carmo et al., 2013b).

Modelde elektrolizör yığını (stack), hücrelerin seri bağlanmasıyla oluşan tek bir sistem olarak temsil edilmiştir. Akım yoğunluğu, hücre gerilimi, hidrojen üretim hızı, elektriksel güç tüketimi ve hücre sıcaklığı aynı anda ve tutarlı şekilde çözülmektedir. Böylece elektriksel, elektrokimyasal ve ısı alt sistemler arasında doğrudan bir bağ kurulmuştur.

- *Hücre gerilimi modeli;*

Bir PEM elektrolizör hücresinin çalışma gerilimi (Denklem 3.34), tersinir (ideal) hücre gerilimi ile çeşitli fiziksel mekanizmalardan kaynaklanan aşırı gerilimlerin toplamı olarak ifade edilmiştir (Barbir, 2005a; Carmo et al., 2013c):

$$V_{cell} = V_{ideal}(T, p) + \Delta V_{act} + \Delta V_{ohm} + \Delta V_{conc} + \Delta V_{par} \quad (3.34)$$

Burada  $V_{ideal}$  tersinir hücre gerilimini,  $\Delta V_{act}$  aktivasyon aşırı gerilimini,  $\Delta V_{ohm}$  ohmik kayıpları,  $\Delta V_{conc}$  konsantrasyon kayıplarını ve  $\Delta V_{par}$  parazitik elektriksel kayıpları temsil etmektedir.

- *Tersinir (İdeal) hücre gerilimi;*

Tersinir hücre gerilimi Denklem 3.35' te, suyun elektrolizi için gerekli Gibbs serbest enerji değişimine bağlı olarak tanımlanmıştır (Bard and Faulkner, 2001; Newman and Thomas-Alyea, 2012):

$$V_{ideal} = \frac{\Delta G(T, p)}{n \cdot F} \quad (3.35)$$

Burada  $n = 2$  elektron sayısını,  $F$  Faraday sabitini göstermektedir.

- *Aktivasyon aşırı gerilimi;*

Aktivasyon aşırı gerilimi, elektrot yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların kinetik sınırlamalarını temsil etmektedir. Bu kayıp, Butler–Volmer denkleminde dayalı olarak, simetrik yük aktarım katsayısı ( $\alpha = 0,5$ ) varsayımı altında hesaplanmıştır (Carmo et al., 2013c; Larminie and Dicks, 2003). Öncelikle değişim akım yoğunluğu Denklem 3.36' da sıcaklığa bağlı Arrhenius tipi bir ifade ile verilmiştir (Barbir, 2005a; Carmo et al., 2013c):

$$i_0 = k_{i0} \cdot \exp\left(-\frac{E_{act}}{RT_{cell}}\right) \quad (3.36)$$

Burada  $k_{i0}$  ön-üstel katsayısı,  $E_{act}$  aktivasyon enerjisini,  $R$  evrensel gaz sabitini ve  $T_{cell}$  hücre sıcaklığını temsil etmektedir. Aktivasyon aşırı gerilimi Denklem 3.37 ile hesaplanmıştır (Barbir, 2005a):

$$\Delta V_{act} = \frac{R \cdot T_{cell}}{F} \cdot a \cdot \sinh\left(\frac{i}{2i_0}\right) \quad (3.37)$$

Bu ifade, düşük ve orta akım yoğunluklarında PEM elektrolizörlerin kinetik davranışını güvenilir şekilde temsil etmektedir.

- *Omik kayıplar;*

Ohmik kayıplar; anot ve katot elektrotları ile proton değişim membranından kaynaklanan elektriksel ve iyonik dirençlerin toplamı olarak Denklem 3.38 ile modellenmiştir (Barbir, 2005a; Carmo et al., 2013c):

$$\Delta V_{ohm} = I \cdot (R_{el,an} + R_{el,cat} + R_{mem}) \quad (3.38)$$

Elektrot dirençleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Carmo et al., 2013c):

$$R_{el} = \frac{t_{el}}{A_{cell}} \cdot \rho_{el} \quad (3.39)$$

Burada  $t_{el}$  elektrot kalınlığını,  $A_{cell}$  aktif hücre alanını ve  $\rho_{el}$  elektrot malzemesinin özgül direncini ifade etmektedir. Membran direnci ise Denklem 3.40 ile hesaplanmaktadır (Carmo et al., 2013c):

$$R_{mem} = \frac{t_{mem}}{\sigma_{mem} \cdot A_{cell}} \quad (49) \quad (3.40)$$

Membran iyonik iletkenliği, sıcaklık ve hidrasyon seviyesine bağlı olarak Denklem 3.41 ile verilen ampirik ifade kullanılarak hesaplanmıştır (Barbir, 2005a):

$$\sigma_{mem} = (0.005139 \cdot \lambda - 0.00326) \cdot \exp\left[1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right] \quad (3.41)$$

- *Parazitik kayıplar;*

Parazitik elektriksel kayıplar, akım toplayıcılar, bağlantılar ve ölçülmesi zor olan ek dirençlerin yığılmış temsili olarak modellenmiştir. Bu kayıp, sabit bir parazitik direnç katsayısı ( $R_{par}$ ) kullanılarak hesaplanmıştır (Barbir, 2005a):

$$\Delta V_{par} = I \cdot R_{par} \quad (3.42)$$

- *Faraday tabanlı kütle dengeleri;*

Hidrojen üretimi ve su tüketimi, Faraday yasasına dayalı olarak hesaplanmıştır. Toplam akım Denklem 3.43' de tanımlanmıştır (Bard and Faulkner, 2001; Carmo et al., 2013c):

$$I_{total} = i \cdot A_{eff} \cdot N_{cells} \quad (3.43)$$

Burada  $i$  akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ),  $A_{eff}$  etkin elektrot alanını ( $m^2$ ) ve  $N_{cells}$  ise elektrolizör yığını içerisindeki hücre sayısını temsil etmektedir. Faradaik verim  $\eta_F$  dikkate alınarak molar debiler Denklem 3.44, 3.45 ve 3.46 yardımıyla hesaplanmıştır (Bard and Faulkner, 2001; Carmo et al., 2013c):

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\eta_F \cdot I_{total}}{2 \cdot F} \quad (3.44)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{\eta_F \cdot I_{total}}{4 \cdot F} \quad (3.45)$$

$$\dot{n}_{H_2O} = \frac{\eta_F \cdot I_{total}}{2 \cdot F} \quad (3.46)$$

Elektroliz sürecinde oluşan türlerin kütleli debileri, molar debi ile molar kütlelerin çarpımı olarak hesaplanmaktadır (Bard and Faulkner, 2001):

$$\dot{m}_k = \dot{n}_k \cdot M_k \quad (3.47)$$

Burada  $\dot{n}_k$  ilgili türün molar debisini ( $mol/s$ ),  $M_k$  ise molar kütlelerini ( $kg/mol$ ) ifade etmektedir. Saatlik üretim değerleri (Bard and Faulkner, 2001):

$$\dot{m}_{k,kg/h} = 3600 \cdot \dot{m}_k \quad (3.48)$$

Anot besleme suyu debisi, stokiyometrik fazlalık katsayısı  $\lambda_a$  ile artırılmıştır (Bard and Faulkner, 2001):

$$\dot{m}_{H_2O,feed} = (1 + \lambda_a) \cdot \dot{m}_{H_2O} \quad (3.49)$$

Burada  $\lambda_a$ , anot tarafı için tanımlanan stokiometrik fazlalık katsayısını ifade etmektedir.

- *Isıl dinamik model;*

PEM elektrolizör yığınının sıcaklık değişimi, tek düğümlü enerji dengesi yaklaşımı ile 3.50 numaralı denklem kullanılarak modellenmiştir (Carmo et al., 2013c):

$$C_{th} \frac{dT_{cell}}{dt} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{out} \quad (3.50)$$

Burada  $C_{th}$  sistemin toplam ısı kapasitesini (J/K),  $T_{cell}$  hücre sıcaklığını (K),  $\dot{Q}_{in}$  sisteme giren ısı akısını,  $\dot{Q}_{gen}$  elektrokimyasal reaksiyonlar ve ohmik kayıplar sonucu oluşan ısı üretimini ve  $\dot{Q}_{out}$  ise sistemden uzaklaştırılan ısıyı temsil etmektedir. Hücre içinde üretilen ısı, elektriksel enerji ile reaksiyon entalpisi arasındaki farktan hesaplanmıştır (Barbir, 2005b):

$$\dot{Q}_{gen} = \left( V_{cell} - \frac{\Delta H}{2F} \right) \cdot I \cdot A_{cell} \quad (3.51)$$

Soğutucu akışkan tarafından uzaklaştırılan ısı Denklem 3.52 ile hesaplanmaktadır (Carmo et al., 2013c):

$$\dot{Q}_{coolant} = \dot{m}_{coolant} \cdot c_p \cdot (T_{cell} - T_{coolant,in}) \quad (3.52)$$

Burada  $\dot{m}_{coolant}$  soğutucu akışkanın kütleli debisini (kg/s),  $c_p$  özgül ısı kapasitesini (J/kg·K),  $T_{cell}$  elektrolizör hücre sıcaklığını (K) ve  $T_{coolant,in}$  ise soğutucu akışkanın giriş sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Toplam elektriksel güç tüketimi (Carmo et al., 2013c):

$$P_{el} = V_{cell} \cdot I \cdot N_{cells} + P_{aux} \quad (3.53)$$

Burada  $V_{cell}$  hücre gerilimini (V),  $I$  toplam akımı (A),  $N_{cells}$  elektrolizör yığını içerisindeki hücre sayısını ve  $P_{aux}$  ise yardımcı ekipmanların (pompa, kompresör, soğutma sistemi vb.) elektriksel güç tüketimini (W) temsil etmektedir.

- *Su kaynağı ve arıtma alt sistemi*

Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemlerinde su, elektroliz reaksiyonunun temel girdisi olması nedeniyle teknik açıdan etkili bir rol oynamaktadır. Kullanılan suyun kaynağı; sistemin günlük su ihtiyacını, arıtma gereksinimlerini, enerji tüketimini ve

dolayısıyla elektrolizörün yardımcı yüklerini (BoP) doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle su kaynakları öncelikle teknik açıdan değerlendirilmiş; gerekli su miktarları ve enerji gereksinimleri sistem tasarımına girdi olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda beş farklı su kaynağı dikkate alınmıştır: şehir şebekesinden temin edilen şebeke suyu (TW), sanayi tesislerinden elde edilen endüstriyel atık su (IW), yer altı kaynaklarından çekilen yer altı suyu (GW), yüzeylerden toplanan yağmur suyu (RW) ve denizden alınarak arıtılan deniz suyu (SW). Her bir kaynak için su kayıpları, arıtma gereksinimleri ve enerji tüketimleri ayrı ayrı modellenmiştir (Santana et al., 2024).

- *Net su ihtiyacının hesaplanması;*

Elektroliz sürecinde hidrojen üretimi için gerekli su miktarı, stokiyometrik hesaplamalar temel alınarak belirlenmiştir. Literatürde yaygın kabul gören yaklaşıma uygun olarak, 1 kg hidrojen üretimi için yaklaşık 0,009 m<sup>3</sup> su gereksinimi olduğu kabul edilmiştir. Günlük hidrojen üretimine bağlı olarak net günlük su ihtiyacı aşağıdaki Denklem 3.54 kullanılarak hesaplanmıştır (Santana et al., 2024):

$$w_{net} = H_{2,daily} \cdot 0,009 \quad (3.54)$$

Bu ifadede  $w_{net}$ , net günlük su ihtiyacını (m<sup>3</sup>/gün),  $H_{2,daily}$  ise günlük hidrojen üretim miktarını (kg/gün) temsil etmektedir.

- *Brüt su ihtiyacının hesaplanması;*

Gerçek sistemlerde suyun temini ve arıtımı sırasında buharlaşma, sızıntı ve arıtma verimsizliklerinden kaynaklanan kayıplar oluşmaktadır. Her bir su kaynağı için tanımlanan kayıp oranı  $L_i$  dikkate alınarak brüt su ihtiyacı Denklem 3.55 ile hesaplanmıştır (Santana et al., 2024):

$$w_{gross,i} = \frac{w_{net}}{1 - L_i} \quad (3.55)$$

Bu denklemde  $w_{gross,i}$ ,  $i$  numaralı su kaynağı için sisteme sağlanması gereken gerçek su miktarını (m<sup>3</sup>/gün) ifade etmektedir. Bu değerler, arıtma ve temin sistemlerinin kapasite boyutlandırmasında kullanılmıştır.

- *Su temin ve arıtımına ait enerji tüketimi;*

Su arıtımı ve temini sırasında tüketilen enerji, hidrojen üretim sisteminin toplam enerji dengesine ek bir yük getirdiğinden, teknik analiz kapsamında ayrıca değerlendirilmiştir. Her bir su kaynağı için birim hacim başına enerji tüketim katsayısı  $e_i$  kullanılarak saatlik enerji tüketimi Denklem 3.56'teki gibi hesaplanmıştır (Santana et al., 2024):

$$E_{su,i} = w_{gross,i} \cdot e_i \quad (3.56)$$

Bu ifadede  $E_{su,i}$ , ilgili su kaynağına ait saatlik enerji tüketimini (kWh/saat) temsil etmekte olup, bu değerler elektrolizör sisteminin yardımcı yükleri kapsamında toplam elektrik talebine eklenmiştir.

- *Model varsayımları ve sınır koşulları*

Bu çalışmada geliştirilen PEM elektrolizör ve su temini modeli, sistem düzeyinde uzun ddikkate değer performans ve enerji analizi yapılabilmesini sağlamak amacıyla aşağıdaki varsayımlar altında oluşturulmuştur:

- PEM elektrolizör, hücrelerin seri bağlanmasıyla oluşturulmuş homojen bir yığın (stack) olarak temsil edilmiş; tüm hücrelerin aynı çalışma koşullarına ve özelliklere sahip olduğu kabul edilmiştir.
- Model, saatlik zaman adımıyla çalışmakta olup, elektrokimyasal ve ısıl süreçler saatlik ortalama değerler üzerinden temsil edilmiştir.
- Hücre gerilimi; tersinir (ideal) gerilim ile aktivasyon, ohmik, konsantrasyon ve parazitik kayıpların toplamı olarak modellenmiştir.
- Elektrokimyasal reaksiyon kinetiği, Butler–Volmer denklemi esas alınarak temsil edilmiş; elektrot yüzeylerinde gerçekleşen reaksiyonların simetrik yük aktarımına sahip olduğu varsayılmıştır.
- Ohmik kayıplar, anot, katot ve proton değişim membranından kaynaklanan dirençlerin eşdeğer seri bağlantısı olarak modellenmiştir.
- Hidrojen ve oksijen üretim hızları, Faraday yasasına dayalı olarak hesaplanmış; Faradaik verimin sabit olduğu kabul edilmiştir.
- Yan reaksiyonlar, gaz geçişleri (crossover) ve ürün saflığına bağlı etkilerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılmıştır.
- Elektrolizör yığınının ısıl davranışı, tek düğümlü (lumped-capacitance) enerji dengesi yaklaşımı ile modellenmiş ve yığın içi sıcaklık gradyanları ihmal edilmiştir.

- ix. Hücre içinde oluşan ısı, elektriksel enerji ile reaksiyon entalpisi arasındaki farktan hesaplanmış; soğutma sistemi tarafından uzaklaştırılan ısı basitleştirilmiş bir enerji dengesi ile temsil edilmiştir.
- x. Elektrolizörün uzun ddikkate değer performans düşüşü, hücre geriliminde zamana bağlı doğrusal bir artış olarak modellenmiştir.
- xi. Elektrolizör yığınının ömrü 80 000 saat olarak kabul edilmiş; bu sürenin sonunda stack yenilemesi yapılarak hücre geriliminin başlangıç değerine döndüğü varsayılmıştır.
- xii. Hidrojen üretimi için gerekli net su ihtiyacı, 1 kg H<sub>2</sub> üretimi başına 0,009 m<sup>3</sup> su tüketimi kabul edilerek hesaplanmıştır.
- xiii. Su temini ve arıtımı sırasında oluşan kayıplar, her bir su kaynağı için tanımlanan sabit kayıp oranları ile temsil edilmiştir.
- xiv. Su temini ve arıtımına ait enerji tüketimleri, kaynak bazlı sabit birim enerji katsayıları kullanılarak hesaplanmış ve elektrolizör sisteminin yardımcı yükleri (BoP) kapsamında toplam elektrik talebine eklenmiştir.

### 3.2.1.5 Sistem performans kaybı (degradasyon) modellemesi

Enerji üretim ve dönüşüm sistemlerinin uzun ddikkate değer performansında, ekipmanların zamanla yaşlanması ve performans kaybı kaçınılmazdır. Bu nedenle, LCOH hesaplamaları yapılırken her yıl için enerji üretim kapasitesinde ve hidrojen üretim miktarında belirli bir oranda azalma dikkate alınmalıdır. Bu azalma, yıllık sabit bir performans kaybı oranı olarak modellenmiştir.

- *Genel performans kaybı oranı modeli*

Her bir sistem bileşeni için başlangıç saatlik üretim değeri  $X_0$  kabul edilmek üzere,  $h$  saatlik periyotta ilgili üretim miktarı veya kapasitesi, Denklem 3.57 hesaplanmıştır (Jordan and Kurtz, 2013):

$$X_h = X_0 \cdot (1 - d_{hourly})^h \quad (3.57)$$

Bu modelde,  $X_h$  saatlik üretim kapasitesini (örneğin kWh veya kg H<sub>2</sub> cinsinden),  $d_{hourly}$  saatlik sabit performans kaybı oranını ve  $h$  ise geçen toplam saat sayısını ifade etmektedir. Önerilen yaklaşım, sistem bileşenlerinde zamanla meydana gelen fiziksel ve kimyasal yaşlanma etkilerini doğrusal olmayan ancak gerçekçi bir azalma eğrisi ile temsil etmektedir. Bu sayede model, saatlik bazda gerçekleştirilen simülasyonlara doğrudan

entegre edilerek sistem performansındaki uzun ddikkate değer değişimleri güvenilir bir şekilde yansıtabilmektedir.

- *PV performans kaybı modeli*

Fotovoltaik (PV) panellerde yıllık bozunma oranı literatürde genellikle %0,3–%0,8 aralığında rapor edilmekte olup bu çalışmada %0,5/yıl olarak kabul edilmiştir. Bu yıllık bozunma oranı, saatlik zaman adımlarına uyarlanarak Denklem 3.57’de verilen ifade ile tanımlanmıştır. Buna göre, PV panelin saatlik bozunma oranı  $d_{PV,hourly}$ , yıllık bozunma oranının 8760 saatlik periyoda indirgenmesiyle elde edilmektedir. Bu yaklaşım, sistemin zaman çözünürlüğü ile uyumlu bir bozunma modeli kurulmasına olanak sağlamaktadır (Jordan and Kurtz, 2013).

$$d_{PV,hourly} = 1 - (1 - d_{PV,yearly})^{\frac{1}{8760}} \quad (3.58)$$

PV panelin saatlik enerji üretimi ise Denklem 3.68’de verilen ifade ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $E_{PV,0}$  başlangıçtaki nominal üretimi,  $E_{PV,h}$  ise  $h$  saat sonraki üretim değerini temsil etmektedir. Önerilen formülasyon, her bir zaman adımında üretimde meydana gelen azalmayı kümülatif olarak dikkate almakta ve böylece PV sistem performansındaki uzun ddikkate değer düşüşü daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır (Jordan and Kurtz, 2013).

$$E_{PV,h} = E_{PV,0} \cdot (1 - d_{PV,hourly})^h \quad (3.59)$$

- *Rüzgâr türbini performans kaybı modeli*

Rüzgâr türbinlerinde performans düşüşü yaşlanmaya bağlı olarak yıllık %0,5 ile %1,6 arasında değişmekte olup bu çalışmada yaklaşık %1/yıl seviyesi temsil edici bir değer olarak kullanılmıştır (Staffell and Green, 2014). Bu oran da saatlik modele Denklem 3.60’teki gibi aktarılır:

$$d_{WT, hourly} = 1 - (1 - d_{WT,yearly})^{\frac{1}{8760}} \quad (3.60)$$

Rüzgâr türbininin saatlik enerji üretimi (kWh) (Jordan and Kurtz, 2013):

$$E_{WT,h} = E_{WT,0} \cdot (1 - d_{WT,hourly})^h \quad (3.61)$$

Bu model, rüzgâr kaynağı sabitken bile türbinin yaşlanmaya bağlı üretim azalmasını temsil eder.

- *Elektrolizör performans kaybı modeli*

Elektrolizör performansındaki uzun ddikkate değer düşüş, hücre geriliminde doğrusal bir artış olarak modellenmiştir (Barbir, 2005a; Carmo et al., 2013c). Yıllık degradasyon oranı  $r_{deg}$  kullanılarak saatlik artış Denklem 3.62 ile hesaplanmıştır:

$$r_{hour} = \frac{r_{deg}}{8760} \quad (3.62)$$

Stack ömrü 80 000 saat olarak alınmış ve döngü içi zaman (Jordan and Kurtz, 2013):

$$t_{cycle} = mod(t, 80000) \quad (3.63)$$

Degradasyon uygulanmış hücre gerilimi Denklem 3.64 ile hesaplanmıştır (Jordan and Kurtz, 2013):

$$V_{cell,deg} = V_{cell} \cdot (1 + r_{hour} t_{cycle}) \quad (3.64)$$

Her 80 000 saatte bir stack yenilenmesi kabul edilerek hücre gerilimi başlangıç değerine sıfırlanmıştır. Elektrolizörde meydana gelen performans kayıp etkisi, hidrojen üretim kapasitesinde bir azalma değil; sistemin hücre geriliminde zamanla ortaya çıkan artış olarak modellenmiştir. Bu artış, her bir çalışma saatliği periyodu için sabit bir oranda tanımlanmış ve üretim birimi başına gereken enerji miktarının (spesifik enerji tüketimi) artmasına neden olmuştur. Bu doğrultuda, sistemin her saat başı gerçekleştirdiği hidrojen üretimi sabit tutulurken, elektrik tüketimi zamanla artarak hem enerji dengesini hem de toplam işletme giderlerini etkilemiştir. Bu model, elektrokimyasal yaşlanmanın ekonomik etkilerini daha gerçekçi şekilde yansıtmakta ve LCOH hesaplamalarının doğruluğunu artırmaktadır.

### 3.2.1.6 Hidrojen depolama seçenekleri

Bu çalışmada hidrojen depolama alt sistemi kapsamında üç farklı genel depolama yöntemi (sıkıştırılmış gaz, sıvı hidrojen ve sıvı organik hidrojen taşıyıcıları) modellenmiştir. Depolama alt sistemi, Simulink ortamında saatlik zaman adımıyla ( $\Delta t = 1$  h) çalışan ve depolamaya yönlendirilen hidrojen debisine bağlı olarak elektrik tüketimini ve yatırım analizinde kullanılacak ekipman boyutlandırma değişkenlerini üreten bir “tek-adım” hesap bloğu olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, depolama sisteminin dinamik doluluk davranışı detaylı olarak izlenmemekte; bunun yerine ilgili zaman adımında depolamaya giren  $m_{H_2}$ (kg/h) debisine karşılık gelen anlık enerji ihtiyacı ve kapasite gereksinimi hesaplanmaktadır. Bu sadeleştirilmiş modelleme yaklaşımı, farklı depolama teknolojilerinin

sistem üzerindeki elektrik yükü ve yatırım büyüklüğü üzerindeki etkilerinin hızlı ve karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır ve enerji sistemleri literatüründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Mekonnin et al., 2025).

- *Basınçlı gaz depolama*

Elektrolizör çıkışında üretilen hidrojenin saatlik kütleli debisine bağlı olarak, basınçlı gaz tanklarında depolama ve buna karşılık gelen kompresyon süreci modellenmiştir. Bu kapsamda hidrojenin üretim noktasından depolama tankına kadar maruz kaldığı basınç, sıcaklık ve debi değişimleri saatlik zaman adımlarında izlenmiş; söz konusu değişkenlerin enerji tüketimi ve ekonomik göstergeler üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmiştir. Böylece hidrojen üretimindeki zamansal dalgalanmaların, gaz fazında depolama altyapısına doğrudan nasıl yansıdığı sistematik biçimde ortaya konulmuştur.

Modelde gaz fazında depolama, elektrolizör çıkış basıncından hedef depolama basıncına (350 veya 700 bar) yapılan izentropik sıkıştırma süreci üzerinden temsil edilmiştir. Bu yaklaşım, hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanmasına ilişkin mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve literatürde kabul görmüş bir yöntemdir (Nash et al., 2012). Kompresör boyutlandırması, elektrolizör çıkışındaki anlık hidrojen debisine (kg/h) doğrudan bağlı olacak şekilde dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon süresi boyunca her bir saatlik zaman adımında kompresörün enerji gereksinimi hesaplanmakta; elde edilen bu saatlik değerler arasından maksimum güç ihtiyacı seçilerek sistem tasarımında esas alınacak kompresör kapasitesi belirlenmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, hem değişken üretim koşulları altında güvenli işletme sağlanmakta hem de ekonomik analizde kullanılan yatırım ve işletme maliyetleri gerçekçi bir tasarım gücüne dayandırılmaktadır. Anlık kompresör enerji tüketimi, elektrolizör çıkış basıncı ile hedef depolama basıncı arasındaki fark ve hidrojenin anlık sıcaklığı dikkate alınarak, termodinamik izentropik sıkıştırma bağıntısı üzerinden hesaplanmaktadır. Böylece, üretim koşullarındaki ve çevresel şartlardaki değişimlerin kompresörün enerji gereksinimine zamana bağlı olarak nasıl yansıdığı açık biçimde modellenmiş olmaktadır. Enerji tüketimi, Denklem 3.65'te verilen izentropik sıkıştırma eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (Nash et al., 2012):

$$E_{comp}(t) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot R_{sp} \cdot T(t) \cdot \left[ \left( \frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right] \cdot \frac{m(t)}{\eta} \quad (3.65)$$

Burada  $\gamma$  hidrojen için izentropik katsayıyı ( $\approx 1,41$ ),  $R_{sp}$  özgül gaz sabitini ( $J/kg \cdot K$ ),  $T(t)$  anlık gaz sıcaklığını (K),  $P_{in}(t)$  elektrolizör çıkış basıncını (Pa),  $P_{out}(t)$  hedef depolama basıncını (Pa),  $m(t)$  kütleli debiyi (kg/s) ve  $\eta$  kompresör izentropik verimini ifade etmektedir. Bu ifade ile, kompresörün yalnızca ortalama değil, zamana bağlı değişen enerji tüketimi de hesaba katılmıştır.

- *Sıvı hidrojen (LH<sub>2</sub>) üretimi ve depolama*

Elektrolizör çıkışında elde edilen hidrojenin kriyojenik koşullarda sıvılaştırılması ve depolanması, enerji açısından en yoğun hidrojen depolama yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada sıvı hidrojen (LH<sub>2</sub>) üretim ve depolama süreci, literatürde yaygın olarak kabul edilen beş temel alt bileşen üzerinden modellenmiştir: ön-soğutma, sıkıştırma, saflaştırma, sıvılaştırma ve kriyojenik depolama (Abdelghafar et al., 2025).

Her bir alt süreç için enerji gereksinimi, hidrojenin saatlik giriş debisine bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanmış; bu bileşenlerin toplamı üzerinden sistemin saatlik toplam enerji ihtiyacı belirlenmiştir. Aynı zamanda, sıkıştırma aşamasında elde edilen maksimum güç gereksinimi esas alınarak kompresör boyutlandırması yapılmıştır. Sıvılaştırma çevriminin verimini artırmak amacıyla hidrojen, ana sıvılaştırma aşamasından önce yaklaşık  $-80$  °C seviyesine kadar ön-soğutulmaktadır. Bu aşamada gerekli enerji, hidrojenin özgül ısısı kullanılarak hesaplanan entalpi değişimine dayandırılmıştır. Ön-soğutma için gerekli enerji Denklem 3.66 kullanılarak ifade edilmiştir (Abdelghafar et al., 2025):

$$E_{precool} = \frac{m_{H_2,in} \cdot c_{p,H_2} \cdot (T_{in} - T_{precool,out})}{3600} \quad (3.66)$$

Burada  $\dot{m}_{H_2,in}$  hidrojenin giriş kütleli debisini (kg/s),  $c_{p,H_2}$  hidrojenin özgül ısı kapasitesini ( $14.3 J/kg \cdot K$ ),  $T_{in}$  giriş sıcaklığını (K) ve  $T_{precool,out}$  ön-soğutma çıkış sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Ön-soğutma aşamasının ardından, hidrojenin sıvılaştırma ünitesine uygun basınç seviyesine getirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, sıvılaştırma ünitesine gönderilecek hidrojenin basıncı, giriş basıncı  $P_1$  seviyesinden hedef basınç olan  $P_2 = 40$  bar değerine yükseltilmektedir. Bu işlem için gerekli özgül sıkıştırma işi, izentropik sıkıştırma yaklaşımıyla Denklem 3.67 kullanılarak hesaplanmıştır (Nash et al., 2012):

$$W_{comp} = \frac{R \cdot T}{k - 1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3.67)$$

Burada  $R$  evrensel gaz sabitini (8.314 J/mol·K),  $k$  hidrojen için izentropik katsayısı ( $\approx 1.4$ ) ve  $T$  giriş sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Bu özgül sıkıştırma işine bağlı olarak, sistemin toplam sıkıştırma enerji ihtiyacı, mol cinsinden hidrojen miktarı ve kompresör verimi dikkate alınarak Denklem 3.68 ile hesaplanmıştır (Nash et al., 2012):

$$E_{comp} = \frac{W_{comp} \cdot \left( \frac{m_{H_2, in}}{M_{H_2}} \right)}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{comp}} \quad (3.68)$$

Burada hidrojenin mol kütlesi  $M_{H_2} = 2.016$  g/mol ve kompresör verimi  $\eta_{comp} = 0.75$  olarak alınmıştır. Simülasyon süresince hesaplanan tüm  $E_{comp}$  değerleri arasından maksimum olanı seçilerek, tasarımda esas alınacak kompresör gücü Denklem 3.69 ile belirlenmiştir (Nash et al., 2012):

$$P_{design} = 1,2 \cdot \max(E_{comp}) \quad (3.69)$$

Bu yaklaşım, sistem güvenliği ve işletme sürekliliği açısından gerekli emniyet payını da içermektedir. Sıkıştırma sürecini takiben, hidrojenin istenen saflık derecesine ( $x_{purity}$ ) ulaştırılması amacıyla gerekli enerji tüketimi, basitleştirilmiş doğrusal bir ilişki kullanılarak modellenmiştir. Saflaştırma için harcanan enerji Denklem 3.70 ile ifade edilmiştir (Abdelghafar et al., 2025):

$$E_{pur} = m_{H_2, in} \cdot (0,5 (1 - x_{purity})) \quad (3.70)$$

Burada  $\dot{m}_{H_2, in}$  hidrojenin giriş kütleli debisini (kg/s),  $x_{purity}$  ise hedeflenen hidrojen saflık oranını (boyutsuz) ifade etmektedir. Bu ifade, yüksek saflık gereksiniminin sistem enerji yükünü artırdığını açık biçimde yansıtmaktadır. Sıvılaştırma aşaması için özgül enerji tüketimi sabit kabul edilmiş ve toplam enerji tüketimi Denklem 3.71 ile hesaplanmıştır (Abdelghafar et al., 2025):

$$E_{liq} = m_{H_2, in} \cdot e_{liq} \quad e_{liq} = 8 \text{ kWh/kg} \quad (3.71)$$

Bu değer, endüstriyel ölçekte sıvı hidrojen tesisleri için literatürde verilen tipik enerji tüketim aralığıyla uyumludur (Abdelghafar et al., 2025). Sıvı hidrojenin tank içinde depolanması sırasında çevreden tanka olan ısı kazançları dikkate alınmıştır. Tank hacmi,

hidrojen yoğunluğu ( $\rho_{liq}=70.85 \text{ kg/m}^3$ ) ve tank tasarım faktörü ( $f_{tank} = 1.11$ ) kullanılarak Denklem 3.72 ile hesaplanmıştır (Abdelghafar et al., 2025):

$$V_{liq} = \frac{m_{H_2,in}}{\rho_{liq}}, V_{tank} = f_{tank} \cdot V_{liq}, A_{tank} = 6 V_{tank}^{2/3} \quad (3.72)$$

Isı kaybı ve buna karşılık gelen enerji tüketimi Denklem 3.73 ile hesaplanmıştır (Abdelghafar et al., 2025):

$$Q_{loss} = U A_{tank} (T_{amb} - T_{liq}), E_{storage} = \frac{Q_{loss}}{1000} \quad (3.73)$$

Yukarıda tanımlanan tüm bileşenlerin toplamı, sıvı hidrojen üretim ve depolama sürecinin saatlik toplam enerji ihtiyacını vermektedir (Abdelghafar et al., 2025):

$$E_{total} = E_{precool} + E_{comp} + E_{pur} + E_{liq} + E_{storage} \quad (3.84)$$

Bu hesaplama her bir saatlik simülasyon adımında tekrarlanarak, sistemin zamana bağlı toplam enerji gereksinimi, maksimum kompresör kapasitesi ve kriyojenik depolama kaynaklı kayıpları birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sıvı hidrojen depolama altyapısının hem enerji yoğunluğunu hem de tasarım ölçeğini bütüncül biçimde ortaya koymaktadır.

- *Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcıları (LOHC) tabanlı üretim sistemi*

Bu çalışmada LOHC tabanlı hidrojen depolama sistemi, detaylı kimyasal reaksiyon kinetiği ve ısıl entegrasyon çözümü yerine, sistem seviyesi enerji-ekonomi analizine uygun olacak şekilde eşdeğer özgül enerji tüketimi (SEC) yaklaşımı ile modellenmiştir. Amaç, LOHC teknolojisinin saatlik hidrojen üretimiyle birlikte sisteme getirdiği ilave elektrik yükünü ve bunun ekonomik etkilerini Simulink ortamında hesaplanabilir ve karşılaştırılabilir bir biçimde temsil etmektir. Modelde LOHC seçeneği, elektrolizör çıkışında üretilen ve depolamaya yönlendirilen saatlik hidrojen kütleli debisi  $m_{H_2}(t)$ (kg/h) girdisini almakta; buna karşılık LOHC sisteminin şarj (hidrojenasyon) sürecine karşılık gelen saatlik toplam enerji tüketimini  $E_{LOHC}(t)$  (kWh) üretmektedir. Bu yaklaşım, özellikle LOHC sistemlerinde enerji tüketiminin taşıyıcı türü, katalizör, işletme sıcaklığı, basınç seviyesi ve ısı entegrasyonuna güçlü biçimde bağlı olması nedeniyle, literatürde yaygın olarak kullanılan bir sistem seviyesi sadeleştirme yöntemidir (Preuster et al., 2017). Bu modelleme yaklaşımı kapsamında LOHC sistemi yalnızca hidrojenin LOHC'ye bağlandığı (şarj/hidrojenasyon) aşamayı temsil etmektedir. Hidrojenin geri kazanıldığı dehidrojenasyon aşaması ayrı bir

süreç olarak ele alınmamış; dolayısıyla bu blok, hidrojen depolama zincirinin tamamını değil, üretim–depolama arayüzündeki enerji yükünü tanımlamaktadır. Bu varsayım, yenilenebilir kaynaklı hidrojen üretim sistemlerinin depolama seçenekleriyle karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. LOHC için enerji tüketimi, hidrojen kütleli debisi ile doğru orantılı sabit bir özgül enerji tüketimi katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre saatlik LOHC enerji tüketimi Denklem 3.75 ile ifade edilmiştir (Preuster et al., 2017):

$$E_{LOHC}(t) = SEC_{LOHC} \cdot m_{H_2}(t) \quad (3.75)$$

Burada  $SEC_{LOHC}$ , LOHC depolama sürecine ait eşdeğer özgül enerji tüketimini (kWh/kg- $H_2$ ) temsil etmektedir. Bu parametre, literatürde LOHC sistemleri için raporlanan hidrojenasyon, yardımcı ekipmanlar (pompa, karıştırma, kontrol sistemleri vb.) ve dolaylı elektrik yüklerini kapsayacak şekilde tanımlanmış tipik değerler esas alınarak sabit kabul edilmiştir (Preuster et al., 2017). Bu çerçevede, LOHC sistemine ait enerji tüketimi; hidrojenasyon reaktörüne hidrojen beslenmesi, sıvı taşıyıcının dolaşımı ve yardımcı ekipmanların elektrik ihtiyacının toplam elektrik eşdeğeri olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, her bir bileşen ayrı ayrı modellenmemiştir. Böylece LOHC teknolojisi, sistem modeline tek bir karar parametresi ( $SEC_{LOHC}$ ) üzerinden entegre edilmekte ve diğer depolama seçenekleriyle (basınçlı gaz ve sıvı hidrojen) doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmektedir. Model, her bir saatlik simülasyon adımında çalıştırılarak LOHC seçeneği için saatlik enerji tüketimini üretmekte; bu değerler yıllık toplam enerji ihtiyacının hesaplanmasında ve ekonomik analizde (işletme maliyetleri ve özgül hidrojen maliyeti) doğrudan kullanılmaktadır. LOHC için tank doluluk oranı (SoC), taşıyıcı bozunması veya uzun dönem çevrim etkileri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş; analiz, depolama teknolojisinin sistem seviyesinde enerji yükü üzerindeki etkisiyle sınırlandırılmıştır (Preuster et al., 2017).

### 3.2.1.7 Hibrit sistem enerji yönetimi ve şebeke entegrasyonu

- *Saatlik yük ve güç dengesi modeli*

Bu çalışmada sistem talebinin gün içerisindeki belirli zaman aralıklarında çalışmasını temsil edebilmek amacıyla saatlik yük kontrolü uygulanmıştır. Geliştirilen kontrol yapısı iki temel çıktıyı üretmektedir: (i) tanımlanan zaman penceresine bağlı olarak etkin yük değeri  $L_{out}$  ve (ii) buna karşılık gelen günlük kapasite faktörü (CF). Öncelikle, simülasyon zamanı  $t$  (saat cinsinden) için gün içindeki saat aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$h = \text{mod}(t, 24), h \in [0, 24) \quad (3.76)$$

Sistemin çalıştığı zaman aralığı  $[h_s, h_e)$  olarak tanımlanmış olup, burada  $h_s$  ve  $h_e$  sırasıyla başlangıç ve bitiş saatlerini ifade etmektedir. İki farklı durum dikkate alınmıştır: (i) aynı gün içerisinde çalışma ( $h_s < h_e$ ) ve (ii) geceyi aşan çalışma ( $h_s \geq h_e$ ). Aktif çalışma süresi  $H_a$  aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$H_a = \begin{cases} h_e - h_s, & \text{eğer } h_s < h_e \\ (24 - h_s) + h_e, & \text{eğer } h_s \geq h_e \end{cases} \quad (3.77)$$

Buna karşılık gelen günlük kapasite faktörü ise Denklem 3.78 ile ifade edilmiştir:

$$CF = \frac{H_a}{24} \quad (3.78)$$

Gün içindeki belirli bir saat için sistemin aktif olup olmadığını gösteren aktivite göstergesi  $A(h)$  Denklem 3.79 ile tanımlanmıştır:

$$A(h) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } (h_s < h_e \text{ ve } h \in [h_s, h_e)) \\ 1, & \text{eğer } (h_s \geq h_e \text{ ve } (h \in [h_s, 24) \text{ veya } h \in [0, h_e))) \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.79)$$

Bu tanım doğrultusunda, sistemin etkin çıkış yükü Denklem 3.80 ile hesaplanmıştır:

$$L_{out} = A(h) \cdot L_{in} \quad (3.80)$$

Bu yaklaşım sayesinde yük, yalnızca tanımlanan çalışma zaman aralığında aktif olmakta; bunun dışındaki saatlerde sıfır değerini almaktadır.

- *Şebeke güç alış-satış mekanizması*

Sistem, Türkiye 2023 yılı toptan elektrik piyasasını temsil eden saatlik PPA () tabanlı elektrik fiyat profili altında modellenmiştir. Bu fiyat profili, 20 yıllık simülasyon dönemi boyunca her yıl aynı saatlik yapı korunarak tekrar edilmiş; böylece elektrik alım-satım hesaplarında yıllar arasında değişen bir fiyat eskalasyonu uygulanmamıştır. Şebekeden satın alınan elektrik, saatlik PPA tarifesi üzerinden maliyetlendirilirken; şebekeye satılan elektrik için %30 oranında etkin bir vergi uygulanmıştır. Bu oran, %20 kurumlar vergisi ve %10 YEKDEM kesintisini de içermektedir. Türkiye’ de elektrik piyasasındaki bağlantı ve ihracat kısıtlarını temsil edebilmek amacıyla, yıllık bazda dinamik bir ihracat üst sınırı tanımlanmıştır. Buna göre, şebekeye ihraç edilen toplam yıllık enerji miktarı, şebekeden ithal edilen enerjinin en fazla iki katı ile sınırlandırılmıştır (ihracat sınır faktörü = 2). Bu

sınırın aşılması durumunda, fazla üretim için herhangi bir gelir elde edilmemekte olup, bu enerjiye karşılık gelen gelir oranı sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu yapı, Türkiye elektrik piyasasında alım-satım işlemleri arasındaki pratik asimetriyi yansıtmakta ve ihracat faktörünün ( $\pm 20-40\%$ ) ve vergi oranlarının hidrojenin LCOH üzerindeki etkilerinin duyarlılık analizine olanak tanımaktadır.

Model kapsamında, yenilenebilir elektrik üretimi ile sistem talebi arasındaki etkileşim saatlik olarak değerlendirilmiştir. Yenilenebilir üretim gücü  $P_m$  ile sistem yükü  $P_{load}$  arasındaki ilişki şu şekilde ele alınmıştır:

- i. Eğer  $P_m > P_{load}$  ise, fazla elektrik şebekeye ihraç edilerek gelir elde edilir.
- ii. Eğer  $P_m < P_{load}$  ise, eksik kalan enerji şebekeden ithal edilir.

Tüm alt sistemler arasındaki entegrasyonu açık biçimde ifade edebilmek amacıyla, sistem genelindeki enerji dengesi Denklem 3.81 ile tanımlanmıştır:

$$P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{grid,in}(t) = P_{ELC}(t) + P_{BOP}(t) + P_{grid,out}(t) \quad (3.81)$$

Burada  $P_{PV}(t)$  ve  $P_{WT}(t)$  anlık yenilenebilir elektrik üretimini,  $P_{ELC}(t)$  elektrolizörün toplam elektrik yükünü,  $P_{BOP}(t)$  dengeleme sistemlerine (su arıtma, sıkıştırma, sıvılaştırma vb.) ait yardımcı yükleri,  $P_{grid,in}(t)$  ve  $P_{grid,out}(t)$  ise sırasıyla şebekeden ithal edilen ve şebekeye ihraç edilen güçleri ifade etmektedir. Bu denklem, tüm alt sistemler için enerji korunumu ilkesini sağlayarak entegre tekno-ekonomik simülasyon çerçevesinin temelini oluşturmaktadır.

- *Karbon vergisi entegrasyonu*

Şebekeden çekilen elektrik enerjisi, şebekeye özgü bir emisyon faktörü  $E_f$  ( $\text{kgCO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ ) ile ilişkilendirilmiştir. Buna göre, şebeke kaynaklı toplam  $\text{CO}_2$  emisyonu Denklem 3.82 ile hesaplanmıştır (Partnership for Market Readiness, 2017):

$$Emissions = E_f \cdot kWh_{from\ grid} \quad (3.82)$$

Burada  $E_{fromgrid}$ , şebekeden temin edilen elektrik enerjisini (kWh) ifade etmektedir. Karbon vergisi maliyeti Denklem (3.83) ile elde edilmiştir (World Resources Institute, 2015):

$$Carbon_{Tax} = \left( \frac{E_f \cdot kWh_{from\ grid}}{1000} \right) \cdot Tax_{rate} \quad (3.83)$$

Burada 1000 katsayısı, emisyon değerinin  $\text{kgCO}_2$  biriminden  $\text{tonCO}_2$  birimine dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bu maliyet, sistemin yıllık işletme giderlerine doğrudan yansıtılmıştır.

- *Oksijen yan ürün geliri modeli*

Elektroliz süreci sırasında hidrojen ile eş zamanlı olarak üretilen oksijen, sistem için ilave bir gelir kalemi olarak değerlendirilmiştir. Oksijen satışından elde edilen gelirlerin net bugünkü değeri, Denklem 3.84 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$NPV_{O_2, \text{revenue}} = \sum_{t=1}^N \frac{O_{2,t} \cdot P_{O_2}}{(1+r)^t} \quad (3.84)$$

Burada  $O_{2,t}$  yıllık oksijen üretim miktarını (kg),  $P_{O_2}$  oksijen satış fiyatını (USD/kg) ve  $r$  iskonto oranını temsil etmektedir. Elde edilen oksijen geliri, sistemin net maliyetini azaltıcı bir unsur olarak tekno-ekonomik değerlendirmeye dâhil edilmiştir.

### 3.3 Yeşil Hidrojen Üretim Sisteminin Uzun Dönem Ekonomik Modeli

Bu bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen hidrojen üretim sistemlerinin uzun dikkate değer ekonomik performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan tekno-ekonomik modelleme yaklaşımı açıklanmaktadır. Model, hidrojen üretim zincirinin teknik davranışını temsil eden enerji ve kütle dengeleri ile yatırım ve işletme dönemlerini kapsayan ekonomik hesaplamaları bütünleşik bir yapı içinde ele almaktadır. Böylece sistemin yalnızca teknik olarak uygulanabilirliği değil, aynı zamanda farklı mali ve düzenleyici koşullar altında ekonomik sürdürülebilirliği de nicel olarak değerlendirilebilmektedir. Tekno-ekonomik analiz, 20 yıllık proje ömrü boyunca hidrojen üretim sistemini oluşturan tüm alt bileşenlerin yatırım harcamaları, işletme ve bakım giderleri, elektrik alım-satım dengeleri, yan ürün gelirleri ve vergisel yükümlülükleri dikkate alan indirgenmiş nakit akışı temelli bir çerçeveye dayanmaktadır. Model kapsamında yıllık nakit akışları hesaplanarak hidrojen üretiminin birim maliyeti ile yatırımın finansal geri dönüşü birlikte değerlendirilmiştir. Gerçekçi bir ekonomik değerlendirme yapabilmek amacıyla, hidrojen üretim sisteminin teknik yapısı sabit tutulmuş; buna karşılık enerji piyasası koşulları, vergisel düzenlemeler ve karbon fiyatlandırması gibi politika kaynaklı dışsal değişkenlerin ekonomik göstergeler üzerindeki etkileri senaryo tabanlı bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, politika araçlarının hidrojen üretim maliyeti ve yatırım fizibilitesi üzerindeki etkilerinin birbirinden

bağımsız olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, Bölüm 3.2.2.1’de tekno-ekonomik analiz metodolojisi ve politika etkilerinin modellenmesi sunulmakta; Bölüm 3.2.2.2’de ise modelde kullanılan maliyet bileşenleri ile ekonomik performans göstergeleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Böylece izleyen bölümlerde elde edilen sonuçların hem teknik sistem kurgusu hem de mali ve düzenleyici çerçeve açısından tutarlı bir zemine oturtulması amaçlanmaktadır.

### **3.3.1 Ekonomik modelin matematiksel çerçevesi**

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenen hidrojen üretim ve depolama sistemlerinin ekonomik fizibilitesi, yalnızca birim üretim maliyetlerine odaklanan dar bir çerçeve ile değil; yatırımcı perspektifini esas alan, nakit akışlarını ve mali düzenlemeleri doğrudan dikkate alan bütüncül bir tekno-ekonomik analiz yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında, hidrojen üretim sisteminin tüm yaşam döngüsü boyunca oluşan yatırım harcamaları, işletme giderleri, enerji alış-satışları, yan ürün gelirleri ve vergi yükleri birlikte ele alınmıştır.

Ekonomik değerlendirmede temel gösterge olarak Seviyelendirilmiş Hidrojen Maliyeti kullanılmış; bununla birlikte, yatırım kararları açısından belirleyici olan Net Bugünkü Değer, İç Kârlılık Oranı ve geri ödeme süresi gibi finansal performans göstergeleri de ayrıntılı biçimde hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, hidrojen yatırımlarının yalnızca teknik verimlilik değil, aynı zamanda mali ve düzenleyici çerçeve tarafından şekillendiğini vurgulayan güncel literatürle uyumludur (Choi et al., 2024; Lee et al., 2022; Roh et al., 2023). Analiz sürecinde, elektrolizör kapasitesi, teknik verim değerleri, sistem ömrü, saatlik elektrik fiyatları (PPA tabanlı) ve kapasite faktörleri tüm senaryolarda sabit tutulmuş; politikaya bağlı etkiler, vergi oranları, karbon kredileri, yatırım teşvikleri ve amortisman uygulamaları aracılığıyla ekonomik modele entegre edilmiştir. Böylece, farklı politika çerçevelerinin yatırım ekonomisi üzerindeki etkileri doğrudan ve karşılaştırılabilir biçimde ortaya konmuştur.

#### **3.3.1.1 Uzun dönem nakit akışı yapısı ve yıllık segmentasyon metodolojisi**

Sistemin uzun dönem tekno-ekonomik performansını gerçekçi biçimde değerlendirebilmek için simülasyon 20 yıllık ekonomik ömür boyunca saatlik çözünürlükte çalıştırılmış, ancak ekonomik analizde kullanılacak gelir-gider kalemleri yıllık bazda elde edilmiştir. Bu nedenle, saatlik simülasyon çıktıları yıllara bölünerek her yılın katkısı ayrı ayrı çıkarılmıştır.

Simülasyon zamanı  $t$  saat cinsinden tanımlanmış ve bir işletme yılı  $H = 8760$  saat olarak kabul edilmiştir. Buna göre yıl indisi Denklem 3.85’te verilmiştir:

$$k(t) = \min \left( \left\lfloor \frac{t}{H} \right\rfloor + 1, 20 \right), k \in \{1, \dots, 20\} \quad (3.85)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada  $\lfloor \cdot \rfloor$  aşağı yuvarlama operatörüdür. Her bir yılın sonunda (yıl geçiş anında)  $t_k = kH$  olacak şekilde, ilgili değişkenin (ör. şebeke satış geliri, şebekeden elektrik alım maliyeti, oksijen geliri, karbon vergisi gibi) kümülatif değeri alınarak bir “anlık kayıt” oluşturulmuştur:

$$S_k = G(t_k^+), S_0 = 0 \quad (3.86)$$

Burada  $G(t)$  saatlik simülasyon içinde biriken (kümülatif) büyüklüğü ifade etmektedir. İlgili yılın yıllık katkısı ise ardışık iki snapshot farkı alınarak:

$$Y_k = S_k - S_{k-1}, k = 1, \dots, 20 \quad (3.87)$$

olarak hesaplanmıştır. Böylece  $Y_k$ , yıl  $k$ ’nın sistem toplam performansına olan net katkısını temsil eder. Bu yaklaşımın temel avantajı; saatlik simülasyonun kümülatif büyüklük üretmesini bozmadan, ekonomik analizde ihtiyaç duyulan yıllık gelir, gider ve vergi serilerinin doğrudan ve şeffaf biçimde elde edilmesidir.

Simulink tarafında bu yıllık segmentasyon, kalıcı bellek kullanan bir MATLAB Function bloğu ile uygulanmıştır. Yıl sınırına gelindiğinde kümülatif değer yalnızca bir kez kaydedilmiş, önceki yılın snapshot değeri ile farkı alınarak yıllık artış çıktısı üretilmiştir. Elde edilen  $Y_1, \dots, Y_{20}$  yıllık serileri, indirgenmiş nakit akışı (DCF) analizleri kapsamında sistematik olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda söz konusu seriler, hidrojenin seviyelendirilmiş maliyeti, Net Bugünkü Değer ve karbon vergisi gibi ekonomik performans göstergelerinin hesaplanmasında tutarlı bir veri girdisi olarak değerlendirilmiştir.

### 3.3.1.2 Seviyelendirilmiş hidrojen maliyeti

Bu çalışmada kullanılan seviyelendirilmiş maliyet yaklaşımı ile indirgenmiş nakit akışı analizi, literatürde yaygın olarak kullanılan tekno-ekonomik değerlendirme yöntemlerine dayandırılmıştır. Hidrojen üretim sistemlerine yönelik maliyet hesaplamalarında özellikle Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2019) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA, 2020) tarafından önerilen LCOH yaklaşımı esas alınmıştır. Ekonomik analiz kapsamında kullanılan Net Bugünkü Değer, İç Kârlılık Oranı ve geri ödeme süresi gibi göstergeler ise

European Commission (2014) (European Commission, 2014), UNIDO (1972) (United Nations Industrial Development Organization, 1972) ve Damodaran (2016) (Damodaran, 2016) çalışmalarında sunulan klasik finansal analiz yöntemleri doğrultusunda hesaplanmıştır. LCOH, sistemin ekonomik ömrü boyunca oluşan tüm indirgenmiş net maliyetlerin, aynı süre içerisinde üretilen toplam hidrojen miktarına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. LCOH aşağıdaki Denklem 3.88 ile tanımlanmaktadır (IRENA, 2020):

$$LCOH = \frac{NPC - R_{grid} - R_{O_2} + Tax}{\sum_{t=1}^N \frac{H_{2,t}}{(1+r)^t}} \quad (3.88)$$

Burada  $NPC$  toplam indirgenmiş maliyeti (USD),  $R_{grid}$  şebekeye satılan elektrikten elde edilen indirgenmiş geliri (USD),  $R_{O_2}$  oksijen satışından elde edilen indirgenmiş geliri (USD),  $Tax$  indirgenmiş toplam vergi yükünü (USD) ve  $H_{2,t}$  yılda üretilen hidrojen miktarını (kg) ifade etmektedir.  $r$  iskonto oranını ve  $N$  sistemin ekonomik ömrünü (20 yıl) göstermektedir.

### 3.3.1.3 Toplam indirgenmiş maliyet (NPC)

Sistemin toplam indirgenmiş maliyeti, Denklem 3.99 kullanılarak başlangıç yatırım maliyetleri ile yıllık işletme giderlerinin ve enerji alış-satış dengesinin bugünkü değere indirgenmesiyle hesaplanmıştır (European Commission, 2014):

$$NPC = CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t + E_{grid,t} \cdot PPA - E_{sell,t} \cdot PPA}{(1+r)^t} \quad (3.89)$$

Burada  $CAPEX$ , fotovoltaik sistem, rüzgâr türbinleri, elektrolizör, hidrojen depolama ünitesi, kompresör ve su arıtma sistemlerine ait toplam yatırım maliyetini (USD) ifade etmektedir.  $OPEX_t$  yıldaki işletme giderlerini (USD),  $E_{grid,t}$  ve  $E_{sell,t}$  sırasıyla şebekeden satın alınan ve şebekeye satılan elektrik enerjisini (kWh) göstermektedir.  $PPA$  elektrik birim fiyatını (USD/kWh) ifade etmektedir.

### 3.3.1.4 Oksijen satış geliri

Elektroliz süreci sonucunda üretilen oksijenin ticari olarak satıldığı varsayılmış ve indirgenmiş toplam gelir Denklem 3.90 ile hesaplanmıştır:

$$R_{O_2} = \sum_{t=1}^N \frac{O_{2,t} \cdot P_{O_2}}{(1+r)^t} \quad (3.90)$$

Burada  $O_{2,t}$ , t. yılda üretilen oksijen miktarını (kg),  $P_{O_2}$  ise oksijenin birim satış fiyatını (USD/kg) ifade etmektedir.

### 3.3.1.5 Yıllık net nakit akışı ( $CF_t$ )

Sistemin t. yılındaki toplam gelir ile toplam gider arasındaki farkı temsil eden net nakit akışı Denklem 3.91 kullanılarak tanımlanmıştır (Damodaran, 2016):

$$CF_t = (E_{sell,t} \cdot PPA + O_{2,t} \cdot P_{O_2}) - (OPEX_t + E_{grid,t} \cdot PPA) \quad (3.91)$$

### 3.3.1.6 Vergi yükü (tax)

Yıllık net nakit akışları üzerinden uygulanan vergilerin indirgenmiş toplam değeri Denklem 3.92 ile hesaplanmıştır (Damodaran, 2016):

$$Tax = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t \cdot \tau}{(1+r)^t} \quad (3.92)$$

Burada  $\tau$ , kurumlar vergisi ve benzeri finansal yükümlülükleri içeren toplam vergi oranını ifade etmektedir. Vergi hesabında negatif kâr oluşan yıllarda vergi yükü oluşturulmamıştır.

### 3.3.1.7 Toplam hidrojen üretimi

Sistem ömrü boyunca üretilen hidrojenin indirgenmiş toplam miktarı Denklem 3.93 ile hesaplanmıştır:

$$H_2 = \sum_{t=1}^N \frac{H_{2,t}}{(1+r)^t} \quad (3.93)$$

### 3.3.1.8 Net bugünkü değer (NPV)

Yatırımın ekonomik performansını değerlendirmek amacıyla Net Bugünkü Değer Denklem 3.94 ile hesaplanmıştır (Choi et al., 2024; Lee et al., 2022; Roh et al., 2023):

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (3.94)$$

Burada  $CF_t$ , t. yıldaki net nakit akışını ifade etmektedir.

### 3.3.1.9 İç kârlılık oranı (IRR)

İç Kârlılık Oranı, Net Bugünkü Değerin sıfır olduğu iskonto oranı olarak tanımlanmaktadır (Choi et al., 2024; Lee et al., 2022; Roh et al., 2023):

$$NPV(r = IRR) = 0 \quad (3.95)$$

Bu gösterge, yatırımın finansal uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

### 3.3.1.10 Geri ödeme süresi (PB)

Geri ödeme süresi, indirgenmiş kümülatif nakit akışının ilk kez pozitif olduğu yıl olarak tanımlanmaktadır (Choi et al., 2024; Lee et al., 2022; Roh et al., 2023):

$$PB = \min \left\{ t \mid \sum_{k=1}^t \frac{CF_k}{(1+r)^k} \geq 0 \right\} \quad (3.96)$$

Bu ifade, yatırımın başlangıç maliyetinin geri kazanıldığı zamanı göstermektedir.

## 3.3.2 Maliyet bileşenleri ve ekonomik göstergeler

Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sisteminin ekonomik performansı, tüm alt sistemleri kapsayan bütüncül bir tekno-ekonomik çerçevede değerlendirilmiştir. Amaç yalnızca hidrojenin birim üretim maliyetini belirlemek değil; aynı zamanda sistemin uzun vadeli finansal fizibilitesini, nakit akışı davranışını ve politika koşullarına karşı duyarlılığını ortaya koymaktır. Bu kapsamda maliyet yapısı ayrıntılı biçimde tanımlanmış ve ekonomik göstergeler dinamik (indirgenmiş) yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 3.5'te verilen göstergeler, sistemin hem maliyet rekabetçiliğinin hem de finansal fizibilitesinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca geliştirilen çerçeve, farklı teknik ve ekonomik parametreler için duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilmesini desteklemekte; böylece elektrik fiyatı, iskonto oranı, ekipman maliyetleri, kapasite kullanımı, hidrojen satış fiyatı ve politika teşvikleri gibi değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenebilmektedir.

**Tablo 3.5:** Sistem bileşenlerine ait tekno-ekonomik parametreler ve model varsayımları.

BİLEŞEN	PARAMETRE	DEĞER / ARALIK	CAPEX İFADESİ	OPEX İFADESİ	REF.
PV	Kurulu güç	1 MWp (ölçeklenebilir)	$1,247 \times$ (B[MW]) $\wedge 0,85$	$20,4 \times$ boyut(k W)	(National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024)
	Yıllık degradasyon	%0,5/yıl (ölçeklenebilir)			
RT	Anma gücü	1 MW (ölçeklenebilir)	$1,268 \times$ (B[MW]) <sup>^</sup> 0,85	$28,83 \times$ boyut(kW)	(National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024)
	Kule yüksekliği	80 m			
	Devreye girme / çıkma hızı	3–25 m/s			
Pem Elektrolizör	Yıllık degradasyon	%1,6/yıl (ölçeklenebilir)			
	Anma kapasitesi	1 MW (ölçeklenebilir)	$1,445 \times$ (B[MW]) $\wedge 0,85$	CAPEX'in %3'ü	(Galletti et al., 2025)
	Çalışma basıncı	$\leq 30$ bar			
	Çalışma sıcaklığı	$\leq 80$ °C			
Gaz Kompresörü	Yıllık degradasyon	%1/yıl (ölçeklenebilir)			
	Çıkış basıncı	350–700 bar	$25,958 \times$ [kW] <sup>^0,71</sup>	CAPEX'in %3'ü	(Bellotti et al., 2022)
Sıvı H <sub>2</sub> Kompresörü	Çıkış basıncı	40 bar + kriyojenik kademe	Sıvılaştırıcı ıya dâhil	Sıvılaştırıcıya dâhil	(Connelly et al., 2019)
Sıvılaştırıcı	–	–	$5,6 \times 10^6 \times$ [kg] <sup>^0,8</sup> × I(CEPCI)	CAPEX'in %1'i	(Connelly et al., 2019)
H <sub>2</sub> Depolama Tankı	Tip	Basıncılı / Sıvı	520–320 USD/kg	–	(Zieba Falama et al., 2023)

**Tablo 3.6** (devam)

	Nominal kapasite	$\geq 500$ kg			
	Depolama basıncı (gaz)	350–700 bar			
	Depolama sıcaklığı (sıvı)	–253 °C			
<b>Su Kaynağı</b>	Şebeke suyu (TW)	CAPEX: 500000 USD;	Enerji: 4.50 kWh/m <sup>3</sup>	–	(Simoes et al., 2021)
		OPEX: 0			
	Endüstriyel su (IW)	CAPEX: 776000 USD + 25000 USD	Enerji: 4,5635 kWh/m <sup>3</sup>	0.18 USD/m <sup>3</sup>	(Simoes et al., 2021)
	Yer altı suyu (GW)	CAPEX: 580000 USD + 150000 USD	Enerji: 4.55 kWh/m <sup>3</sup>	0,60 USD/m <sup>3</sup>	(Simoes et al., 2021)
	Yağmur suyu (RW)	CAPEX: 201000 USD	Enerji: 0,0635 kWh/m <sup>3</sup>	–	(Simoes et al., 2021)
	Deniz suyu (SW)	CAPEX: 576000 USD + 80000 USD	Enerji: 4,501 kWh/m <sup>3</sup>	–	(Simoes et al., 2021)
<b>Faktörler</b>	Emisyon faktörü	0.44 kg CO <sub>2</sub> /kWh	–	–	(T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)
	Genel vergiler	%30	–	–	

### 3.3.3 Politika tabanlı tekno-ekonomik senaryolar

Hidrojen üretim sistemlerinin ekonomik performansı üzerinde mali ve düzenleyici politikaların etkisini değerlendirebilmek amacıyla, temel tekno-ekonomik model üzerine inşa edilen beş farklı politika senaryosu tanımlanmıştır. Her bir senaryo, teknik sistem varsayımları sabit tutulmak kaydıyla, yalnızca belirli mali veya vergisel parametrelerde yapılan değişiklikler üzerinden kurgulanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, politika araçlarının hidrojen ekonomisi üzerindeki etkileri izole bir biçimde analiz edilebilmiştir.

Temel senaryo, herhangi bir teşvik veya destek mekanizmasının bulunmadığı referans durumu temsil etmektedir. Bu senaryoda kurumsal vergi oranı %30 olarak alınmış ve tüm sonuçlar diğer politika senaryoları için karşılaştırma noktası olarak kullanılmıştır.

Azaltılmış Vergi senaryosunda, kurumsal vergi oranı %30'dan %20'ye düşürülerek sanayi ölçekli hidrojen yatırımları için uygulanan ılımlı bir mali teşvik durumu temsil edilmiştir. Bu senaryo ile, yatırımcı üzerindeki vergi yükünün azaltılmasının LCOH, NBD, İKO ve GÖS üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Karbon Kredisi senaryosu, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının hidrojen üretim ekonomisine olan katkısını yansıtmak amacıyla modellenmiştir. Bu kapsamda, ton başına 100 USD düzeyinde bir karbon fiyatı varsayılmış (High-Level Commission on Carbon Prices, 2017) ve yenilenebilir kaynaklara dayalı hidrojen üretimi sayesinde her bir ton hidrojen için 8,5 ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonun önlendiği kabul edilmiştir (Concawe, 2003). Önlenebilir emisyon miktarı yıllık bazda ek gelir olarak modele dâhil edilerek, karbon kredilerinin ekonomik göstergeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Yatırım Vergi Kredisi (ITC) senaryosu, başlangıç yatırım maliyetlerini doğrudan azaltan bir politika aracını temsil etmektedir. Bu senaryoda, toplam sermaye harcamasının %20'si yatırımın başlangıç yılında (yıl 0) vergi indirimi olarak uygulanmış ve ilk yatırım yükünün finansal göstergeler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Hızlandırılmış Amortisman senaryosu ise, vergi matrahının yatırımın erken yıllarında düşürülmesine yönelik bir düzenlemeyi yansıtmaktadır. Bu senaryoda, ilk beş mali yıl boyunca yıllık %20 oranında amortisman uygulanarak geçici bir vergi kalkını oluşturulmuş ve bu yaklaşımın nakit akışları ile geri ödeme süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tanımlanan tüm politika senaryolarında, sistemin teknik özellikleri, kapasite boyutlandırması, PPA tarifeleri ve maliyet yapısı aynı tutulmuştur (Tablo 3.6). Böylece elde edilen sonuçlar, yalnızca mali ve düzenleyici politika değişkenlerinden kaynaklanan etkileri yansıtacak şekilde kurgulanmıştır. Senaryo analizleri sonucunda, her bir politika çerçevesinin LCOH, NPV, IRR ve geri ödeme süresi göstergeleri üzerindeki etkiler, sistemin ekonomik performansını ortaya koyacak şekilde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

**Tablo 3.7:** Politika senaryolarına ait mali parametrelerin özeti.

Parametre	Temel	Azaltılmış Vergi	Karbon Kredisi	İtc
<b>Kurumsal Vergi Oranı</b>	%30	%20	%30	%30
<b>Karbon Fiyatı (Usd/Tco<sub>2</sub>)</b>	–	–	100	–
<b>Önlenen Co<sub>2</sub> (Tco<sub>2</sub>/Th<sub>2</sub>)</b>	–	–	8.5	–
<b>Yatırım Vergi Kredisi</b>	–	–	–	CAPEX in %20 si
<b>Hızlandırılmış Amortisman</b>	–	–	–	İlk 5 yıl %20 y <sup>-1</sup>
<b>Elektrik Fiyatlandırması</b>	PPA	PPA	PPA	PPA

### 3.4 Optimizasyon ve Karar Destek Çerçevesi

Dinamik teknik simülasyon ve ekonomik entegrasyonun ardından, sistemin ekonomik ve çevresel performansını iyileştirmek amacıyla bir optimizasyon katmanı oluşturulmuştur. Bu kapsamda, LCOH'nin minimize edilmesi ve yenilenebilir enerji payının (RenF) maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Yirmi yıllık saatlik simülasyonların yüksek hesaplama yükü nedeniyle, Simulink çıktıları kullanılarak eğitilen vekil modellerden yararlanılmıştır. Bu modeller, doğrusal olmayan sistem tepkilerini yüksek doğrulukla temsil ederek optimizasyon sürecinin hesaplama verimliliğini artırmıştır.

Çok amaçlı optimizasyon aşamasında MOPSO ve NSGA-III algoritmaları aynı problem tanımı ve aynı vekil (YSA) model üzerinde ayrı ayrı çalıştırılarak karşılaştırılmıştır. Böylece Pareto cephesinin yakınsama davranışı, çözüm çeşitliliği ve en iyi uzlaşık çözüm (BCS) seçimi bakımından algoritma kaynaklı farklılıklar nicel olarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritmanın ürettiği Pareto-optimal çözüm kümeleri ayrı olarak raporlanmış; ayrıca yöntemler arası karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla çözümler aynı eksen takımı üzerinde birlikte görselleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde, PV ve rüzgâr türbini kapasiteleri ile elektrolizörün çalışma zaman aralıkları, saatlik elektrik fiyatları ve şebeke kısıtları altında eşzamanlı olarak belirlenmiştir. Elde edilen Pareto-optimal çözümler, ekonomik (LCOH, NPV) ve çevresel (RenF) hedefler arasındaki ödünleşimleri ortaya

koyarak hem teknik tasarım hem de politika temelli karar süreçleri için güçlü bir karar destek altyapısı sunmaktadır.

Bandırma, yer seçimi analizleri sonucunda öne çıkan temel lokasyon olarak değerlendirilmiş; Çeşme ve Mersin ise geliştirilen optimizasyon çerçevesinin farklı yenilenebilir kaynak profillerine sahip bölgelerdeki davranışını test etmek amacıyla analize dahil edilmiştir. Çeşme yüksek rüzgâr potansiyelini, Mersin ise daha güçlü güneş enerjisi karakterini temsil ederek Bandırma için karşılaştırmalı bir referans zemini oluşturmuştur. Bu sayede elde edilen Pareto çözümlerinin yalnızca tek bir lokasyona özgü olup olmadığı sorgulanmış, LCOH–RenF ödünleşiminin mekânsal kaynak farklılıklarına göre nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeşil hidrojen üretim sisteminin teknik ve ekonomik performansının birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla çok amaçlı bir optimizasyon ve karar destek çerçevesi geliştirilmiştir. Çalışmanın temel motivasyonu, hidrojen üretim maliyetlerini belirleyen unsurların yalnızca tekil teknik parametreler ya da ekonomik göstergeler üzerinden değil; sistemin bütüncül davranışı dikkate alınarak analiz edilmesi gerekliliğidir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması ile elektrolizörün işletme stratejisi eş zamanlı olarak ele alınmış ve uzun dikkate değer, dinamik bir değerlendirme yaklaşımı benimsenmiştir.

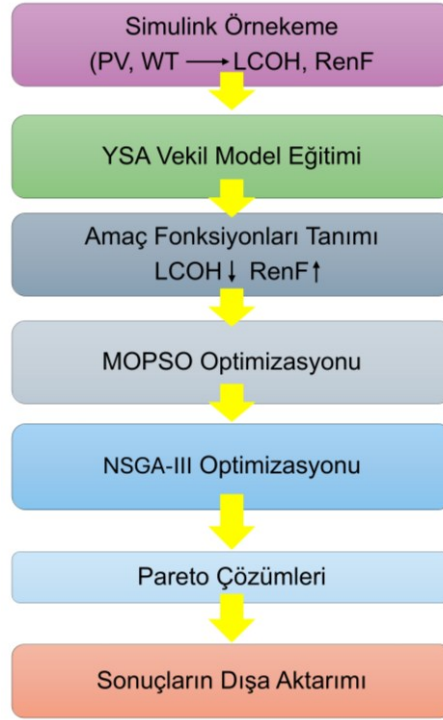
Optimizasyon sürecine geçilmeden önce, hidrojen üretim zincirinin merkezinde yer alan elektrolizörün çalışma koşullarının mühendislik açısından tutarlı bir çerçevede tanımlanması gerektiği kabul edilmiştir. Elektrolizörün işletme parametreleri yalnızca anlık verim ve elektrik tüketimini değil; aynı zamanda sistemin yıllık işletme profili, ekipman ömrü, bozunma davranışı ve toplam hidrojen üretim maliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, elektrolizörün sabit veya rastgele varsayımlara dayalı bir işletme rejimi altında modellenmesi, üst seviye optimizasyon sonuçlarının fiziksel gerçekçilikten uzaklaşmasına yol açabilecek dikkate değer bir risk olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, elektrolizörün işletme koşulları, yenilenebilir üretim profilleri ve saatlik elektrik fiyatları ile tutarlı olacak şekilde sistematik biçimde ele alınmıştır.

Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan temel karar değişkenleri, fotovoltaik kurulu gücü, rüzgâr türbini kurulu gücü ve elektrolizörün gün içi işletme düzenidir. PV ve RT kapasiteleri,

çalışılan bölgelerin yenilenebilir enerji potansiyeli, şebeke bağlantı yapısı ve Türkiye koşullarında teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir santral ölçekleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, her iki yenilenebilir kaynak için de 0,5–10 MW aralığında bir arama uzayı tanımlanmış ve analizlerde mühendislik açısından muhafazakâr bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu sınırlar, hem yenilenebilir kaynak potansiyelinin yeterince temsil edilmesini sağlamakta hem de pratikte uygulanması güç olan aşırı büyük sistem konfigürasyonlarının analiz dışı bırakılmasına imkân tanımaktadır.

Elektrolizörün Start Hour ve Stop Hour parametreleri ise PV ve RT kapasitelerinden farklı bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu parametreler doğrudan sürekli optimizasyon değişkenleri olarak tanımlanmamış; bunun yerine senaryo tabanlı işletme stratejileri şeklinde modellenmiştir. Bu yaklaşımın temel gerekçesi, elektrolizörün gün içi dur-kalk davranışının özellikle şebekeye bağlı hibrit sistemlerde saatlik elektrik fiyatlarına son derece duyarlı olmasıdır. Bu nedenle, elektrolizörün gün içerisinde tamamen devre dışı kaldığı süreler 1 ila 8 saat arasında değişen sabit zaman pencereleri olarak tanımlanmış ve bu kapalı kalma sürelerinin günün farklı saatlerine kaydırılması yoluyla çok sayıda işletme senaryosu oluşturulmuştur. Tanımlanan bu zaman penceresi analizleri ile, elektrolizörün hangi saat aralıklarında devre dışı bırakılmasının LCOH açısından daha avantajlı sonuçlar ürettiği sistematik biçimde incelenmiştir. PV ve RT kurulu güçleri sabit tutulurken yalnızca elektrolizörün kapalı kalma süresi ve zamanlamasının değiştirilmesi, işletme stratejisinin sistem performansı üzerindeki etkisinin izole edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece elde edilen sonuçlar, rastgele varsayımlara değil; saatlik elektrik fiyatlarına, yenilenebilir üretim profillerine ve gerçekçi şebeke etkileşimine dayalı olarak şekillenmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen metodolojik çerçeve (Şekil 3.25), yüksek çözünürlüklü teknik simülasyonlar ile uzun ddikkate değer ekonomik fizibilite analizini ve çok amaçlı optimizasyonu entegre eden bütüncül bir karar destek yapısı sunmaktadır. Literatürde yer alan birçok tekno-ekonomik çalışma, yenilenebilir enerji üretimini ve elektrolizör davranışını genellikle statik veya basitleştirilmiş modeller üzerinden ele almakta; örneğin PV modül verimleri, rüzgâr türbini güç eğrileri veya elektrolizör verimleri sabit kabul edilmektedir. Bu tür yaklaşımlar, özellikle kısmi yük koşullarında ve saatlik değişkenlik gösteren işletme rejimlerinde sistem davranışını yeterince temsil edememektedir.



**Şekil 3.25:** Optimizasyon iş akışı.

Bu çalışmada ise, saatlik meteorolojik veriler her bir alt sistem için ayrıntılı fiziksel alt modellerle birleştirilmiş ve tamamen dinamik bir Simulink tabanlı simülasyon altyapısı oluşturulmuştur. Böylece, yenilenebilir üretimdeki zamansal değişkenlik, elektrolizörün saatlik işletme durumu ve ekonomik göstergeler arasındaki etkileşimler tutarlı ve mühendislik açısından anlamlı bir biçimde analiz edilebilmiştir. Geliştirilen bu optimizasyon ve karar destek çerçevesi, yalnızca en düşük LCOH değerlerinin elde edilmesini değil; aynı zamanda bu sonuçların fiziksel, teknik ve işletme açısından uygulanabilir olmasını da güvence altına almayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada optimizasyon problemi, birbiriyle çatışan iki temel hedef fonksiyon üzerinden tanımlanmıştır. Birinci hedef, sistemin ekonomik performansını temsil eden Seviyelendirilmiş Hidrojen Maliyeti'nin minimize edilmesi; ikinci hedef ise çevresel performansı yansıtan yenilenebilir enerji payının (RenF) maksimize edilmesidir. Literatürde LCOH çoğunlukla bir sonuç veya çıktı metriği olarak ele alınmakla birlikte, bu çalışmada doğrudan bir optimizasyon hedefi olarak tanımlanmıştır. Bunun temel gerekçesi, LCOH'nin sermaye yatırımları (CAPEX), işletme giderleri (OPEX), elektrolizör degradasyonu, şebekeden çekilen elektrik miktarı ve elektrik fiyatlarının zamansal değişimi gibi birçok etkili parametreyi tek bir gösterge altında bütünleştiren kapsamlı bir ekonomik ölçüt

olmasıdır. Dolayısıyla LCOH'nin minimize edilmesi, yalnızca bir maliyet kaleminin değil, sistemin uzun ddikkate değer ekonomik verimliliğinin bir bütün olarak optimize edilmesi anlamına gelmektedir.

İkinci hedef fonksiyon olan RenF, hidrojen üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin ne kadarının yenilenebilir kaynaklardan sağlandığını ifade etmektedir. Hibrit ve şebekeye bağlı sistemlerde, elektrolizörün yüksek kapasite faktörlerinde işletilebilmesi için belirli zaman aralıklarında şebekeden elektrik çekilmesi kaçınılmaz olabilmektedir. Ancak Türkiye elektrik şebekesinin mevcut üretim karmasında yenilenebilir kaynakların payının yaklaşık %50 seviyesinde olması, şebekeden çekilen elektriğin “yeşil hidrojen” tanımını zayıflatmasına yol açmaktadır. Bu nedenle RenF metriği, yalnızca maliyet açısından avantajlı çözümleri değil; aynı zamanda çevresel bütünlüğü korunmuş, yenilenebilir ağırlıklı bir hidrojen üretim yapısının teşvik edilmesini amaçlamaktadır. LCOH ve RenF'in eş zamanlı olarak optimize edilmesi, maliyet düşürme ile yenilenebilir saflık arasındaki temel dengeyi açık ve nicel bir biçimde ortaya koymaktadır.

Tanımlanan bu çok amaçlı optimizasyon problemi, MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) ve NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III) algoritmaları kullanılarak çözülmüştür. NSGA-III algoritması, özellikle yüksek boyutlu karar uzaylarında Pareto cephesinin çeşitliliğini koruma, uç çözümleri yakalama ve çözümler arasındaki boşlukları azaltma konusundaki başarısı nedeniyle tercih edilmiştir. MOPSO algoritması ise daha az ayar parametresi gerektirmesi, hızlı yakınsama özelliği ve hesaplama açısından görece daha düşük maliyetli olması nedeniyle optimizasyon sürecinde tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmıştır.

Çalışmanın ön aşamalarında NSGA-II, SPEA2 ve MOEA/D gibi alternatif çok amaçlı optimizasyon algoritmaları da test edilmiştir. Ancak hibrit yenilenebilir–hidrojen sistemleri bağlamında bu yöntemlerin, daha yavaş yakınsama davranışı, Pareto cephesinde belirgin boşluklar oluşması ve parametre ayarlarına yüksek hassasiyet göstermesi gibi nedenlerle nihai analizlerde kullanılmasının uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle, çözüm kalitesi ve hesaplama verimliliği açısından daha dengeli sonuçlar sunan NSGA-III ve MOPSO algoritmalarına odaklanılmıştır.

Geliştirilen bu optimizasyon çerçevesi, fotovoltaik ve rüzgâr türbini boyutlandırması ile elektrolizörün işletme stratejisinin birlikte ele alındığı, saatlik çözünürlükte ve uzun ddikkate değer (20 yıl) simülasyonlara dayanan bütünleşik bir karar destek yapısı sunmaktadır. Bu yapı sayesinde, yeşil hidrojen üretim sistemlerinin hem ekonomik sürdürülebilirliği hem de çevresel tutarlılığı, çok amaçlı bir bakış açısıyla sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmiştir.

#### **3.4.1 Elektrolizör çalışma parametrelerinin optimizasyonu**

Yeşil hidrojen üretim sistemlerinde elektrolizör, yalnızca hidrojen üretim birimi değil; aynı zamanda tüm sistemin enerji verimliliğini, ekonomik performansını ve çevresel bütünlüğünü belirleyen temel alt bileşenlerden biridir. Özellikle PEM elektrolizörlerde çalışma sıcaklığı ve basınç koşulları; hücre gerilimi, elektrokimyasal reaksiyon kinetiği, iyon iletkenliği ve ısı kayıplar üzerinde belirleyici etkilere sahiptir (Carmo et al., 2013b).

Bu çalışmada, elektrolizörün çalışma sıcaklıkları ve katot basıncı gibi temel işletme parametreleri, ana optimizasyon çerçevesinden bağımsız olarak, ayrı bir çok amaçlı optimizasyon problemi kapsamında değerlendirilmiştir. Bu ön optimizasyon aşamasında (Şekil 3.26) amaç, elektrolizörün sistem verimini maksimize ederken elektriksel güç tüketimini minimize eden çalışma bölgelerini belirlemektir. Bu iki hedef fonksiyonu doğası gereği birbiriyle çelişkili olduğundan, problem çok amaçlı optimizasyon perspektifiyle ele alınmıştır. Bu parametreler belirlendikten sonra, optimal elektrolizör parametreleri kullanılarak teknoekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.26:** Elektrolizör çalışma parametrelerinin belirlenmesine yönelik çok amaçlı optimizasyon sürecini gösteren yöntemsel akış diyagramı.

Elektrolizör çalışma parametreleri için oluşturulan bu ön optimizasyon çerçevesinde, parametre uzayı Latin Hiper Küp Örnekleme yöntemi kullanılarak istatistiksel olarak dengeli biçimde taranmış ve her bir parametre kombinasyonu için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinden Pareto optimal çözümler belirlenmiş; böylece verim–güç tüketimi değiş tokuşu açık biçimde ortaya konmuştur. Pareto cephesi üzerinde ayrıca diz noktası (diz point) analizi uygulanarak, küçük verim kazanımlarının güç tüketiminde orantısız artışlara yol açmaya başladığı etkili çalışma noktası tespit edilmiştir. Buna ek olarak, normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış bir skor fonksiyonu kullanılarak tekil bir kombine optimum çalışma noktası da belirlenmiştir. Bu ön optimizasyon sonucunda elde edilen elektrolizör çalışma parametreleri, çalışmanın ilerleyen aşamalarında gerçekleştirilen PV–RT boyutlandırması ve sistem düzeyindeki çok amaçlı optimizasyon için referans işletme koşulları olarak kullanılmıştır. Böylece, ana optimizasyon probleminde elektrolizörün teknik olarak verimsiz veya enerji açısından elverişsiz çalışma bölgelerine sürüklenmesi engellenmiş; sistem düzeyinde elde edilen sonuçların mühendislik

uygulanabilirliği güçlendirilmiştir. Bu yaklaşım, elektrolizör işletme stratejisinin sistem optimizasyonundan tamamen bağımsız ele alınmadığını; aksine, üst seviye ekonomik ve çevresel hedeflerin sağlıklı biçimde optimize edilebilmesi için gerekli bir ön adım olarak kurgulandığını göstermektedir. Bu çalışmada benimsenen iki kademeli optimizasyon yaklaşımı; önce elektrolizörün teknik açıdan dengeli çalışma aralığının belirlenmesi, ardından yenilenebilir enerji sistemleri ve işletme stratejisinin bu teknik çerçeve içinde optimize edilmesi esasına dayanmaktadır.

#### **3.4.1.1 Elektrolizör çalışma parametrelerinin tanımlanması**

Elektrolizör optimizasyonunda dört adet temel işletme parametresi dikkate alınmıştır: Anot giriş sıcaklığı ( $T_{anode}$ ), elektrolizör hücresine giren suyun sıcaklığı, elektrokimyasal reaksiyon hızlarını ve ısı dengesi etkilemektedir. Soğutucu giriş sıcaklığı ( $T_{coolant}$ ), hücre sıcaklığının kontrolü ve termal kararlılık açısından belirleyici bir parametredir. Katot basıncı ( $P_{cat}$ ), hidrojenin çıkış basıncını ve gaz sıkıştırma ihtiyacını etkileyerek sistemin elektriksel yükünü değiştirmektedir. Ortalama çalışma sıcaklığı ( $T_{ope}$ ), membran iyon iletkenliği ve hücre içi kayıplar üzerinde en baskın parametrelerden biridir.

Bu parametreler için tanımlanan alt ve üst sınırlar, PEM elektrolizörlere ilişkin deneysel ve sayısal çalışmalarda önerilen tipik işletme aralıklarına dayandırılmıştır. Literatürde, PEM elektrolizörlerin genellikle 60–80 °C aralığında yüksek verimle çalıştığı; sıcaklığın artmasıyla hücre geriliminin azaldığı, ancak aşırı sıcaklıklarda membran degradasyonunun hızlandığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, katot basıncının artırılması hidrojenin doğrudan yüksek basınçta elde edilmesini sağlasa da, elektriksel güç ihtiyacını artırarak toplam verimi düşürebilmektedir (Carmo et al., 2013a; Millet and Grigoriev, 2019; Schalenbach et al., 2016; Zeng and Zhang, 2010a).

#### **3.4.1.2 Amaç fonksiyonlarının tanımlanması**

Elektrolizör optimizasyonu, birbiriyle çelişen iki temel amaç fonksiyonu üzerinden ele alınmıştır. Bu kapsamda, sistem veriminin ( $eff_{out}$ ) mümkün olduğunca artırılması hedeflenirken, aynı anda elektriksel güç tüketiminin ( $P_{out}$ ) azaltılması amaçlanmıştır. Ancak bu iki hedef arasında doğrudan bir değiş-tokuş (trade-off) ilişkisi bulunmaktadır. Nitekim elektrolizör işletmesinde sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin artırılması genellikle sistem verimini iyileştirirken, aynı koşulların elektriksel güç ihtiyacını da yükselttiği bilinmektedir.

Bu nedenle problem, tek bir hedef fonksiyon ile temsil edilemeyecek bir yapıya sahiptir ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmiştir.

### 3.4.1.3 Parametre uzayının latin hiper küp örnekleme ile taranması

Tanımlanan dört boyutlu parametre uzayı, Latin Hiper Küp Örnekleme (LHS) yöntemi kullanılarak taranmıştır. LHS, her bir parametrenin tanımlanan aralığını eşit olasılıklı alt dilimlere ayırmakta ve bu dilimlerden tekrarsız örnekler seçmektedir. Böylece çok boyutlu problemlerde örneklerin kümelenmesi engellenmekte ve parametre uzayı homojen biçimde temsil edilmektedir (McKay et al., 1979). Bu çalışmada LHS yöntemi kullanılarak 2000 farklı elektrolizör işletme noktası oluşturulmuş ve her bir nokta için sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu veri kümesi, elektrolizörün hem düşük hem de yüksek sıcaklık ve basınç senaryolarındaki davranışını güvenilir biçimde analiz etmeye imkân tanımıştır.

### 3.4.1.4 Pareto analizi ve diz noktasının belirlenmesi

Simülasyon sonuçları kullanılarak Pareto optimal çözümler belirlenmiştir. Pareto analizi, bir çözümün diğer bir çözüm tarafından her iki amaç fonksiyonu açısından da domine edilmediği noktaların seçilmesine dayanmaktadır (Marler and Arora, 2004). Bu çalışmada, Pareto cephesi üzerinde özellikle diz noktası tespit edilmiştir. Diz noktası, Denklem 3.107’de yer alan normalize edilmiş hedef fonksiyonlar kullanılarak tanımlanmıştır (Branke et al., 2004):

$$\eta_n = \frac{\eta - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}, P_n = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (3.107)$$

Ütopya noktasına ( $\eta_n = 1, P_n = 0$ ) olan Öklidyen mesafe (Branke et al., 2004):

$$d = \sqrt{(\eta_n - 1)^2 + (P_n - 0)^2} \quad (3.108)$$

olarak tanımlanmış ve bu mesafeyi minimize eden çözüm diz noktası olarak belirlenmiştir. Bu nokta, mühendislik açısından verim ve güç tüketimi arasında en dengeli çalışma koşulunu temsil etmektedir.

### 3.4.1.5 Ağırlıklı normalizasyon ile tekil optimum nokta seçimi

Pareto cephesi karar vericiye bir çözüm kümesi sunsa da sistem düzeyindeki optimizasyona tekil bir elektrolizör çalışma noktası ile geçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, normalize edilmiş hedef fonksiyonlar eşit ağırlıklar kullanılarak Denklem 3.109 ile birleştirilmiştir (Branke et al., 2004):

$$S = w_n \cdot \eta_n + w_p \cdot (1 - P_n) \quad (3.109)$$

Bu çalışmada  $w_\eta = w_p = 0,5$  olarak seçilmiştir. En yüksek bileşik skoru sağlayan çözüm, kombine optimum elektrolizör çalışma noktası olarak belirlenmiştir.

## 3.4.2 Tekno-ekonomik model için boyut optimizasyonu

### 3.4.2.1 Veri setinin oluşturulması ve ön işleme aşamaları

Bu çalışmada geliştirilen vekil model, hibrit yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemine ait ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü simülasyon sonuçları kullanılarak eğitilmiştir. Her bir simülasyon, fotovoltaik (PV) ve rüzgâr türbini kurulu güçlerinin farklı kombinasyonları altında oluşturulmuş özgün bir sistem konfigürasyonunu temsil etmektedir. Bu kapsamda karar değişkenleri, PV kurulu gücü ( $x_1$ ) ve RT kurulu gücü ( $x_2$ ) olarak tanımlanmış; model çıktıları ise Seviyelendirilmiş Hidrojen Maliyeti (LCOH) ve yenilenebilir enerji payı (RenF) olarak belirlenmiştir.

Her bir vaka çalışması bölgesi için toplam  $N = 2627$  adet simülasyon örneği üretilmiştir. Bu örnek sayısı, karar uzayının yeterli düzeyde temsil edilebilmesi ile saatlik çözünürlükte ve uzun ddikkate değer (20 yıl) tekno-ekonomik simülasyonların yüksek hesaplama maliyeti arasında dengeli bir çözüm sunacak şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan veri kümesi; şebeke ağırlıklı, yenilenebilir kaynak ağırlıklı ve hibrit çalışma rejimlerini kapsayan geniş bir sistem davranış aralığını içermektedir.

Vekil model eğitiminden önce, tüm giriş ve çıkış değişkenleri sayısal kararlılığı artırmak, farklı büyüklük mertebesine sahip değişkenlerin eğitim sürecini olumsuz etkilemesini önlemek ve sinir ağı yakınsama performansını iyileştirmek amacıyla min–maks normalizasyonu kullanılarak  $[0,1]$  aralığına ölçeklendirilmiştir (Heaton, 2017). Normalizasyon işlemi Denklem 3.100 ile ifade edilmektedir:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}}, y_j^{norm} = \frac{y_j - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (3.100)$$

Burada  $x_i^{min}$  ve  $x_i^{max}$ , ilgili giriş değişkeninin veri kümesindeki minimum ve maksimum değerlerini;  $y_j^{min}$  ve  $y_j^{max}$  ise ilgili çıktı değişkeninin alt ve üst sınırlarını temsil etmektedir. Normalizasyon işleminin ardından veri kümesi, tüm karar uzayını temsil edecek şekilde tabakalı hold-out yöntemi kullanılarak rastgele bölünmüştür. Buna göre verilerin %85'i eğitim, %15'i doğrulama amacıyla kullanılmış; buna ek olarak veri kümesinin %10'u tamamen bağımsız bir test seti olarak ayrılmıştır (Kohavi, 2001). Bu yaklaşım sayesinde, geliştirilen vekil modelin genelleme yeteneği eğitim sürecinden bağımsız olarak değerlendirilebilmiş ve aşırı öğrenme riski azaltılmıştır.

### 3.4.2.2 Vekil model geliştirilmesi

- *Vekil model kullanımının gerekçesi*

Hibrit PV–RT–PEM elektrolizör sisteminin yüksek doğruluklu simülasyonu, özellikle saatlik çözünürlükte ve 20 yıllık bir analiz süresi dikkate alındığında (toplam 175 200 zaman adımı), oldukça yüksek bir hesaplama maliyeti gerektirmektedir. Bu tür ayrıntılı bir simülasyon modelinin doğrudan çok amaçlı optimizasyon döngüsüne entegre edilmesi, evrimsel algoritmaların hesaplama süresini pratik olarak kabul edilemez seviyelere taşımaktadır. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, giriş–çıkış ilişkisini yüksek doğrulukla temsil edebilen ve ihmal edilebilir hesaplama maliyeti sunan bir vekil model benimsenmiştir (Forrester and Keane, 2009; Queipo et al., 2005). Vekil model, ayrıntılı simülasyonlardan elde edilen sonuçlara dayanarak sistem davranışını yaklaşık olarak öğrenmekte ve optimizasyon sürecinde doğrudan simülasyon çağrılarının yerini almaktadır. Literatürde Gaussian Process Regression ve Kriging gibi yöntemler vekil modelleme için yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu yöntemlerin binlerce örnek içeren ve karar uzayı geniş olan problemlerde ölçeklenebilirlik açısından sınırlı kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle, güçlü doğrusal olmayan yaklaşım yeteneği, yüksek hesaplama verimliliği ve büyük veri kümeleriyle çalışabilme kapasitesi nedeniyle bu çalışmada yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir vekil model tercih edilmiştir. Geliştirilen vekil model, aşağıda tanımlanan doğrusal olmayan fonksiyonun yaklaşık olarak öğrenilmesini amaçlamaktadır (Forrester and Keane, 2009; Queipo et al., 2005):

$$f: R^2 \rightarrow R^3, f(x_1, x_2) = (LCOH, RenFrac) \quad (3.101)$$

Burada  $x_1$  fotovoltaik kurulu gücünü,  $x_2$  ise RT kurulu gücünü temsil etmektedir. Çıkış değişkenleri, yüksek doğruluklu simülasyon modeli tarafından hesaplanan sistemin teknolojik performans göstergeleri olan LCOH ve RenF değerleridir.

- *Veri normalizasyonu ve ön işleme*

Eğitim sürecinde sayısal kararlılığı artırmak ve farklı büyüklük mertebelerindeki değişkenlerin öğrenme sürecini olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla, tüm giriş ve çıkış değişkenleri min–maks normalizasyonu kullanılarak  $[0,1]$  aralığına ölçeklendirilmiştir. Normalizasyon işlemi Denklem 3.102'ye göre yapılmıştır (Forrester and Keane, 2009; Queipo et al., 2005).

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}}, y_j^{norm} = \frac{y_j - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (3.102)$$

Bu işlem sayesinde tüm değişkenler karşılaştırılabilir büyüklüklere indirgenmiş ve değişkenler arasındaki monoton ilişkiler korunmuştur.

- *Yapay sinir ağı (YSA) mimarisi*

Vekil model, evrensel fonksiyon yaklaşım yeteneğine sahip olması nedeniyle ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcı (MLP) yapısı kullanılarak oluşturulmuştur (Hornik et al., 1989). Yapay sinir ağı mimarisi, üç gizli katmandan oluşmakta olup her bir gizli katmanda 64 nöron bulunmaktadır. Gizli katmanlarda hiperbolik tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır:

$$\sigma(z) = \frac{2}{1 + e^{-2z}} - 1 \quad (3.103)$$

Çıkış katmanında ise tahmin edilen değerlerin ölçeğini koruyabilmek amacıyla doğrusal aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. Ağın ileri besleme süreci aşağıdaki 3.104 ve 3.105'e göre ifade edilir (Hornik et al., 1989):

$$h^{(l)} = \sigma(W^{(l)} \cdot h^{(l-1)} + b^{(l)}), l = 1, 2, 3 \quad (3.104)$$

$$\hat{y} = W^{(out)} \cdot h^{(3)} + b^{(out)} \quad (3.105)$$

Burada  $W^{(l)}$  ve  $b^{(l)}$ ,  $l$ -inci katmana ait ağırlık matrisleri ve bias vektörlerini;  $h^{(0)} = x^{norm}$  ise normalize edilmiş giriş vektörünü temsil etmektedir.

- *Eğitim algoritması ve model eğitimi*

Yapay sinir ağının ağırlıkları, hızlı ve kararlı yakınsama sağlaması nedeniyle Levenberg–Marquardt geri yayılım algoritması kullanılarak optimize edilmiştir (Hagan and Menhaj, 1994). Ağırlık güncelleme ifadesi Denklem 3.106 ile verilmiştir.

$$\Delta w = -(J^T \cdot J + \mu \cdot I)^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (3.106)$$

Burada  $J$  hata terimlerinin ağırlıklara göre türevlerini içeren Jacobian matrisini,  $e$  hata vektörünü,  $\mu$  ise sönümlenme katsayısını ifade etmektedir. Bu yöntem, Gauss–Newton ve gradyan iniş algoritmalarının avantajlarını birleştirerek orta ölçekli ağlar için hızlı ve kararlı bir eğitim süreci sunmaktadır. Eğitim sürecinde amaç fonksiyonu olarak Ortalama Kare Hata (MSE) kullanılmıştır (Hagan and Menhaj, 1994) :

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \| y_i^{norm} - \hat{y}_i^{norm} \|^2 \quad (3.107)$$

Doğrulama hatasının 20 ardışık epok boyunca iyileşmemesi durumunda erken durdurma kriteri uygulanmıştır (Goodfellow et al., 2016).

- *Model performansının değerlendirilmesi*

Vekil modelin performansı, bağımsız test veri kümesi üzerinde Ortalama Mutlak Hata (MAE), Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) ve Belirleme Katsayısı ( $R^2$ ) kullanılarak değerlendirilmiştir (Hastie et al., 2009):

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|, RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}, R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.108)$$

Elde edilen sonuçlar, her iki çıktı değişkeni için  $R^2 > 0.95$  değerlerine ulaşıldığını göstermiştir. Bu bulgu, geliştirilen yapay sinir ağı modelinin yüksek doğrulukta tahmin yeteneğine sahip olduğunu ve çok amaçlı optimizasyon sürecinde ayrıntılı simülasyon modelinin yerine güvenle kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

### 3.4.2.3 Problemin matematiksel tanımı

Eğitilmiş YSA vekil modeli, çok amaçlı optimizasyon çerçevesine entegre edilerek Denklem 3.109 ile tanımlanan bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur:

$$\min_{x \in \Omega} F(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (3.109)$$

Burada karar değişkeni vektörü  $x = (x_1, x_2)$ , şeklinde tanımlanmış olup;  $x_1$  fotovoltaik kurulu gücü (MW),  $x_2$  rüzgâr türbini kurulu gücünü (MW) temsil etmektedir. Amaç fonksiyonları ise Denklem 3.110'de verilmiştir:

$$f_1(x) = LCOH(x), f_2(x) = -RenFrac(x), \quad (3.110)$$

RenF değerinin negatif işaretle tanımlanması, bu büyüklüğün maksimize edilmesi hedefinin matematiksel olarak bir minimizasyon problemine dönüştürülmesini sağlamaktadır. Karar uzayı  $\Omega = [(0,5),10] \times [1,10]$  aralığında tanımlanmıştır. Bu aralıklar, şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji–hidrojen sistemlerinde kullanılan kurulu güç değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir (IRENA, 2020).

Çok amaçlı optimizasyonda, tek bir “en iyi” çözüm yerine Pareto-optimal çözüm kümesinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda,  $x^a$  çözümü  $x^b$  çözümünü, tüm amaç fonksiyonları açısından en az biri daha iyi ve diğerleri en az eşit olmak üzere üstünlük sağladığı durumda domine etmektedir (Hagan and Menhaj, 1994).

$$\forall j \in \{1,2\}, f_j(x^a) \leq f_j(x^b) \wedge \exists j \in \{1,2\}: f_j(x^a) < f_j(x^b) \quad (3.111)$$

Bu tanım doğrultusunda, hiçbir başka çözüm tarafından domine edilmeyen çözümler Pareto cephesini oluşturmaktadır.

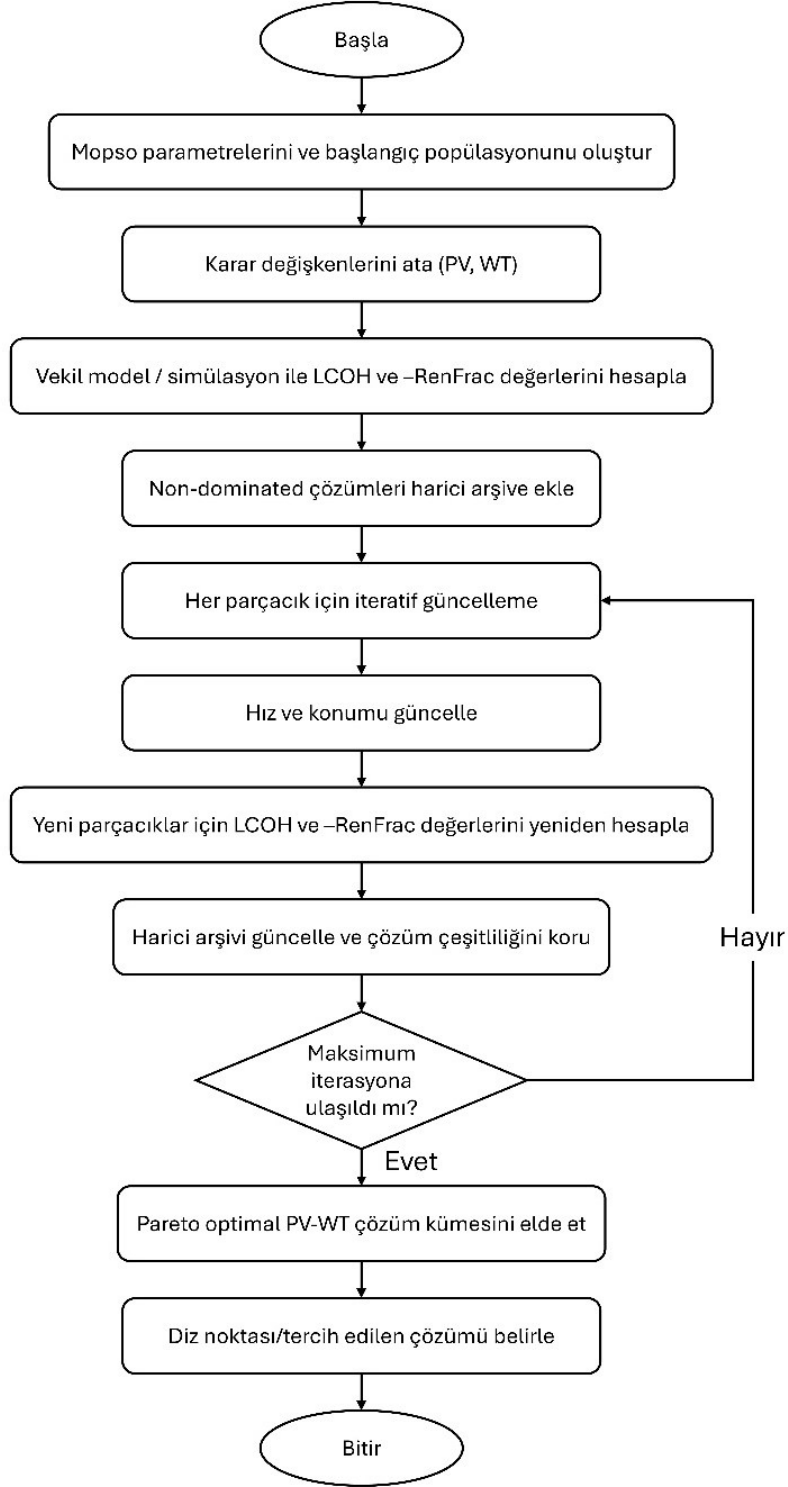
### 3.4.2.4 MOPSO (Multi-objective particle swarm optimization) yöntemi

MOPSO algoritması, klasik Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yönteminin çok amaçlı problemlere uyarlanmış bir uzantısıdır (Kennedy and Eberhart, 1995). Algoritma, karar uzayında hareket eden parçacıkların hız ve konumlarını iteratif olarak güncelleyerek, amaç uzayında birbirini domine etmeyen çözümlerden oluşan bir Pareto çözüm kümesi elde etmeyi amaçlamaktadır. Her bir parçacığın hız ve konum güncellemeleri Denklem 3.112 ve 113'te ifade edilmiştir (Coello et al., 2004):

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g - x_i^t) \quad (3.112)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (3.113)$$

Burada  $p_i$ , parçacığın bireysel en iyi konumunu;  $g$ , harici arşivden seçilen lider çözümü;  $w$ , atalet ağırlığını;  $c_1$  ve  $c_2$ , sırasıyla bilişsel ve sosyal katsayıları;  $r_1, r_2 \in U(0,1)$  ise rassal sayıları temsil etmektedir. Amaç uzayındaki çözüm çeşitliliğini korumak amacıyla, harici arşiv hiperküp yapısına bölünmüş ve lider seçiminde daha seyrek bölgelerde yer alan çözümlere öncelik veren rulet tekerleği mekanizması uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan MOPSO parametreleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir: sürü büyüklüğü 100 parçacık, atalet ağırlığı  $w = 0,5$ , bilişsel katsayı  $c_1 = 1,5$ , sosyal katsayı  $c_2 = 2$ , arşiv kapasitesi 50 çözüm, atalet sönümlenme katsayısı  $w_{damp} = 0,99$ , grid bölme sayısı her bir amaç fonksiyonu için 10 ve seçim basıncı katsayısı  $\beta = 2$  olarak alınmıştır. Bu parametreler, enerji sistemleri alanındaki güncel MOPSO uygulamalarında önerilen aralıklarla uyumludur (Coello et al., 2004; Ming et al., 2017). Bu çalışmada kullanılan MOPSO algoritmasının işlem adımlarını özetleyen akış diyagramı Şekil 3.27’de sunulmuştur.



Şekil 3.27: MOPSO algoritması akış diyagramı.

### 3.4.2.5 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA-III) Yöntemi

NSGA-III algoritması, özellikle çok sayıda amaç fonksiyonuna sahip problemlerde çözüm çeşitliliğini korumak amacıyla geliştirilmiş ileri seviye bir evrimsel optimizasyon

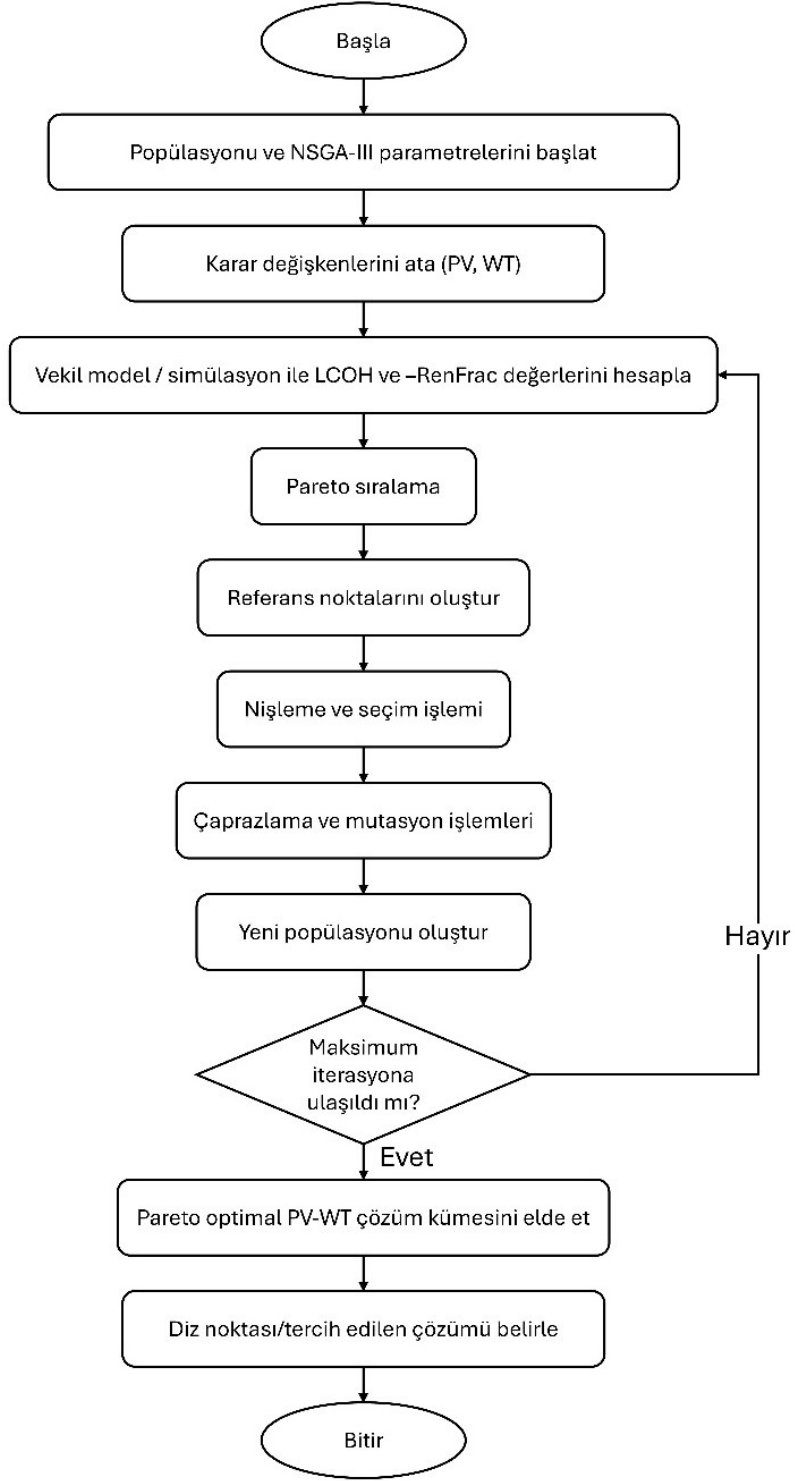
yöntemidir (Deb and Jain, 2014). Bu çalışmada yalnızca iki amaç fonksiyonu bulunmasına rağmen, algoritma referans doğrultuları tabanlı nişleme mekanizması sayesinde Pareto cephesi boyunca dengeli ve homojen bir çözüm dağılımı sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. Algoritma, karar uzayında rastgele oluşturulan bir başlangıç popülasyonu ile başlatılmakta ve bireyler amaç fonksiyonlarına göre değerlendirilmektedir. Yeni çözümler, Simulated Binary Crossover (SBX) ve polinomsal mutasyon operatörleri aracılığıyla üretilmektedir. SBX operatörü ile elde edilen yavru bireyler Denklem 3.124 kullanılarak ifade edilmektedir (Deb and Jain, 2014):

$$c_1 = \frac{1}{2} \cdot [(1 + \beta) \cdot p_1 + (1 - \beta) \cdot p_2], \quad c_2 = \frac{1}{2} \cdot [(1 - \beta) \cdot p_1 + (1 + \beta) \cdot p_2] \quad (3.114)$$

Burada  $p_1$  ve  $p_2$  ebeveyn çözümleri,  $c_1$  ve  $c_2$  ise oluşturulan yavru çözümleri temsil etmektedir. Mutasyon işlemi ise polinomsal mutasyon yaklaşımı ile gerçekleştirilmekte olup, karar değişkenleri aşağıdaki Denklem 3.115'e göre güncellenmektedir (Deb and Jain, 2014):

$$x'_j = x_j + \delta_j \cdot (x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.115)$$

Bu süreç sonucunda elde edilen çözümler, Pareto üstünlük ilişkisine göre non-dominated sıralama işlemine tabi tutulmakta ve çözümler farklı Pareto seviyelerine ayrılmaktadır. NSGA-III algoritmasının temel farkı, çözüm çeşitliliğini korumak amacıyla kullanılan referans doğrultuları tabanlı nişleme mekanizmasıdır. Bu yaklaşımda çözümler, amaç uzayında tanımlanan referans doğrultularına olan dik uzaklıklarına göre ilişkilendirilmekte ve seçim işlemi bu doğrultular üzerinden gerçekleştirilmektedir. Böylece Pareto cephesi boyunca dengeli bir dağılım sağlanmakta ve çözümlerin belirli bölgelerde yoğunlaşması engellenmektedir. Bu çalışmada popülasyon büyüklüğü 100, çaprazlama olasılığı  $p_c = 0,9$ , mutasyon olasılığı  $p_m = 0,5$  ve referans doğrultu sayısı 16 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan NSGA-III algoritmasının işlem adımlarını özetleyen akış diyagramı Şekil 3.28'de sunulmuştur.



Şekil 3.28: NSGA-III algoritması akış diyagramı.

### 3.4.2.6 Pareto cephesi analizi ve karar verme

MOPSO ve NSGA-III algoritmaları ile gerçekleştirilen işlemler sonucunda her iki yöntem için ayrı Pareto cepheleri elde edilmiştir. Uygulamada tek bir tasarım konfigürasyonunun

seçilmesi gerektiğinden, Pareto çözümleri arasından En İyi Uzlaşık Çözüm (BCS) belirlenmiştir. Bu amaçla Ütopya Noktasına En Yakınlık yöntemi kullanılmıştır (Miettinen, 1998).

- *Ütopya noktasına en yakınlık yöntemi*

BCS belirleme sürecinde ütopya Noktasına En Yakınlık yöntemi tercih edilmiştir. Ütopya noktası, her bir amaç fonksiyonunun Pareto kümesi içerisindeki en iyi değerlerinden oluşan ideal noktayı temsil etmektedir (Deb, 2001):

$$z^* = (\min f_1(x), \min f_2(x)) \quad (3.116)$$

Pareto çözümleri, Denklem 3.117’de verilen min–maks normalizasyonu ile ölçeklendirilmiştir (Deb, 2001):

$$f_j^{norm}(x) = \frac{f_j(x) - f_j^{min}}{f_j^{max} - f_j^{min}}, j = 1,2 \quad (3.117)$$

Her bir çözümün ütopya noktasına olan Öklidyen uzaklığı ise Denklem 3.118 kullanılarak hesaplanmıştır (Deb, 2001):

$$d(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (f_j^{norm}(x))^2} \quad (3.118)$$

En küçük  $d(x)$  değerine sahip çözüm, ekonomik performans (LCOH) ile çevresel performans (RenF) arasında dengeli bir ödünleşim sunduğundan BCS olarak seçilmiştir.

- *Yerel kararlılık göstergesi: k-en yakın komşu (kNN) yoğunluğu*

BCS seçiminin yalnızca ideal noktaya uzaklık üzerinden yapılması, çözümün Pareto uzayındaki yerel yapısını göz ardı edebilir. Bu nedenle her bir BCS çözümünün bulunduğu bölgedeki çözüm yoğunluğu ayrıca değerlendirilmiştir. Bu amaçla k-en yakın komşu (kNN) temelli bir yoğunluk ölçütü kullanılmıştır. kNN yoğunluğu Denklem 3.119 ile tanımlanmıştır (Tan et al., 2019):

$$kNN(x_i) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k d(x_i, x_{(j)}) \quad (3.119)$$

Burada  $x_{(j)}$ , çözüm  $x_i$ 'nin Pareto kümesindeki  $j$ 'inci en yakın komşusunu,  $d(\cdot)$  normalize edilmiş amaç uzayındaki Öklidyen mesafeyi ve  $k$ komşu sayısını ifade etmektedir. Düşük kNN değeri, çözümün daha yoğun ve kompakt bir Pareto bölgesinde yer aldığını; yüksek kNN değeri ise çözümün daha seyrek ve izole bir bölgede konumlandığını göstermektedir. Bu metrik, çözümün yerel kararlılığı ve parametrik değişimlere karşı tolerans potansiyeli hakkında nicel bilgi sağlamaktadır.

- *Küresel pareto kalite metrikleri*

Algoritmaların yalnızca tekil bir BCS çözümü üzerinden değil, tüm Pareto kümesinin kalitesi üzerinden karşılaştırılabilmesi amacıyla üç küresel kalite metriği kullanılmıştır: Hypervolume (HV), Spacing ( $\Delta$ ) ve Ortalama Ütopya Mesafesi.

### 1. Hiperhacim (HV) metriği

Hypervolume metriği, Pareto cephesinin referans noktaya göre kapsadığı hacmi ölçmektedir. İki amaçlı minimizasyon problemi için HV Denklem 3.120 ile ifade edilir (Zitzler and Thiele, 1998):

$$HV = \lambda \cdot \left( \bigcup_{x \in PF} [f_1(x), r_1] \times [f_2(x), r_2] \right) \quad (3.120)$$

Burada  $r = (r_1, r_2)$ , Pareto kümesindeki tüm çözümlerden daha kötü bir referans noktayı;  $\lambda$  ise Lebesgue ölçüsünü temsil etmektedir. HV değeri arttıkça Pareto cephesinin hem yakınsama hem de yayılım performansı iyileşmektedir.

### 2. Dağılım homojenliği metriği ( $\Delta$ )

Spacing metriği, Pareto çözümleri arasındaki dağılım homojenliğini ölçmektedir (Schott, 2005):

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2} \quad (3.121)$$

Burada  $d_i$ , komşu çözümler arasındaki mesafeyi,  $\bar{d}$  ise ortalama mesafeyi temsil etmektedir. Düşük  $\Delta$  değerleri, daha homojen bir çözüm dağılımına karşılık gelmektedir.

### 3. Ortalama ütopya mesafesi

Pareto kümesinin genel yakınsama kalitesini değerlendirmek amacıyla, tüm çözümlerin normalize edilmiş utopia noktasına ortalama uzaklığı hesaplanmıştır (Zhang et al., 2025):

$$\bar{d}_{utopia} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N d(x_i) \quad (3.122)$$

Bu metrik, Pareto cephesinin ideal noktaya olan genel yakınlığını temsil etmektedir. Bu yaklaşım sayesinde çok amaçlı optimizasyon sonuçları iki farklı düzeyde değerlendirilmiştir. İlk olarak, BCS ve kNN yöntemleri kullanılarak yerel karar analizi gerçekleştirilmiş; ikinci olarak ise hiperhacim (HV), yayılım ( $\Delta$ ) ve ortalama ütopya mesafesi gibi göstergeler aracılığıyla küresel Pareto kalite analizi yapılmıştır. Bu çift katmanlı değerlendirme yapısı, algoritmaların yalnızca tek bir tasarım noktasındaki performansını değil, aynı zamanda tüm çözüm kümesinin dağılımını ve yapısal özelliklerini de kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde incelemeye imkân sağlamaktadır.

## 4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmanın yöntemsel çerçevesi doğrultusunda elde edilen mekânsal, teknik ve ekonomik bulgular bütüncül bir yapı içerisinde sunulmuştur. İlk olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretim tesisleri için Balıkesir ili özelinde gerçekleştirilen CBS tabanlı çok kriterli yer seçimi analizinin sonuçları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda dışlama analizi sonrasında elde edilen planlama birimlerinin istatistiksel özellikleri, kriter dağılımları, kriterler arası ilişkiler, ağırlıklandırma sonuçları ve farklı ÇKKV yöntemleriyle üretilen uygunluk sıralamaları incelenmiştir. Ayrıca yöntemler arası tutarlılık, sıralama kararlılığı ve mekânsal uygunluk yapısı değerlendirilerek, yer seçimi sonuçlarının yalnızca tek bir yönetime bağlı olmayan daha güvenilir bir karar zemini üzerinde yorumlanması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında, hibrit yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sisteminin tekno-ekonomik performansı ele alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle sistemin uygun boyutlandırılması amacıyla optimizasyon tabanlı bir analiz gerçekleştirilmiş; farklı yenilenebilir enerji karakteristiklerini temsil eden Bandırma, Çeşme ve Mersin lokasyonları kullanılarak optimizasyon yöntemlerinin performansı sınanmıştır. Böylece güçlü rüzgâr potansiyeline sahip, güneş ağırlıklı veya hibrit kaynak yapısı daha dengeli olan bölgelerde PV ve rüzgâr türbini boyutlarının LCOH ve yenilenebilir enerji oranı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ardından seçilen sistem yapısı için saatlik güneş ve rüzgâr kaynak profilleri, PEM elektrolizörün kısmi yük davranışı, işletme parametrelerinin etkisi, LCOH–yenilenebilir enerji oranı ilişkisi ve temel ekonomik performans göstergeleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bunun yanında ölçek etkileri, elektrolizör dur-kalk stratejileri, su kaynağı seçimi, hidrojen depolama alternatifleri, satış fiyatına bağlı ekonomik performans ve politika duyarlılığı incelenerek sistemin farklı teknik ve ekonomik koşullar altındaki davranışı ortaya konmuştur. Bu yapı sayesinde bulgular, yer seçimi aşamasından başlayarak sistem boyutlandırması, işletme stratejisi, maliyet yapısı ve yatırım uygulanabilirliğine kadar uzanan bütüncül bir tekno-ekonomik değerlendirme sunmaktadır.

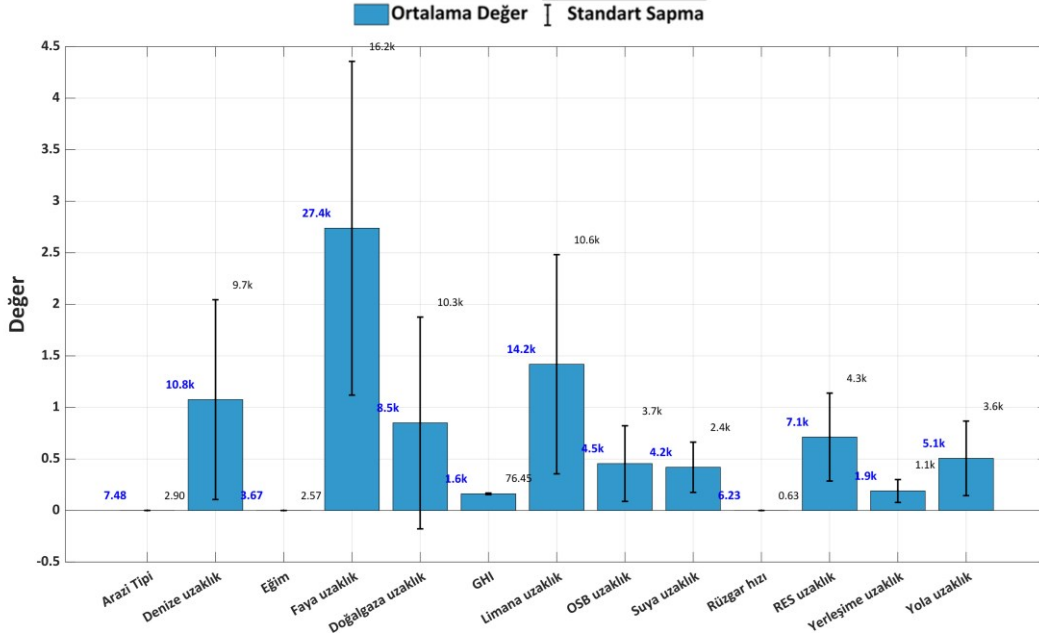
### 4.1 Yeşil Hidrojen Tesisleri İçin Yer Seçimi Bulguları

Bu bölümde, Balıkesir ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenen yeşil hidrojen üretim tesisleri için gerçekleştirilen mekânsal karar verme analizinin sonuçları sunulmuştur. Analiz süreci, CBS ortamında uygulanan dışlama analizleri ile başlamış; istatistiksel

değerlendirmeler, kriterler arası ilişkilerin incelenmesi, kriter ağırlıklandırma yöntemleri ve ÇKKV sonuçlarının karşılaştırılması ile devam etmiştir.

#### **4.1.1 Mekânsal kriterlerin istatistiksel özellikleri**

Mekânsal karar verme analizine geçilmeden önce dışlama analizinin yapılması, çalışma alanının hidrojen üretim tesisi kurulumu açısından gerçekten değerlendirilebilir bölgelerle sınırlandırılmasını sağlamıştır. Bu aşamada yerleşim alanları, koruma statüsündeki bölgeler, uygun olmayan arazi kullanımları, yüksek eğimli alanlar ve yenilenebilir enerji potansiyeli bakımından yetersiz kalan bölgeler analiz dışında bırakılmıştır. Böylece çok kriterli değerlendirme süreci, yalnızca teknik, çevresel ve planlama açısından uygulanabilir nitelik taşıyan 10 ha büyüklüğündeki planlama birimleri üzerinden yürütülmüştür. Bu yaklaşım, enerji potansiyeli yüksek olsa bile tesis kurulumu açısından uygun olmayan alanların nihai uygunluk analizinde avantajlı görünmesini engellemiş ve karar modelinin daha gerçekçi, güvenilir ve uygulanabilir bir yapıya kavuşmasına katkı sağlamıştır. Şekil 4.1, dışlama analizi sonucunda elde edilen 4795 adet 10 ha büyüklüğündeki planlama birimi kapsamında değerlendirilen 13 mekânsal kritere ait temel betimleyici istatistikleri göstermektedir. Buna göre, ortalama değerler sütun grafiği ile, standart sapmalar ise hata çubukları ile gösterilerek hem merkezi eğilim hem de dağılım genişliği eş zamanlı olarak ortaya konmuştur. Bu gösterim, kriterlerin yalnızca temsil değerlerini değil, mekânsal heterojenlik düzeylerini de nicel olarak değerlendirmeye imkân tanımaktadır.



**Şekil 4.1:** Mekânsal değerlendirme kriterlerinin 10 ha planlama birimleri bazında ortalama değerleri ve standart sapmaları.

Arazi tipi kriterinde ortalama 7,48 ve standart sapma  $\pm 2,90$  olarak hesaplanmıştır. Bu durum, dışlama süreci sonrasında belirli arazi sınıflarının baskın olduğunu, ancak sınıflar arası dağılımın tamamen tek tip hale gelmediğini göstermektedir. Eğim kriterinde ortalama 3,67 ve standart sapma  $\pm 2,57$ 'dir; ortalamanın görece düşük olması topoğrafik olarak uygun alanların ağır bastığını, standart sapmanın nispeten yüksek kalması mekânsal çeşitliliğin halen korunduğunu göstermektedir.

Arazi tipi ve eğim kriterlerine kıyasla mesafe temelli kriterlerde heterojenlik daha belirgindir. Denize uzaklık ortalama 10,8 km ve standart sapma  $\pm 9,7$  km; fay hattına uzaklık ortalama 27,4 km ve standart sapma  $\pm 16,2$  km; doğalgaz şebekesine uzaklık ortalama 8,5 km ve standart sapma 10.3 km olarak hesaplanmıştır. Özellikle doğalgaz şebekesine uzaklıkta standart sapmanın ortalamayı aşması, altyapı erişilebilirliğinin yüksek mekânsal ayrışma içerdiğini göstermektedir. Limana uzaklık ( $14,2 \pm 10,6$  km), OSB'ye uzaklık ( $4,5 \pm 3,7$  km) ve yola uzaklık ( $5,1 \pm 3,6$  km) değerleri de altyapı temelli kriterlerde geniş dağılım aralıklarına işaret etmektedir.

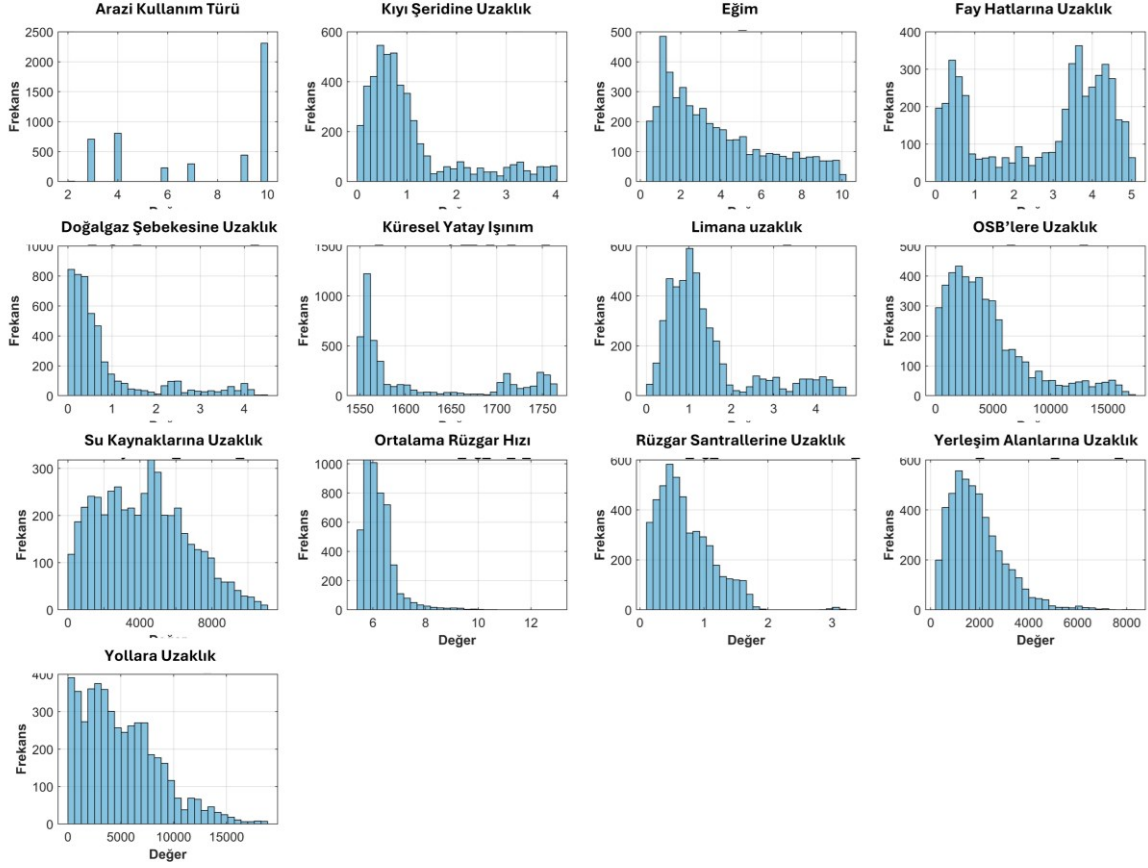
Enerji potansiyeline ilişkin kriterlerde ise daha dengeli bir yapı gözlenmiştir. GHI ortalama 1,6 ve standart sapma 0,76; rüzgâr hızı ortalama 6,23 m/s ve standart sapma 0,63 m/s olarak

belirlenmiştir. Özellikle rüzgâr hızındaki düşük standart sapma, çalışma alanında rüzgâr potansiyelinin görece homojen bir mekânsal karakter sergilediğini ortaya koymaktadır.

Görelî değişkenlik analizi ( $CV = \sigma/\mu$ ), kriterler arasındaki heterojenlik düzeyini daha açık biçimde ortaya koymuştur. Doğalgaz şebekesine uzaklıkta  $CV \approx 1,21$  ile en yüksek değer elde edilirken, denize uzaklıkta  $CV \approx 0,90$  ve OSB'ye uzaklıkta  $CV \approx 0,82$  hesaplanmıştır. Buna karşılık rüzgâr hızında  $CV \approx 0,10$  ile en düşük görelî değişkenlik gözlenmiştir. Bu bulgular, mekânsal ayrışmanın ağırlıklı olarak altyapı ve erişilebilirlik kriterleri üzerinden şekillendiğini, enerji potansiyeline dayalı kriterlerin ise daha homojen bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Elde edilen bu yapı, Entropi temelli ağırlıklandırma yaklaşımının teorik beklentileriyle uyumludur; zira varyansı yüksek olan kriterlerin daha fazla bilgi içeriği taşıdığı ve dolayısıyla daha yüksek ağırlık alması beklenmektedir.

#### **4.1.2 Kriter dağılımları ve mekânsal ayrışma**

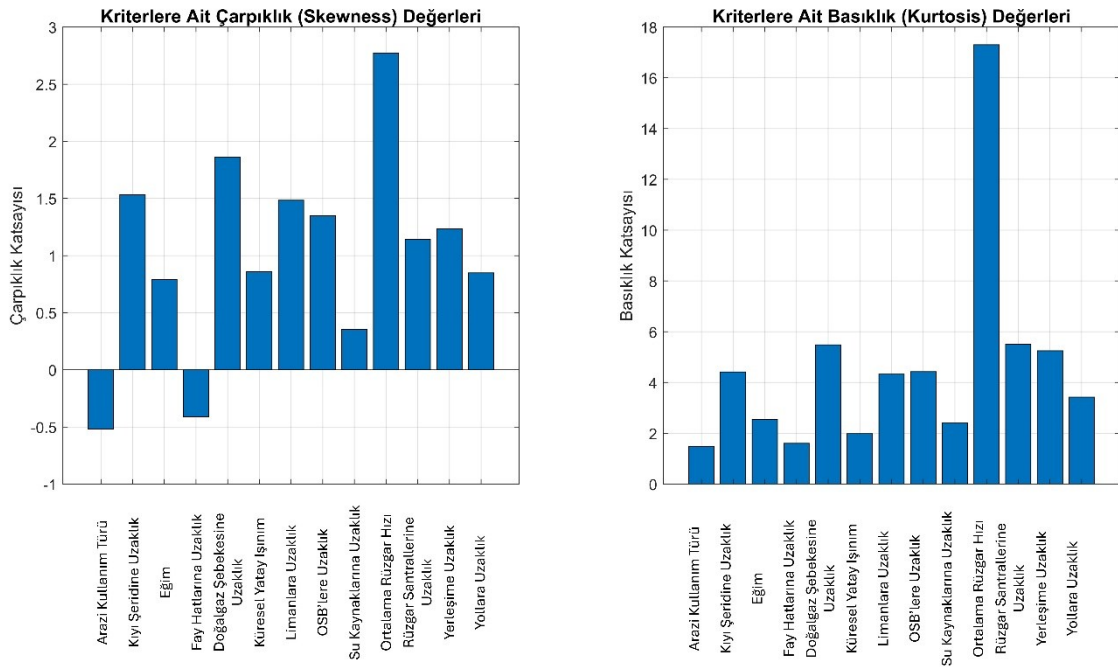
Betimleyici istatistiklerin ötesinde, kriterlerin dağılım biçimleri histogramlar aracılığıyla incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.2'de sunulmuştur. Histogramlar, kriterlerin dikkate değer bir bölümünde simetrik olmayan dağılım yapısı bulunduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.2:** Çok kriterli karar verme analizinde kullanılan mekânsal değişkenlerin dağılım karakteristikleri (ham veri histogramları).

Doğalgaz şebekesine uzaklık, OSB'ye uzaklık, yerleşime uzaklık ve yola uzaklık kriterlerinde düşük mesafe aralıklarında yoğunlaşma, yüksek mesafelerde ise azalan frekans gözlenmektedir. Bu sağa çarpık yapı, altyapıya yakın alanların sayısal olarak baskın, periferik alanların ise sınırlı olduğunu göstermektedir. Fay hattına uzaklık ve limana uzaklık kriterleri daha geniş bir dağılım aralığına sahip olmakla birlikte yine pozitif çarpıklık göstermektedir. Çarpıklık katsayıları Şekil 4.3'te sunulmuştur. Ortalama rüzgâr hızında çarpıklık  $\approx 2,7$  ile en yüksek pozitif değer elde edilmiştir; bu durum düşük rüzgâr hızlarının yoğunlaştığını ve yüksek değerlerin nispeten nadir olduğunu göstermektedir. Doğalgaz

şebekesine uzaklıkta çarpıklık  $\approx 1,8$  ve kıyı şeridine uzaklıkta  $\approx 1,5$  olarak hesaplanmıştır. Arazi tipi kriteri ise  $\approx -0,5$  ile hafif negatif çarpıklık sergilemektedir.

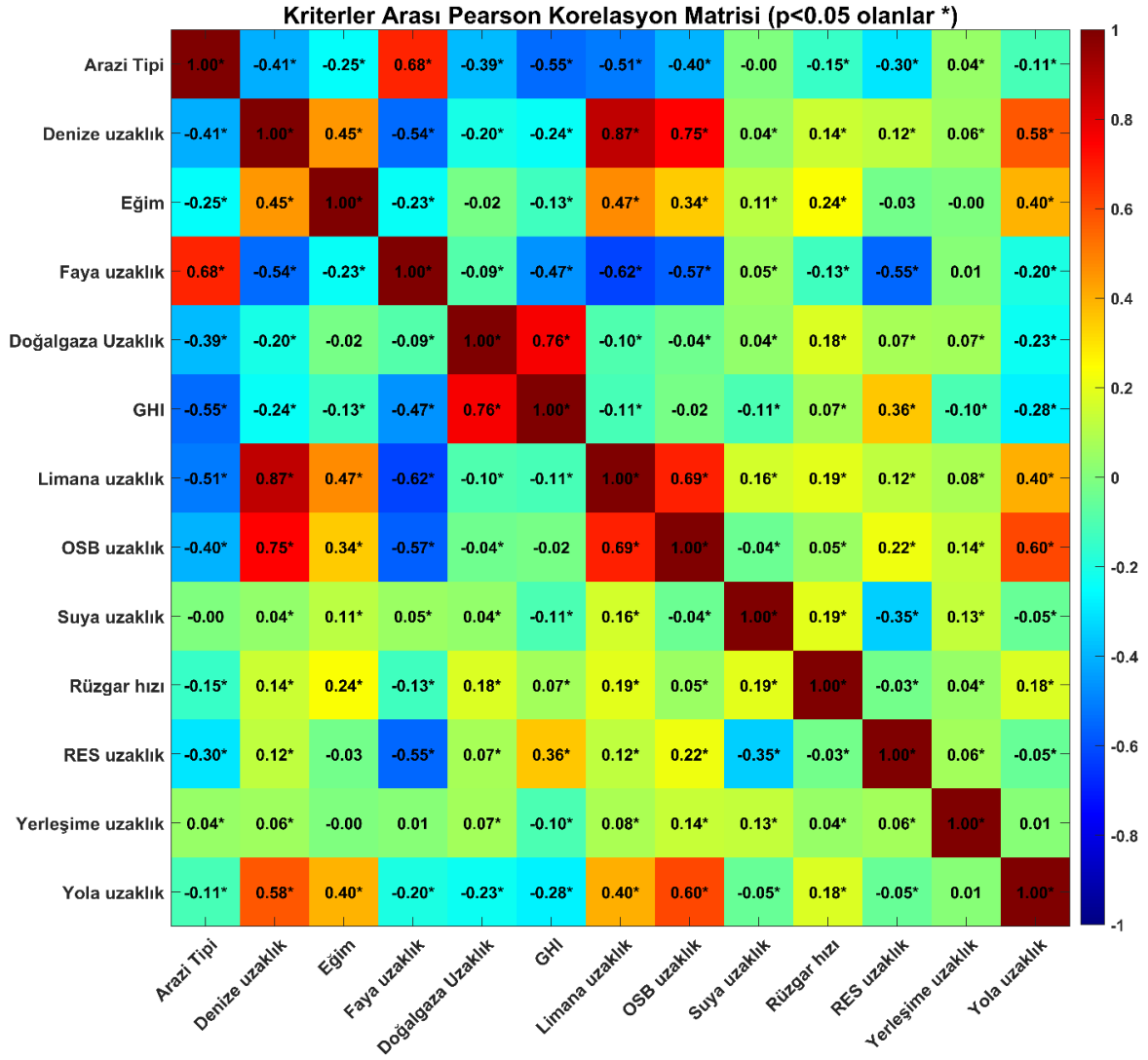


**Şekil 4.3:** Kriterlerin çarpıklık ve basıklık değerlerinin karşılaştırılması.

Basıklık analizine göre, RES'e uzaklık kriteri için hesaplanan değer ( $\approx 17$ ), verilerin büyük bir kısmının dar bir aralıkta toplandığını, ancak aynı zamanda belirgin uç değerlerin de bulunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, GHI ( $\approx 5,5$ ), yerleşime uzaklık ( $\approx 5,3$ ) ve OSB'ye uzaklık ( $\approx 4,4$ ) kriterlerinde de verilerin normal dağılımdan sapma gösterdiği ve uç değerlerin etkili olduğu görülmektedir. Bu bulgular, bazı kriterlerde dağılımın dengeli olmadığını ve mekânsal farklılıkların belirli bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu tür dağılım yapıları, lineer normalizasyon yöntemlerinin doğrudan uygulanması durumunda uç değerlerin karar modelini gereğinden fazla etkilemesine neden olabilir. Bu nedenle, karar modeline dahil edilmeden önce verilerin uygun ölçekleme veya dönüşüm yöntemleri ile düzenlenmesi gerekmektedir.

#### 4.1.3 Kriterler arası ilişkilerin değerlendirilmesi

Kriterler arasındaki doğrusal ilişkiler Pearson korelasyon analizi ile incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.4'te ısı haritası formatında sunulmuştur. Şekilde yalnızca  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlı ilişkiler yıldız (\*) ile işaretlenmiştir.



**Şekil 4.4:** Mekânsal karar verme modelinde kullanılan kriterler arasındaki doğrusal bağımlılıkların Pearson korelasyon katsayıları ile incelenmesi.

Denize uzaklık ile limana uzaklık arasında  $r = 0,87$  düzeyinde güçlü pozitif ilişki belirlenmiştir. Denize uzaklık ile OSB'ye uzaklık arasında  $r = 0,75$ ; limana uzaklık ile OSB'ye uzaklık arasında  $r = 0,69$  değerleri elde edilmiştir. Bu bulgular, kıyı ve sanayi altyapısının mekânsal olarak aynı doğrultuda konumlandığını göstermektedir. Doğalgaz şebekesine uzaklık ile GHI arasındaki  $r = 0,76$ 'lık ilişki, yüksek güneş potansiyeline sahip alanların çoğunlukla altyapıdan uzak konumlandığını ortaya koymaktadır.

Negatif ilişkiler incelendiğinde arazi tipi ile fay hattına uzaklık arasında  $r = -0,68$ ; fay hattına uzaklık ile limana uzaklık arasında  $r = -0,62$ ; fay hattına uzaklık ile OSB'ye uzaklık arasında  $r = -0,57$  değerleri hesaplanmıştır. Bu ilişkiler, bazı sanayi ve kıyı alanlarının jeolojik risk zonlarıyla mekânsal etkileşim içinde olduğunu düşündürmektedir.

Rüzgâr hızının diğer kriterlerle düşük korelasyon değerleri göstermesi ( $|r| < 0,25$ ), bu değişkenin mekânsal olarak daha bağımsız bir bilgi katkısı sağladığını göstermektedir. Buna karşılık mesafe temelli kriterler arasında yüksek korelasyon varlığı, belirli kriter gruplarında mekânsal birlikte hareket etme eğilimi bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, veri setinin hem yüksek ayırt edicilik kapasitesine hem de belirli kriter kümeleri arasında yapısal bağımlılıklara sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, ağırlıklandırma sonuçlarının yorumlanmasında dikkate alınması gereken bir parametre olmakla birlikte, Entropi yaklaşımının varyans temelli yapısı nedeniyle doğrudan metodolojik bir sorun teşkil etmemektedir. Ancak uzman temelli yöntemlerde bu korelasyon yapısının analitik biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir.

#### **4.1.4 İstatistiksel sağlamlık ve model geçerliliği**

Yukarıda sunulan betimleyici istatistikler, dağılım analizleri ve korelasyon bulguları birlikte değerlendirildiğinde, veri setinin çok kriterli karar verme modeline uygun bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Kriterlerin tamamı anlamlı düzeyde varyasyon göstermekte olup, varyasyon katsayısı sonuçları hem düşük hem de yüksek ayrıştırıcılık kapasitesine sahip değişkenlerin aynı veri seti içinde yer aldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, karar modelinin tek tip bir değişken yapısına dayanmadığını ve farklı ölçeklerde bilgi içeriği barındırdığını göstermektedir.

Dağılım analizleri, özellikle mesafe temelli kriterlerde normal dağılım varsayımından sapmalar bulunduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte çalışmada kullanılan Entropi ve Bulanık AHP yaklaşımları parametrik dağılım varsayımlarına dayanmadığından, bu durum metodolojik bir kısıt oluşturmamaktadır. Ancak çarpıklık ve basıklık değerleri, normalizasyon aşamasında uygun ölçekleme tekniklerinin seçilmesinin önemini artırmaktadır. Bu nedenle kriterler karar modeline aktarılmadan önce normalize edilerek birim farklılıkları ve uç değer etkileri kontrol altına alınmıştır.

Korelasyon analizi, bazı altyapı temelli kriterlerin mekânsal olarak birlikte hareket ettiğini göstermiştir. Bu durum veri setinde yapısal bağımlılıkların varlığına işaret etmekle birlikte, bir tutarsızlık değil, çalışma alanının mekânsal gerçekliğinin yansımasıdır. Buna karşılık enerji potansiyeli kriterlerinin diğer değişkenlerle düşük korelasyon göstermesi, model

içerisinde bağımsız bilgi katkısı sağlayan boyutların da bulunduğunu ortaya koymaktadır. Böylece kriter seti ne tamamen bağımlı ne de tamamen bağımsız bir yapı sergilemekte; gerçek mekânsal sistemin çok boyutlu karakterini yansıtmaktadır.

Ayrıca tüm kriterlerin ölçülebilir ve karşılaştırılabilir nicel metriklere dönüştürülmüş olması, model girdileri arasında boyutsal uyumsuzluk riskini ortadan kaldırmaktadır. Uygulanan normalizasyon süreci sayesinde farklı birimlere sahip değişkenler ortak bir ölçeğe taşınmış ve ağırlıklandırma aşamasında sistematik sapma oluşması engellenmiştir.

Bu değerlendirmeler birlikte ele alındığında veri seti;

- (i) yeterli ayırtıcılık kapasitesine sahip,
- (ii) dağılım özellikleri analiz edilmiş,
- (iii) kriterler arası ilişkileri nicel olarak ortaya konmuş,
- (iv) modelin teorik çerçevesiyle uyumlu bir yapı sunmaktadır.

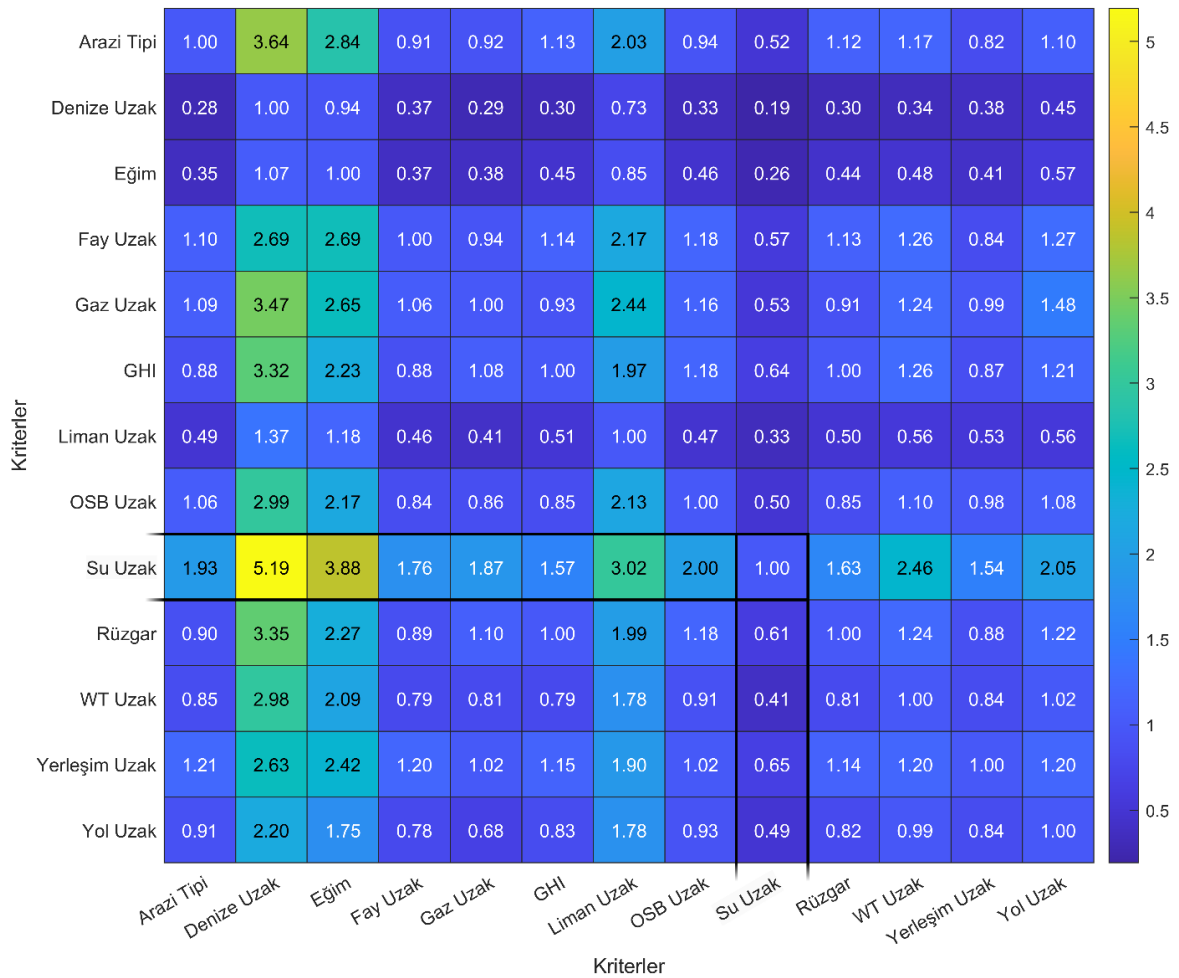
Dolayısıyla çok kriterli karar verme sürecine geçiş, yalnızca teknik bir uygulama değil, istatistiksel olarak temellendirilmiş bir aşamaya dayanmaktadır. Bu çerçeve, izleyen Entropi, Bulanık AHP ve hibrit ağırlıklandırma sonuçlarının sağlam bir veri yapısı üzerinde üretildiğini göstermektedir.

#### **4.1.5 Ağırlıklandırma–ÇKKV sonuçları ve kararlılık analizi**

Dışlama analizi sonrasında elde edilen 4795 adet aday planlama biriminin çok kriterli karar verme yöntemleriyle sıralanabilmesi için, karar modelinde yer alan 13 kriterin görece önem düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak mekânsal yer seçimi problemlerinde kriter ağırlıkları yalnızca tek bir yaklaşım temelinde belirlendiğinde, sonuçlar ya tamamen uzman yargısına dayalı öznel bir yapıya, ya da yalnızca verinin içsel dağılımına dayalı mekanik bir yapıya indirgenebilmektedir. Bu durum özellikle yüksek varyanslı altyapı kriterleri ile görece homojen enerji potansiyeli kriterleri arasında dengesizlik yaratma riski taşımaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kriter ağırlıkları üç farklı perspektiften ele alınmıştır: (i) uzman görüşlerini temsil eden Bulanık AHP (FAHP), (ii) kriterlerin alternatifleri ayırt etme gücünü veri temelli ölçen Entropi yöntemi ve (iii) her iki yaklaşımı dengeleyen Hibrit (FAHP–Entropi) yaklaşımı. Böylece karar modelinin hem teknik sezgi hem de istatistiksel ayırma kapasitesi açısından dengeli bir temele oturtulması hedeflenmiştir.

#### 4.1.6 Uzman görüşlerine dayalı FAHP ikili karşılaştırma yapısı

Kriterlerin göreceli öneminin uzman perspektifinden ortaya konulabilmesi amacıyla, enerji sistemleri, mekânsal planlama ve altyapı yatırımları alanlarında deneyimli 7 uzmandan elde edilen ikili karşılaştırmalar Bulanık AHP çerçevesinde değerlendirilmiştir. Uzman değerlendirmeleri üçgensel bulanık sayılar (l, m, u) biçiminde toplanmış; her kriter çifti için geometrik ortalama alınarak birleşik bulanık değerler elde edilmiştir. Şekil 4.5'te bu birleşik yapının merkezi (m) değerleri üzerinden oluşturulan 13×13 boyutlu ikili karşılaştırma matrisi ısı haritası biçiminde sunulmaktadır.



Şekil 4.5: FAHP yöntemi göreceli önem matrisi.

Isı haritası incelendiğinde, uzmanların özellikle altyapı ve kaynak erişimi temelli kriterlere belirgin bir önem attığı görülmektedir. Örneğin su kaynaklarına uzaklık kriterinin kıyı çizgisine uzaklık karşısındaki göreceli üstünlüğü  $m = 5,19$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer, uzmanlar açısından suya erişimin yalnızca lojistik değil, operasyonel sürdürülebilirlik açısından da etkili bir belirleyici olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde suya uzaklık

kriteri eğime karşı  $m = 3,88$  ve limana uzaklığa karşı  $m = 3,02$  değerleri ile daha dikkate değer değerlendirilmiştir.

Doğal gaz şebekesine uzaklık kriteri, kıyı çizgisine uzaklık karşısında  $m = 3,47$  ve eğime karşı  $m = 2,65$  düzeyinde daha yüksek önem almıştır. Bu durum, mevcut enerji altyapısına entegrasyonun uzman algısında öncelikli bir faktör olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Sanayi bölgelerine uzaklık kriterinin de kıyı mesafesine karşı  $m = 2,99$  ve eğime karşı  $m = 2,17$  değerleri ile daha baskın çıkması, yatırımın endüstriyel entegrasyon kapasitesinin lojistik yakınlıktan daha belirleyici görüldüğünü göstermektedir.

Enerji potansiyeli kriterleri olan GHI ve rüzgâr hızı, çoğu karşılaştırmada 1–3 aralığında görece üstünlük değerleri üretmiştir. Örneğin GHI'nin kıyı çizgisine uzaklığa karşı  $m = 3,32$ , eğime karşı  $m = 2,23$  olarak değerlendirilmesi; rüzgâr hızının kıyı mesafesine karşı  $m = 3,35$  değerine sahip olması, yenilenebilir enerji potansiyelinin uzmanlar tarafından ihmal edilmediğini, ancak altyapı kriterleriyle birlikte dengeli biçimde ele alındığını göstermektedir.

Genel olarak matris yapısı üç ana önem kümesini ortaya koymaktadır: (i) su, gaz şebekesi ve sanayi bağlantısı gibi altyapı temelli kriterler, (ii) GHI ve rüzgâr gibi enerji potansiyeli kriterleri ve (iii) eğim ile arazi kullanım türü gibi fiziksel uygunluk kriterleri. Bu yapı, önceki bölümlerde ortaya konulan varyasyon katsayısı ve korelasyon analizleriyle tutarlıdır. Özellikle yüksek görece değişkenliğe sahip doğal gaz şebekesine uzaklık ( $CV \approx 1,21$ ) kriterinin uzman değerlendirmelerinde de güçlü bir konumda yer alması, veri temelli ayrışma ile uzman sezgisinin tamamen kopuk olmadığını göstermektedir.

#### **4.1.7 Kriter ağırlıklarının farklı yöntemlerle hesaplanması ve karşılaştırılması**

FAHP sonuçlarının ardından kriter ağırlıkları Entropi ve Hibrit yöntemlerle de hesaplanmış; elde edilen değerler Tablo 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Üç yöntem arasındaki farklar, veri varyasyonu ile uzman algısının karar modelini nasıl farklı yönlendirebildiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.1:** Entropi, Bulanık AHP ve Hibrit yöntemler kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları.

NO	KRİTER	ENTROPİ	BULANIK AHP	HİBRİT
1	Arazi Kullanım Türü	0,029962	0,1315	0,080731
2	Kıyı Çizgisine Uzaklık	0,123442	0,0299	0,076671
3	Eğim	0,090045	0,0823	0,086173
4	Fay Hatlarına Uzaklık	0,078917	0,1291	0,104009
5	Doğal Gaz Şebekesine Uzaklık	0,203028	0,0404	0,121714
6	Yatay Küresel Güneş Işınımı (GHI)	0,000394	0,1213	0,060847
7	Limana Uzaklık	0,086283	0,0260	0,056142
8	Sanayi Bölgelerine Uzaklık	0,108082	0,0327	0,070391
9	Su Kaynaklarına Uzaklık	0,065284	0,1344	0,099842
10	Rüzgâr Hızı	0,001674	0,1112	0,056437
11	Rüzgâr Türbinlerine Uzaklık	0,060396	0,0348	0,047598
12	Yerleşim Alanlarına Uzaklık	0,058061	0,0846	0,071331
13	Yollara Uzaklık	0,094433	0,0418	0,068117

Entropi yöntemi sonuçlarına göre en yüksek ağırlık 0,203028 değeri ile Doğal Gaz Şebekesine Uzaklık kriterinde elde edilmiştir. Bu değer toplam ağırlığın yaklaşık %20'sine karşılık gelmekte olup, veri setinde en yüksek ayırt edicilik kapasitesinin bu kriterde bulunduğunu göstermektedir. Entropi'de ikinci ve üçüncü sırada Kıyı Çizgisine Uzaklık (0,123442) ve Sanayi Bölgelerine Uzaklık (0,108082) kriterleri yer almaktadır. Buna karşılık GHI (0,000394) ve Rüzgâr Hızı (0,001674) kriterleri neredeyse sifıra yakın ağırlık almıştır. Bu durum, enerji potansiyeli kriterlerinin veri setinde düşük varyans göstermesi nedeniyle Entropi yaklaşımı tarafından sınırlı bilgi içeriğine sahip olarak değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır.

FAHP sonuçları ise farklı bir öncelik yapısı ortaya koymaktadır. En yüksek ağırlık Su Kaynaklarına Uzaklık (0,1344), Arazi Kullanım Türü (0,1315) ve Fay Hatlarına Uzaklık (0,1291) kriterlerinde elde edilmiştir. GHI (0,1213) ve Rüzgâr Hızı (0,1112) kriterlerinin de yüksek ağırlık alması, uzmanların enerji potansiyelini karar sürecinde merkezi bir parametre olarak değerlendirdiğini göstermektedir. Buna karşılık Entropi'de en yüksek çıkan doğal gaz şebekesine uzaklık kriteri FAHP'de yalnızca 0,0404 düzeyinde kalmıştır.

Hibrit yöntemde ise bu iki yaklaşım dengelenmiştir. Doğal Gaz Şebekesine Uzaklık hibritte 0,121714 ile en yüksek ağırlıklardan olma durumunu korumuş, ancak Entropi'deki %20 düzeyinden daha makul bir seviyeye çekilmiştir. Fay Hatlarına Uzaklık (0,104009) ve Su Kaynaklarına Uzaklık (0,099842) kriterleri hibritte üst sıralarda yer almıştır. GHI (0,060847) ve Rüzgâr Hızı (0,056437) kriterleri ise Entropi'ye kıyasla belirgin biçimde artmış, FAHP'ye kıyasla ise dengelenmiştir. Hibrit sonuçlara göre ilk üç kriter toplam ağırlığın yaklaşık %32'sini oluşturmaktadır. Bu dağılım, karar modelinin ne tamamen veri varyansına ne de tamamen uzman algısına bağımlı olduğunu; her iki boyutu birlikte yansıtan dengeli bir yapı üretildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Entropi altyapı temelli mekânsal ayrışmayı ön plana çıkarırken; FAHP operasyonel sürdürülebilirlik, güvenlik ve enerji potansiyeli boyutlarını daha güçlü biçimde yansıtmaktadır. Hibrit yaklaşım ise bu iki eğilimi dengeleyerek aşırı uçları yumuşatmakta ve daha kararlı bir ağırlık seti üretmektedir. Bu nedenle izleyen aşamada uygulanacak MOORA, TOPSIS ve VIKOR sıralamalarının hibrit ağırlık seti temelinde değerlendirilmesi, karar modelinin hem nesnel hem öznel boyutlarını birlikte dikkate alan daha sağlam bir çerçeve sunmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca “en yüksek puanı alan” alternatiflerin değil, aynı zamanda yöntem değişimlerine karşı duyarlılığı düşük, yani kararlılığı yüksek alternatiflerin belirlenmesine imkân veren sağlam bir analitik zemin oluşturmaktadır.

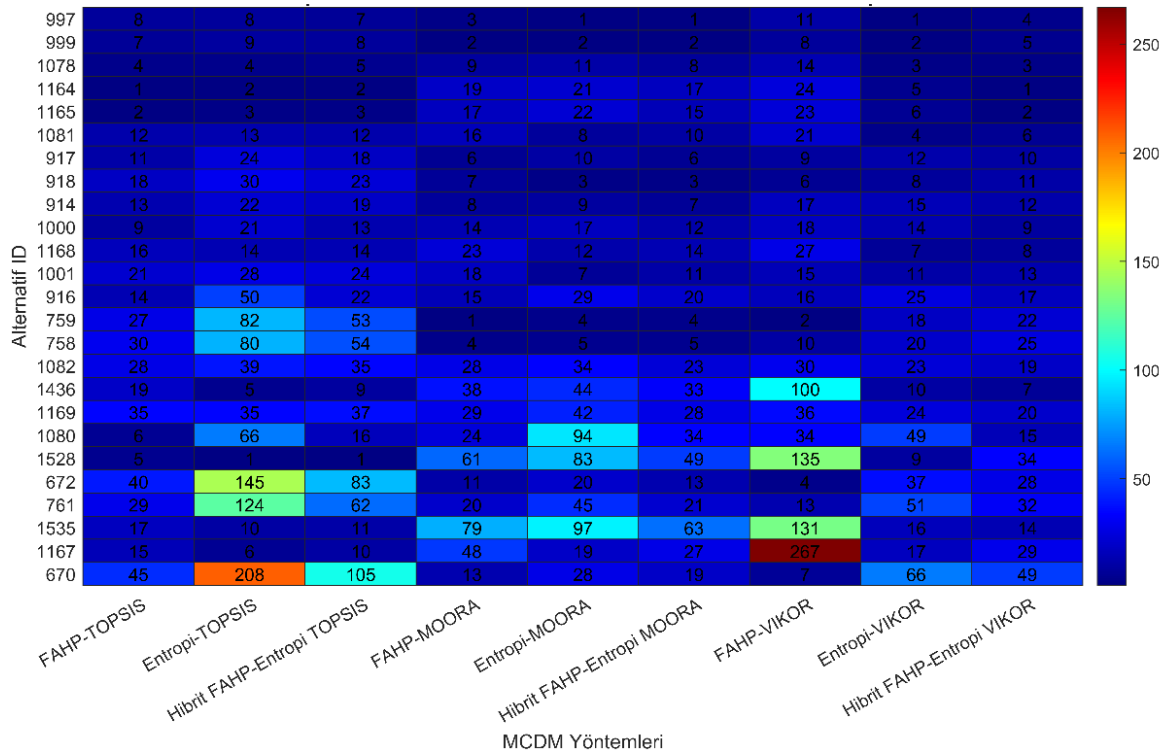
#### **4.1.8 ÇKKV yöntem sonuçları**

Kriter ağırlıklarının Entropi, FAHP ve Hibrit yaklaşımlarla belirlenmesinin ardından aday 4795 alternatif, MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılarak dokuz farklı senaryo altında sıralanmıştır. Böylece ağırlıklandırma yaklaşımı ile ÇKKV algoritmasının birlikte sıralama sonuçlarını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bu aşamada yalnızca en iyi alternatiflerin belirlenmesi değil, aynı zamanda yöntem değişimine karşı sıralamaların ne ölçüde kararlı olduğu da değerlendirilmiştir.

##### **4.1.8.1 En uygun alternatiflerde yöntem-ağırlıklandırma duyarlılığı**

Şekil 4.6'da sunulan “Top 25 Alternatifin ÇKKV Yöntemlerine Göre Sıralama Isı Haritası”, en iyi 25 alternatifin dokuz farklı senaryodaki sıra konumlarını göstermektedir. Isı haritasında koyu mavi tonlar üst sıraları (daha iyi performans), açık tonlar ise daha alt sıraları

temsil etmektedir. Bu görselleştirme, alternatiflerin yöntem ve ağırlık seti değişimine karşı ne ölçüde duyarlı olduğunu doğrudan ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6: En iyi 25 alternatifin 9 farklı ÇKKV yöntemine göre sıralama değerleri.

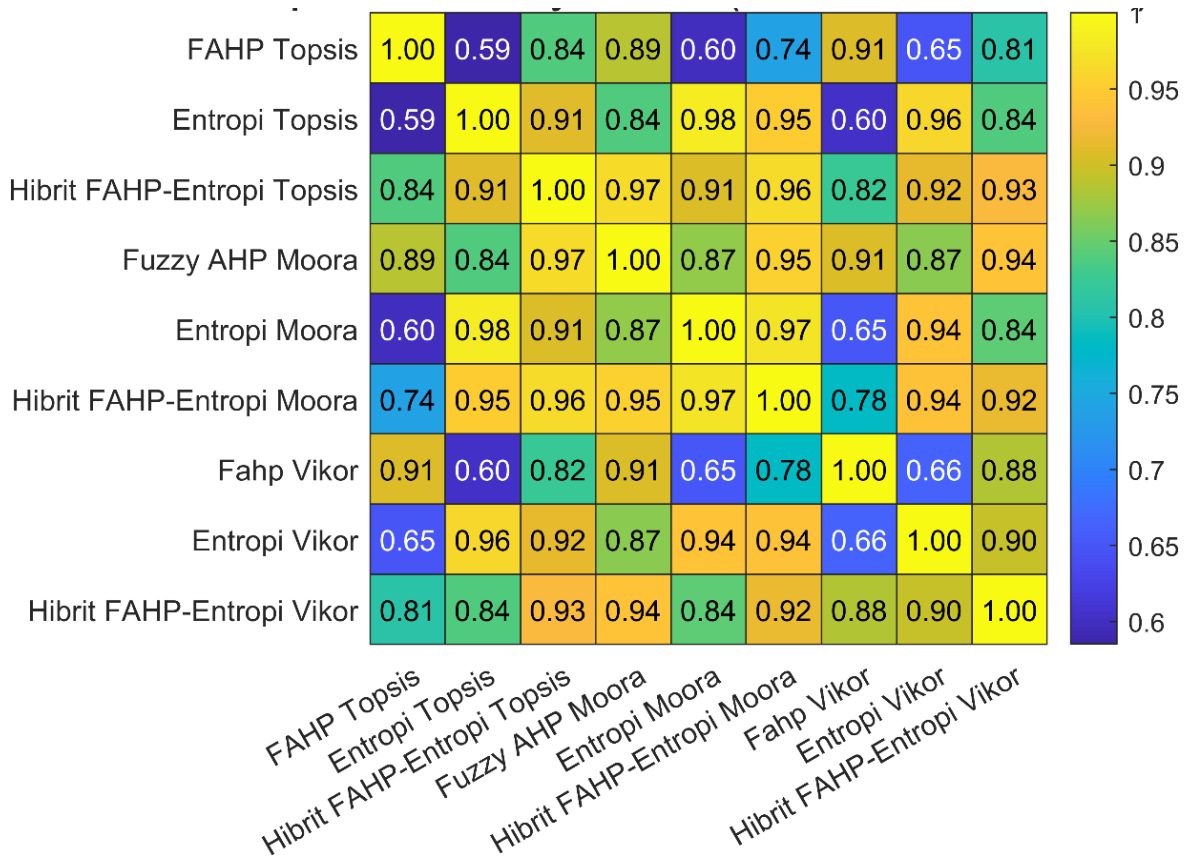
Isı haritası incelendiğinde bazı alternatiflerin dokuz senaryonun büyük bölümünde ilk 10–15 bandında konumlandığı görülmektedir. Örneğin; Alternatif 997 ve 999, FAHP–TOPSIS, Hibrit–TOPSIS ve FAHP–VIKOR kombinasyonlarında ilk 10 içerisinde yer almakta; sıra değişimleri sınırlı kalmaktadır. Bu tür alternatifler yöntem değişimine karşı görece kararlı bir profil sergilemektedir. Buna karşılık bazı alternatiflerde belirgin sıra kaymaları gözlenmektedir. Örneğin; Alternatif 670, FAHP–MOORA altında 13. sırada yer alırken, Entropi–TOPSIS senaryosunda 208. sıraya kadar gerilemektedir. Benzer şekilde Alternatif 761’in bazı senaryolarda ilk 30 içerisinde yer aldığı, ancak Entropi temelli kombinasyonlarda 100’ün üzerine çıktığı görülmektedir. Alternatif 1528’in FAHP–VIKOR altında 135. sıraya düşmesi de dikkat çekicidir.

Bu tür kaymalar, sıralamanın özellikle ağırlıklandırma yöntemine duyarlı olduğunu göstermektedir. Entropi yaklaşımında altyapı varyansının baskınlaşması, enerji potansiyeli yüksek ancak altyapı açısından daha dezavantajlı alternatiflerin geri düşmesine yol açabilmektedir. Buna karşılık FAHP senaryolarında enerji potansiyeli ve çevresel güvenlik

kriterleri daha güçlü temsil edildiğinden, bazı alternatiflerin sıralamada yükseldiği gözlenmektedir. Genel eğilim değerlendirildiğinde, hibrit ağırlıklandırma altında elde edilen sıralamaların hem Entropi hem FAHP senaryolarına göre daha dengeli bir dağılım ürettiği görülmektedir. Hibrit–MOORA ve Hibrit–VIKOR kombinasyonlarında ilk 25 alternatifin büyük bölümünün 1–40 bandında yoğunlaştığı, aşırı uç sapmaların azaldığı gözlenmektedir. Bu durum hibrit yaklaşımın duyarlılığı azaltıcı bir etki ürettiğini göstermektedir. Dolayısıyla alternatif bazlı analiz, “en iyi” görünen her alternatifin eşit derecede güvenilir olmadığını; bazı alternatiflerin yöntem değişimine karşı daha kırılğan bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle yalnızca tek bir sıralama sonucuna dayanmak yerine, alternatiflerin sıra değişkenliği dikkate alınmalıdır.

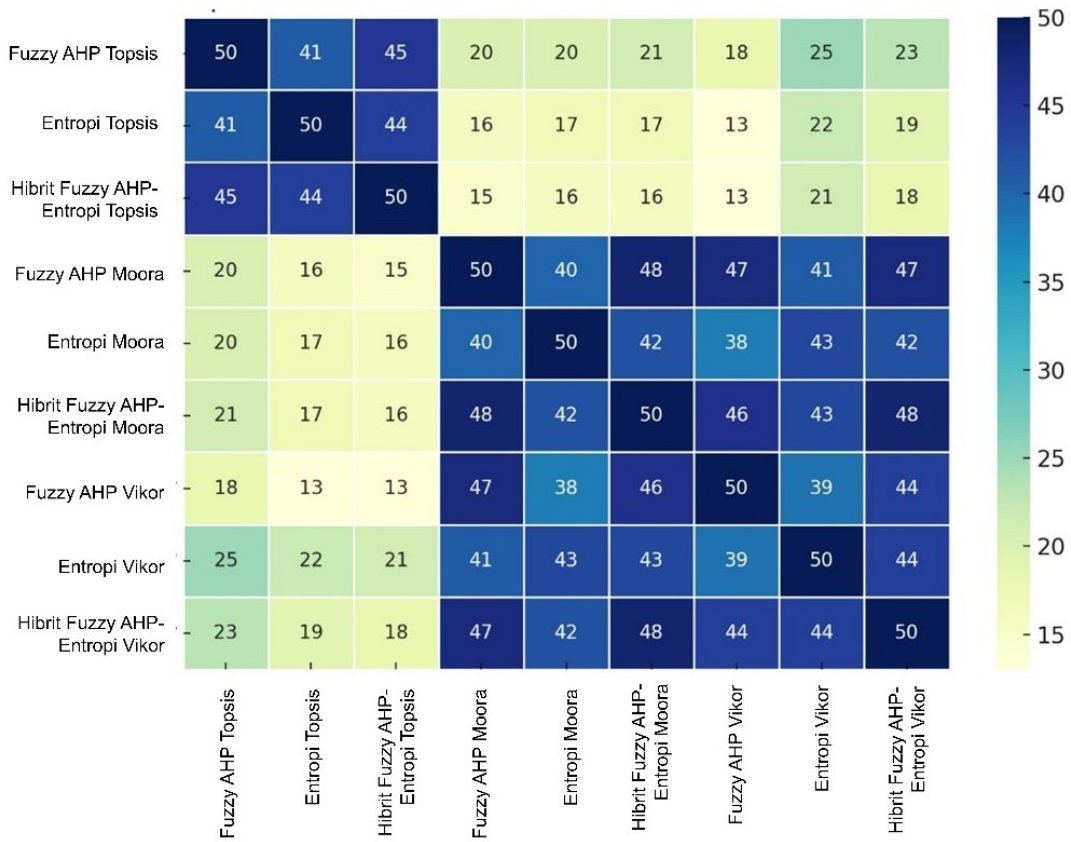
#### 4.1.8.2 ÇKKV yöntemleri arası sıralama tutarlılığı ve benzerlik analizi

Alternatif bazlı duyarlılık analizinin ardından, sıralamaların genel yapısal benzerliği Spearman korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Şekil 4.7’de sunulan Spearman korelasyon matrisi, dokuz senaryo arasındaki sıralama benzerliğini nicel olarak göstermektedir.



**Şekil 4.7:** ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma senaryoları arasındaki sıralama benzerliğini gösteren Spearman korelasyon matrisi.

Elde edilen sonuçlara göre yöntemler arası korelasyon katsayıları genel olarak yüksektir ( $\rho > 0,80$ ). Özellikle Entropi–MOORA ile Hibrit–MOORA arasında  $\rho = 0,97$ , Entropi–TOPSIS ile Hibrit–TOPSIS arasında  $\rho = 0,91$  ve FAHP–MOORA ile FAHP–VIKOR arasında  $\rho = 0,91$  değerleri hesaplanmıştır. Bu durum, aynı ağırlık seti kullanıldığında farklı ÇKKV algoritmalarının büyük ölçüde benzer sıralama yapısı ürettiğini göstermektedir. En düşük korelasyon değeri FAHP–TOPSIS ile Entropi–TOPSIS arasında  $\rho = 0,59$  olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde FAHP–TOPSIS ile Entropi–MOORA arasında  $\rho = 0,60$  düzeyindedir. Bu sonuç, sıralama farklılığının esas olarak ÇKKV algoritmasından değil, ağırlıklandırma yaklaşımından kaynaklandığını göstermektedir. Yani ağırlık seti değiştiğinde sıralama yapısı daha belirgin biçimde değişmekte; buna karşılık aynı ağırlık seti altında TOPSIS, MOORA ve VIKOR sonuçları çoğunlukla yüksek benzerlik göstermektedir. Şekil 4.8’de görülen yöntemler arası ilk 50 alternatifin örtüşme matrisi de bu bulguyu desteklemektedir. MOORA ve VIKOR kombinasyonları arasında 40–48 aralığında ortak ilk 50 alternatif paylaşımı gözlenirken, FAHP–TOPSIS ile Entropi–TOPSIS arasında bu sayı 16–20 aralığına düşmektedir. Bu da ağırlıklandırma yaklaşımının sıralama yapısı üzerindeki belirleyici etkisini nicel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.8: ÇKKV yöntemleri arasında ilk 50 alternatifin örtüşme matrisi.

Genel olarak değerlendirildiğinde, üç temel sonuç ortaya çıkmaktadır. Birincisi, hibrit ağırlıklandırma altında elde edilen sıralamalar hem Entropi hem FAHP sonuçlarıyla yüksek korelasyon göstermekte ve ara bir denge noktası oluşturmaktadır ( $\rho \approx 0,90-0,96$ ). İkincisi, enerji potansiyeline yüksek ağırlık veren FAHP senaryoları ile altyapı varyansını öne çıkaran Entropi senaryoları arasında alternatif bazında anlamlı sıra kaymaları oluşmaktadır. Üçüncüsü, ÇKKV algoritmaları arasındaki fark, ağırlıklandırma farkına kıyasla daha sınırlıdır.

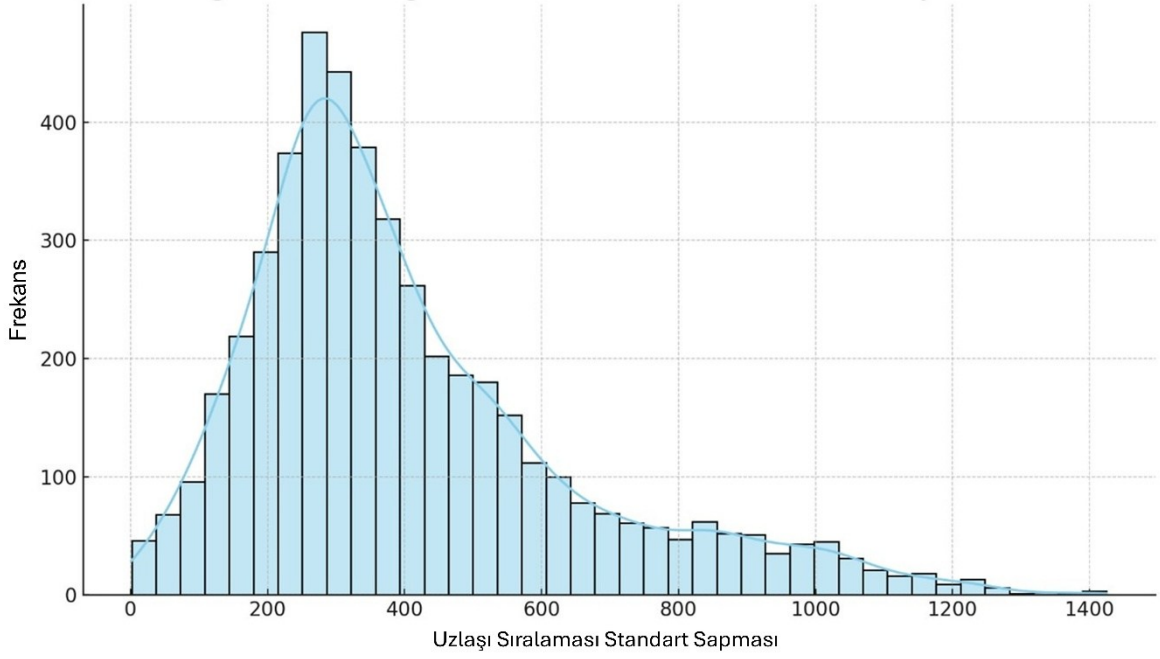
Bu sebeple, sıralama sonuçları genel eğilim bakımından yüksek tutarlılık sergilese de alternatif bazlı duyarlılık analizleri kararın güvenilirliği açısından etkili öneme sahiptir. Bu nedenle nihai kararın belirlenmesinde yalnızca tek bir yöntem sonucuna dayanmak yerine, hibrit ağırlıklandırma altında elde edilen ve yöntemler arası yüksek korelasyon gösteren alternatiflerin tercih edilmesi daha sağlam bir yaklaşım sunmaktadır. Böylece hem performans hem de kararlılık birlikte değerlendirilmiş olmaktadır.

#### **4.1.9 Alternatiflerin kararlılıklarının ve performanslarının değerlendirilmesi**

ÇKKV yöntemleri altında elde edilen sıralamaların yalnızca “en iyi alternatifleri” göstermesi yeterli değildir. Özellikle farklı ağırlıklandırma yaklaşımları ve farklı ÇKKV algoritmaları birlikte kullanıldığında, belirli alternatiflerin yöntem değişimine karşı ne ölçüde dirençli olduğu da değerlendirilmelidir. Bu nedenle bu aşamada alternatiflerin sıralama değişkenliği kararlılık perspektifiyle incelenmiş; ardından performans (Borda puanı) ile kararlılık arasındaki ilişki analiz edilmiş ve son olarak her iki boyutu birlikte temsil eden Birleşik Skor yaklaşımı geliştirilmiştir.

##### **4.1.9.1 Farklı ÇKKV senaryoları altında sıralama kararlılığı**

Her alternatif için dokuz farklı senaryo (3 ağırlık seti  $\times$  3 ÇKKV yöntemi) altında elde edilen sıralama değerlerinin standart sapması hesaplanarak “uzlaşım sıralaması standart sapması” elde edilmiştir. Şekil 4.9’da sunulan histogram, 4795 alternatifin yöntemler arası sıra değişkenliğinin dağılımını göstermektedir.



**Şekil 4.9:** ÇKKV yöntemleri ve ağırlıklandırma senaryoları altında alternatif bazlı sıralama standart sapması dağılımı.

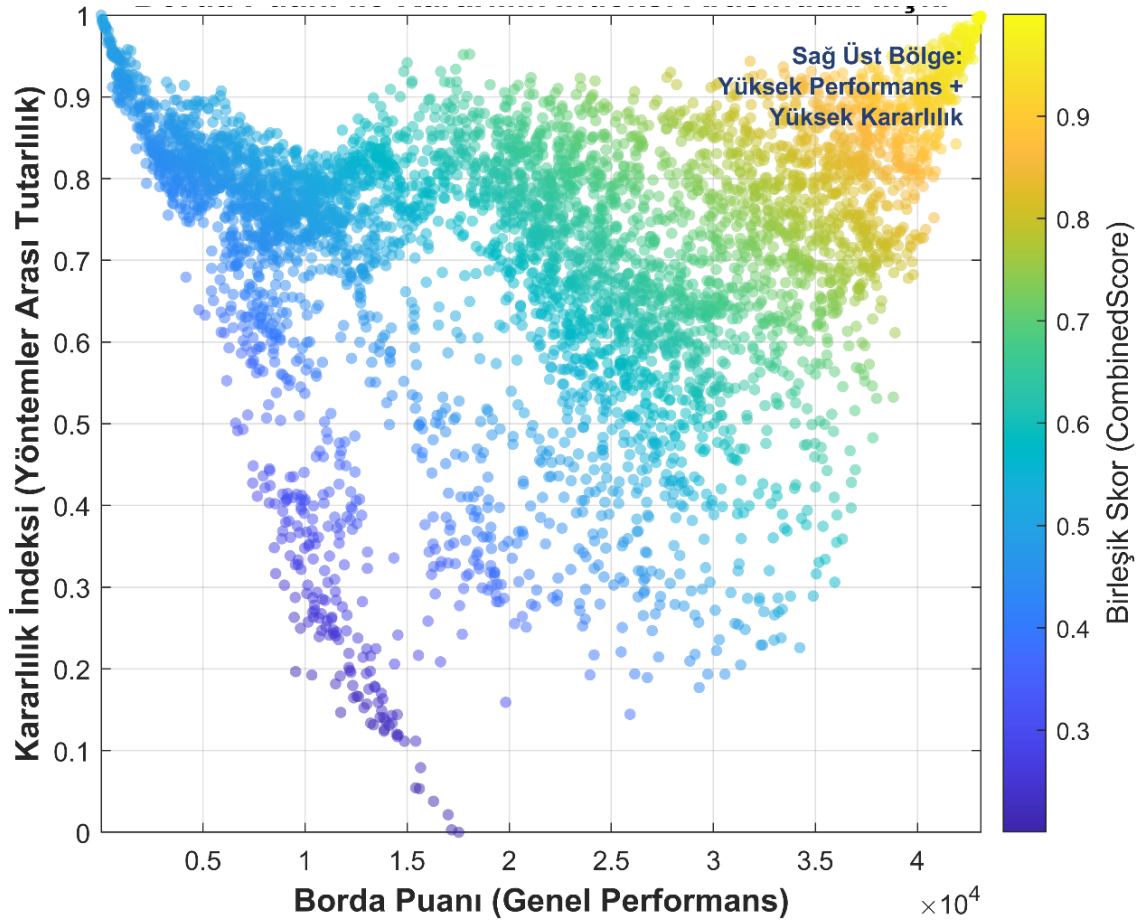
Histogram incelendiğinde dağılımın belirgin biçimde sağa çarpık olduğu görülmektedir. Alternatiflerin dikkate değer bir kısmı 200–500 bandında standart sapma değerine sahipken, daha sınırlı sayıda alternatif 800–1400 aralığında yüksek sapma değerleri göstermektedir. Bu durum, alternatiflerin çoğunluğunun yöntem değişimine karşı orta düzeyde duyarlılık sergilediğini; ancak bazı alternatiflerin oldukça kırılabilir bir yapı taşıdığını göstermektedir.

Standart sapma değeri düşük olan alternatifler, dokuz senaryoda benzer sıra konumlarında kalmakta; dolayısıyla karar modeline göre “kararlı” olarak değerlendirilmektedir. Buna karşılık yüksek standart sapma değerine sahip alternatifler, bir senaryoda üst sıralarda yer alırken başka bir senaryoda belirgin sıra kaybı yaşayabilmektedir. Bu tür alternatiflerin karar sürecinde doğrudan ilk sırada yer alması, metodolojik risk içerebilmektedir. Bu analiz, ÇKKV sürecinin yalnızca performans temelli değil, aynı zamanda duyarlılık temelli değerlendirilmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

#### 4.1.9.2 Borda puanı ile kararlılık indeksi ilişkisi ve birleşik skor yaklaşımı

Alternatiflerin genel performansını temsil etmek amacıyla dokuz senaryodaki sıralama değerleri Borda puanı yaklaşımı ile birleştirilmiştir. Böylece her alternatif için toplam performansı temsil eden tek bir skor elde edilmiştir. Kararlılık indeksi ise standart sapma

değerlerinin normalize edilmesiyle türetilmiş ve 0–1 aralığında ifade edilmiştir. Şekil 4.10’da sunulan saçılım diyagramı, Borda puanı (genel performans) ile kararlılık indeksi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafik incelendiğinde dikkat çekici bir yapı ortaya çıkmaktadır. Yüksek performanslı alternatifler (x ekseninde sağa doğru) genel olarak yüksek kararlılık indeksine de sahiptir. Özellikle grafiğin sağ üst bölgesinde yoğunlaşan alternatifler hem yüksek Borda puanına hem de 0,85–1.00 aralığında kararlılık değerine sahiptir. Bu bölge “yüksek performans + yüksek kararlılık” alanı olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 4.10:** Borda puanı ve kararlılık indeksi arasındaki ilişki.

Buna karşılık orta performans bandında (yaklaşık  $1.0\text{--}2.5 \times 10^4$  aralığı) kararlılık değerlerinin oldukça geniş bir dağılım sergilediği görülmektedir (0.20–0.90 arası). Bu durum, bazı alternatiflerin ortalama performans göstermesine rağmen yöntem değişimine karşı oldukça hassas olduğunu ortaya koymaktadır. Dikkat çekici bir diğer bulgu, düşük performanslı alternatiflerin (sol alt bölge) genellikle düşük kararlılık değerine sahip olmasıdır. Bu alternatifler hem sıralamada geride kalmakta hem de yöntem değişimine karşı istikrarsız davranmaktadır. Bu iki boyutu birlikte değerlendirebilmek amacıyla Borda puanı

ve kararlılık indeksinin normalize edilmiş birleşimi olarak “Birleşik Skor” hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, yalnızca en yüksek performansı değil, aynı zamanda en güvenilir (en kararlı) alternatifleri ön plana çıkarmayı amaçlamaktadır.

#### 4.1.9.3 Borda, kararlılık ve birleşik skor arasındaki korelasyonlar

Tablo 4.2’de Borda puanı, kararlılık indeksi ve Birleşik Skor arasındaki korelasyon matrisi sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre;

- Borda Puanı ile Kararlılık İndeksi arasında zayıf negatif bir ilişki bulunmaktadır ( $r = -0,186$ ). Bu sonuç, performans arttıkça kararlılığın otomatik olarak artmadığını; iki boyutun tamamen örtüşmediğini göstermektedir.
- Borda Puanı ile Birleşik Skor arasında güçlü pozitif bir ilişki vardır ( $r = 0,792$ ). Bu durum, birleşik skorun performans boyutunu güçlü biçimde temsil ettiğini göstermektedir.
- Kararlılık İndeksi ile Birleşik Skor arasında orta düzeyde pozitif ilişki mevcuttur ( $r = 0,452$ ). Bu sonuç, birleşik skorun yalnızca performansa değil, kararlılık boyutuna da anlamlı katkı verdiğini göstermektedir.

Dolayısıyla Birleşik Skor, performansın baskın olduğu ancak kararlılık boyutunu da dışlamayan dengeli bir ölçüt üretmektedir. Yalnızca Borda puanına dayalı bir seçim, yöntem değişimine karşı hassas alternatifleri üst sıralara taşıyabilirken; yalnızca kararlılığa dayalı bir seçim yüksek performanslı alternatifleri göz ardı edebilir. Birleşik yaklaşım bu iki riski birlikte azaltmaktadır.

**Tablo 4.2:** Borda Puanı, Kararlılık İndeksi ve Birleşik Skor arasındaki korelasyon matrisi.

Değişkenler	Borda Puanı	Kararlılık İndeksi	Birleşik Skor
Borda Puanı	1.000	-0,186	0,792
Kararlılık İndeksi	-0,186	1.000	0,452
Birleşik Skor	0,792	0,452	1.000

Bu aşamada yapılan analizler üç temel sonucu ortaya koymaktadır:

1. Alternatiflerin dikkate değer bir kısmı yöntem değişimine karşı orta düzeyde duyarlılık göstermektedir; ancak belirli alternatiflerde belirgin sıra dalgalanmaları mevcuttur.

2. Yüksek performans ile yüksek kararlılık tamamen örtüşmemektedir; bu nedenle tek boyutlu bir değerlendirme yeterli değildir.
3. Birleşik Skor yaklaşımı, performans ve kararlılığı birlikte temsil eden daha güvenilir bir sıralama üretmektedir.

Bu nicel analizler sonucunda elde edilen yüksek performanslı ve yüksek kararlılığa sahip alternatifler bir sonraki aşamada CBS ortamında mekânsal olarak görselleştirilmiş ve coğrafi dağılım örüntüleri incelenmiştir. Böylece analitik olarak belirlenen “en uygun ve en kararlı” alanların mekânsal kümelenme eğilimleri, altyapı aksları ve enerji potansiyeli dağılımları ile ilişkisi değerlendirmeye alınabilmektedir.

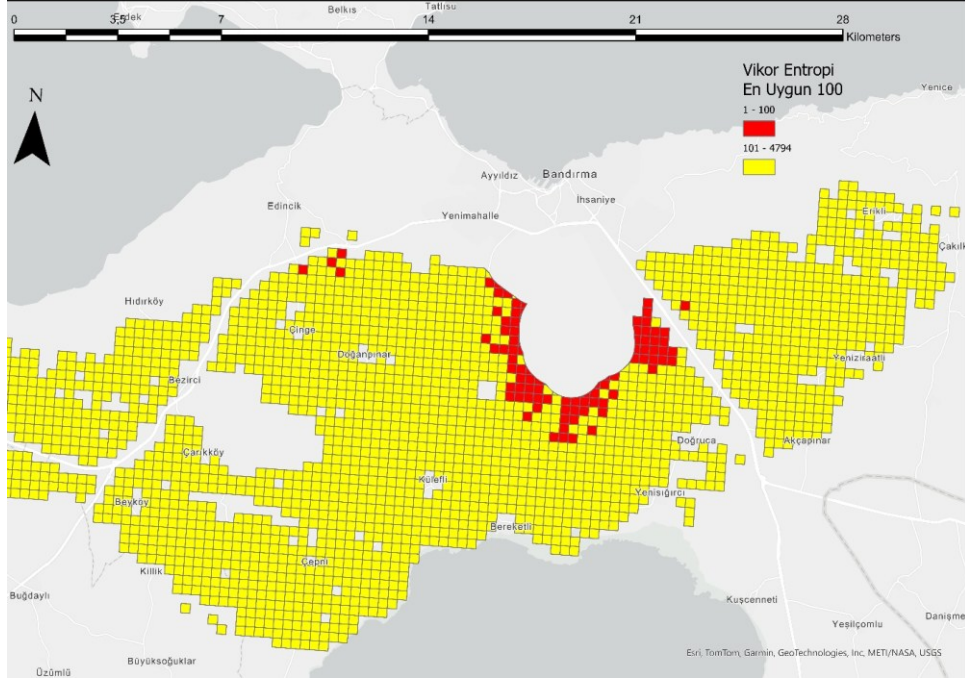
#### **4.1.10 ÇKKV yöntemlerinin CBS tabanlı mekânsal tutarlılık analizi**

Bu aşamada Entropi, Fuzzy AHP ve Hibrit ağırlıklandırma yaklaşımları kullanılarak elde edilen VIKOR, MOORA ve TOPSIS yöntemlerine ait ilk 100 alternatif CBS ortamında görselleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tüm değerlendirmeler 10 hektarlık grid yapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Amaç yalnızca en yüksek performansa sahip alanları belirlemek değil, aynı zamanda farklı karar modelleri altında ortaya çıkan sonuçların mekânsal sürekliliğini ve yöntemler arası tutarlılığını incelemektir. Bu nedenle analiz iki aşamalı kurgulanmıştır: ilk aşamada yöntem bazlı mekânsal dağılımlar değerlendirilmiş, ikinci aşamada ise kararlılık ve performansın bütünlük analizi gerçekleştirilmiştir.

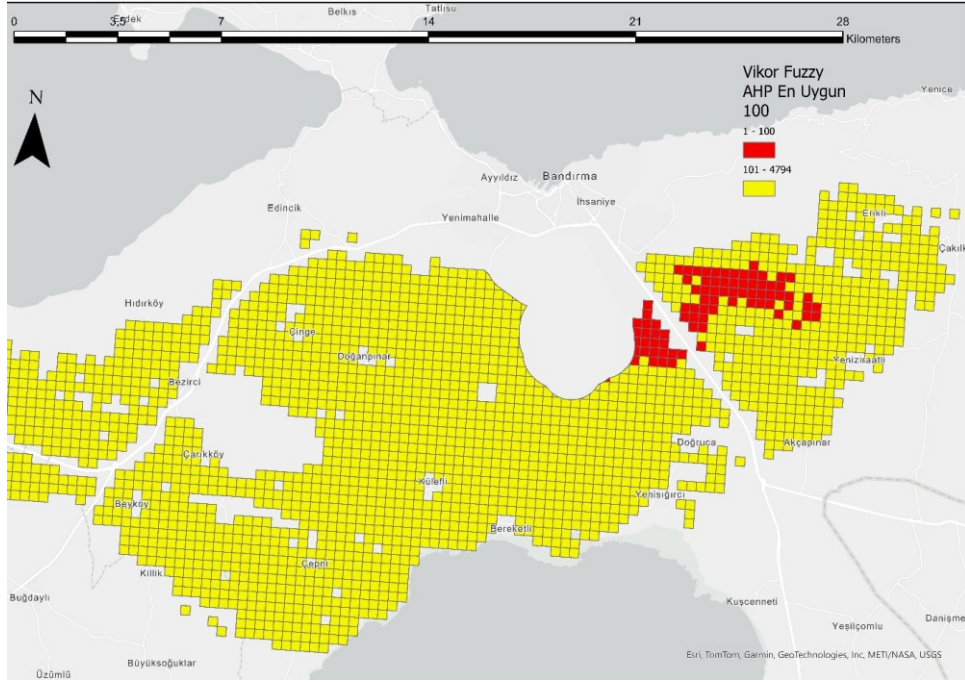
##### **4.1.10.1 Yöntem bazlı mekânsal uygunluk dağılımlarının karşılaştırılması**

VIKOR yöntemi altında Entropi ağırlıkları kullanılarak elde edilen ilk 100 alternatif Şekil 4.11’de sunulmaktadır. Harita incelendiğinde alternatiflerin Bandırma ilçe merkezinin güneydoğusunda, D200 karayolunun güney hattında ve özellikle Doğruca–Yeniziraatli aksında yoğunlaştığı görülmektedir. Doğu kesimde belirgin bir mekânsal çekirdek oluşurken, batı kesimde (Marmara OSB–Çarikköy hattı) daha sınırlı ve parçalı hücreler yer almaktadır. Bu dağılım, entropi temelli veri ağırlıklandırmasının doğu aksındaki kriter kombinasyonlarını daha avantajlı konuma taşıdığını göstermektedir. VIKOR–Fuzzy AHP sonuçları (Şekil 4.12), doğu kesimdeki yoğunlaşmanın daha geniş ve süreklilik gösteren bir blok haline dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle Erikli–Yeniziraatli–Akçapınar üçgeninde kesintisiz bir uygunluk havzası oluşmuştur. Uzman temelli ağırlıklandırma altında belirli kriterlerin birlikte dengeli performans sergilediği alanların daha belirgin hale

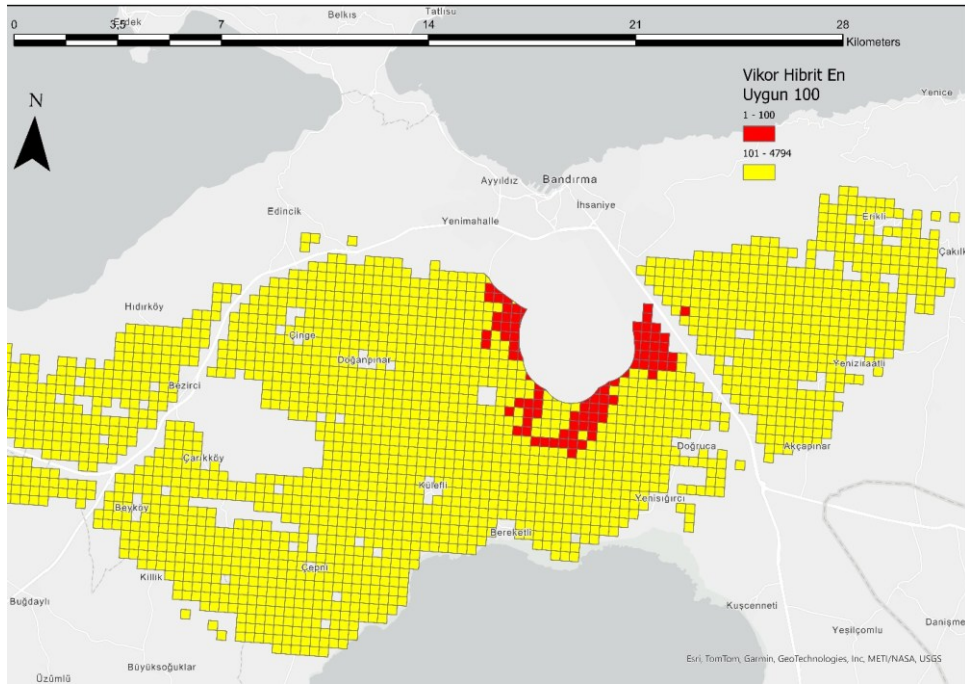
geldiği anlaşılmaktadır. VIKOR–Hibrit sonuçları (Şekil 4.13) ise doğu çekirdeğini korumakla birlikte kümelenmeyi daha kompakt bir yapıya dönüştürmektedir. Hibrit yaklaşım, veri temelli ve uzman temelli ağırlıkları dengeleyerek aşırı yayılımı sınırlandırmıştır.



**Şekil 4.11:** VIKOR yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.

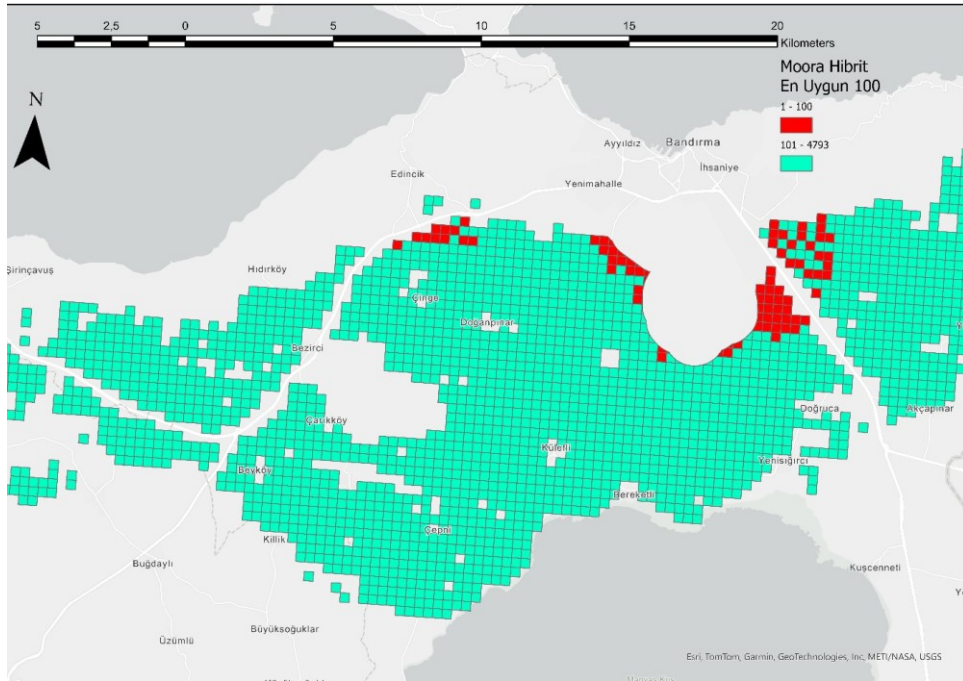


**Şekil 4.12:** VIKOR yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.

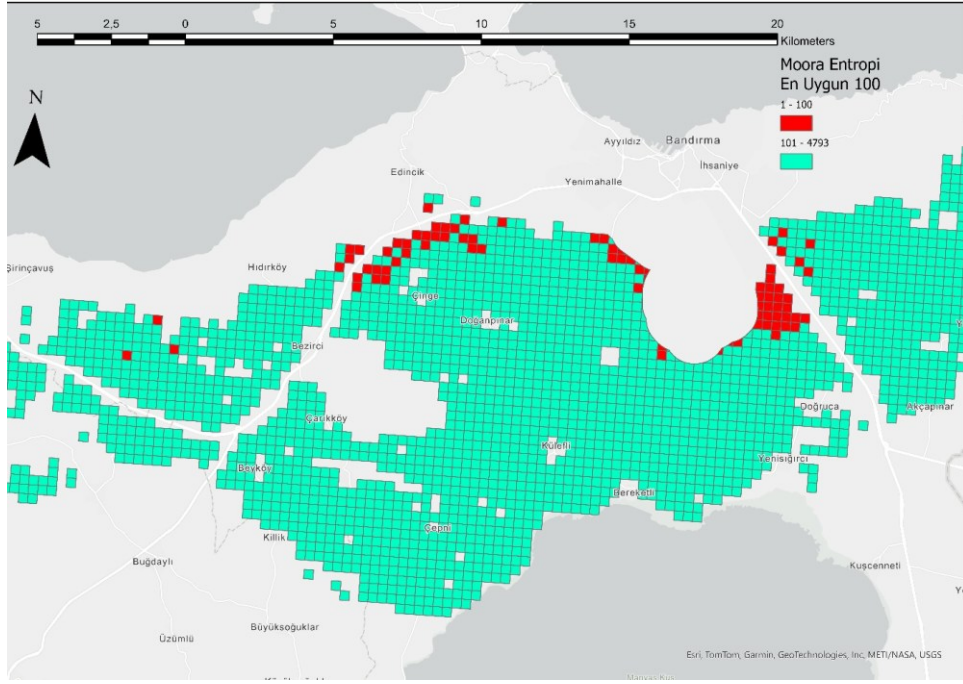


**Şekil 4.13:** VIKOR yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.

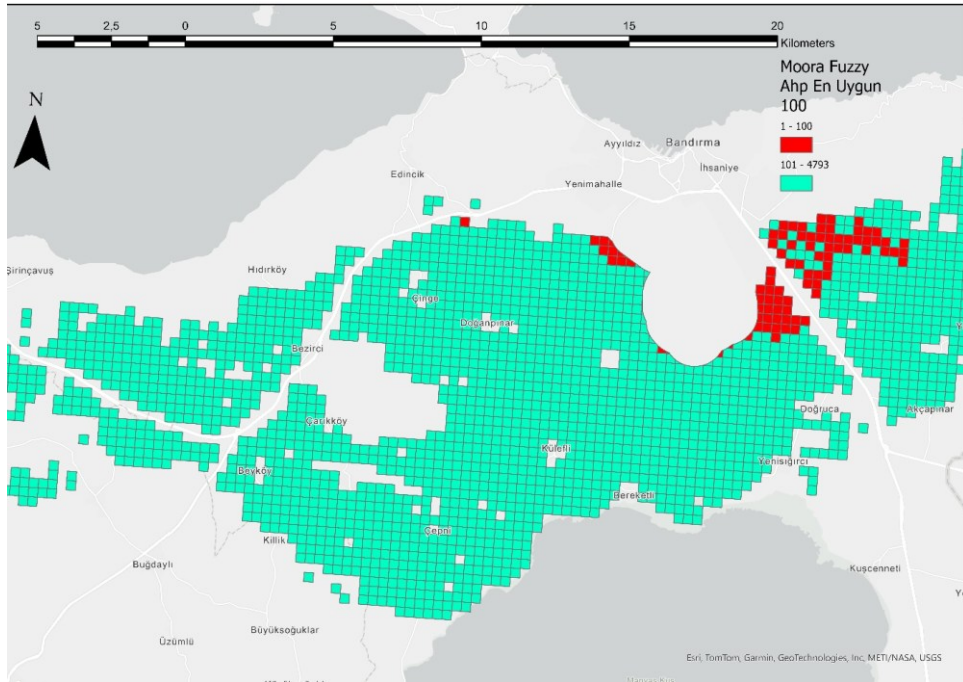
MOORA sonuçlarında farklı bir mekânsal davranış gözlenmektedir. MOORA–Entropi haritasında (Şekil 4.14) yalnızca doğu aksında değil, Çiğge–Doğanpınar–Bezirci kuzey bandında da lineer bir uygunluk dizilimi görülmektedir. Ayrıca Marmara OSB çevresinde ikincil kümelenmeler oluşmuştur. Bu durum MOORA’nın oran temelli matematiksel yapısının birden fazla yerel optimumu görünür kılabilirdiğini göstermektedir. MOORA–Fuzzy AHP sonuçları (Şekil 4.15) kuzey bandındaki sürekliliği zayıflatmış ve uygunluk alanını daha çok doğu aksında yoğunlaştırmıştır. MOORA–Hibrit haritasında (Şekil 4.16) ise doğu çekirdeği korunurken kuzey bandındaki alternatiflerin sayısı azalmış ancak tamamen ortadan kalkmamıştır. Bu durum hibrit modelin mekânsal dengeleyici etkisini göstermektedir.



**Şekil 4.14:** MOORA yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.



**Şekil 4.15:** MOORA yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.

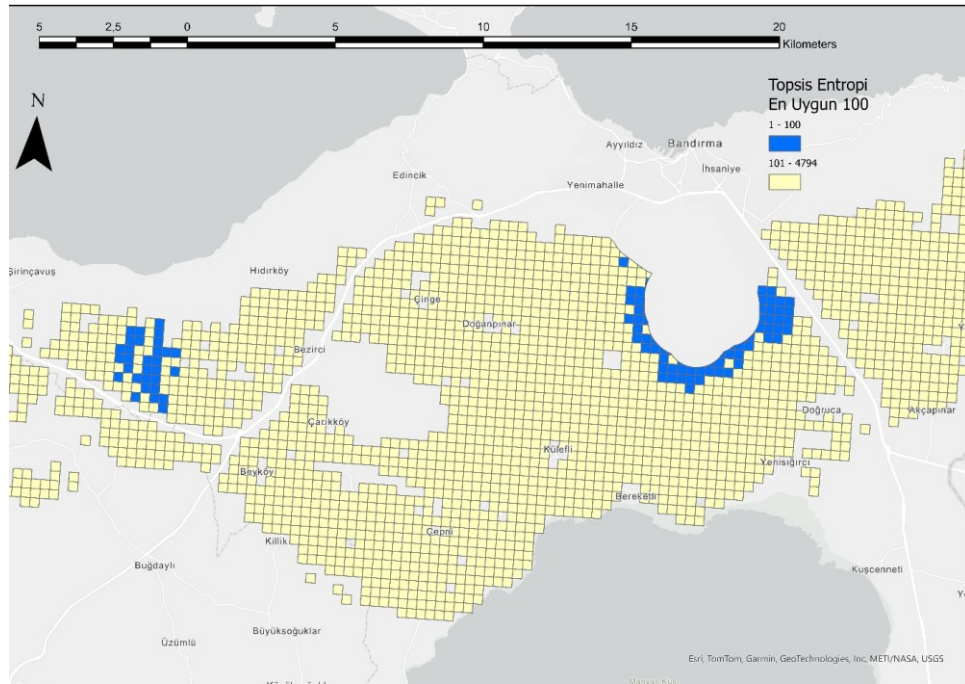


**Şekil 4.16:** MOORA yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.

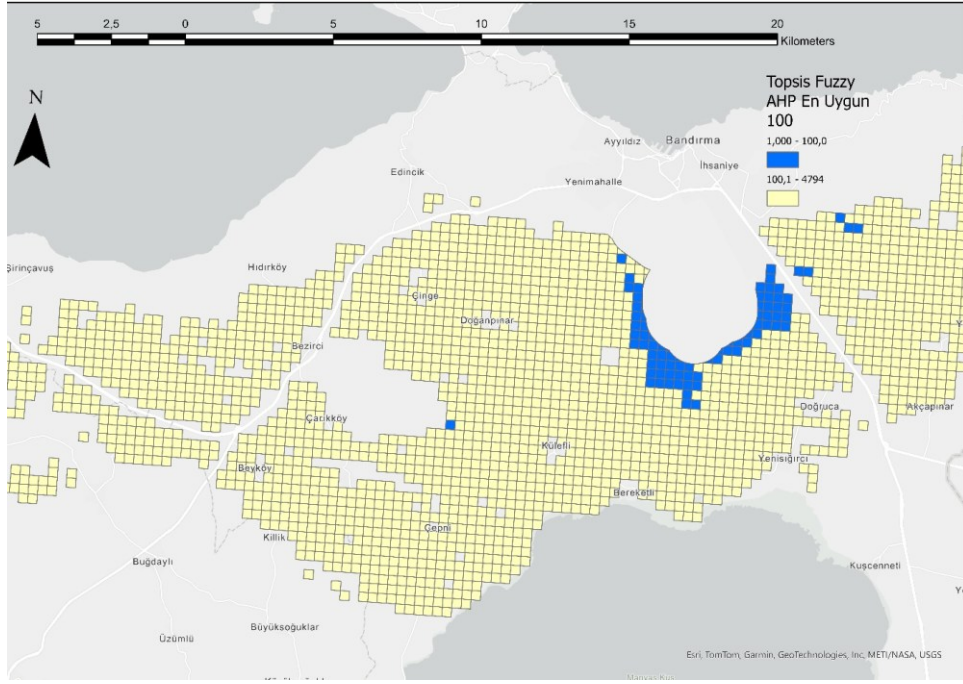
TOPSIS sonuçları çift çekirdekli bir yapı üretmiştir. TOPSIS–Entropi haritasında (Şekil 4.17) birincil çekirdek Doğruca–Yeniziraatlı–Akçapınar hattında, ikincil çekirdek ise

Marmara OSB ve Çarikköy çevresinde oluşmuştur. Bu durum ideal çözüme yakınlık temelli yaklaşımın farklı kriter kombinasyonlarına sahip iki ayrı bölgeyi üst sıralara taşıyabildiğini göstermektedir. TOPSIS–Fuzzy AHP (Şekil 4.18) ve TOPSIS–Hibrit (Şekil 4.19) sonuçlarında ise batı çekirdeği belirgin biçimde zayıflamış ve doğu aksı baskın hale gelmiştir.

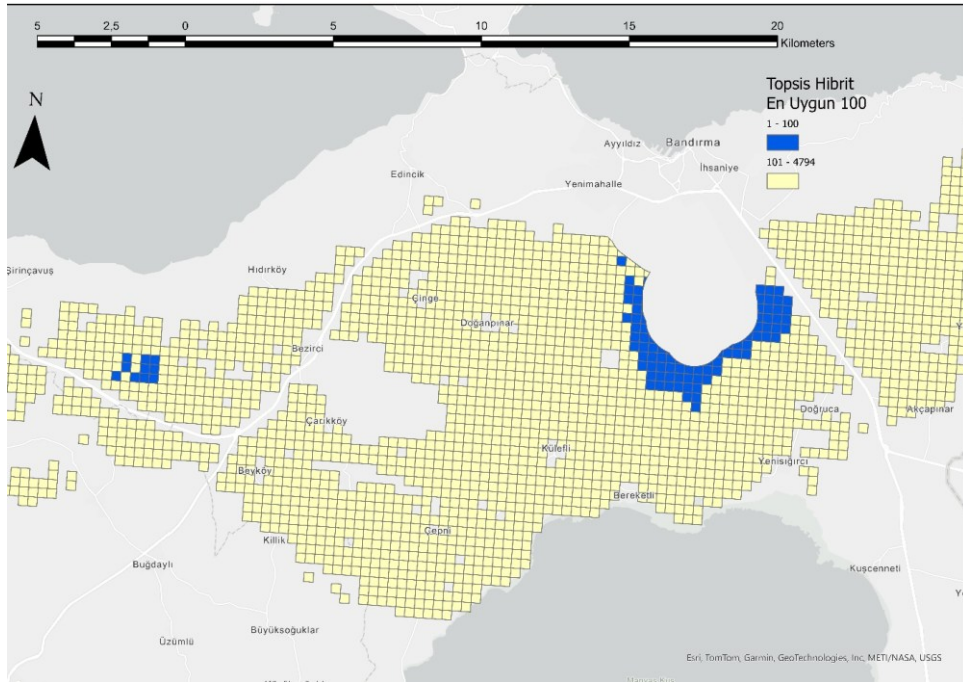
Bu dokuz harita birlikte değerlendirildiğinde Doğruca–Yeniziraatlı–Akçapınar hattının tüm yöntem ve ağırlık kombinasyonlarında ilk 100 içinde yer aldığı görülmektedir. Buna karşılık Marmara OSB–Çarikköy çevresi bazı yöntemlerde üst sıralara çıkarken bazı yöntemlerde geri planda kalmaktadır. Bu durum yöntem duyarlılığının mekânsal izdüşümünü açık biçimde ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.17:** TOPSIS yöntemi ve Entropi ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.



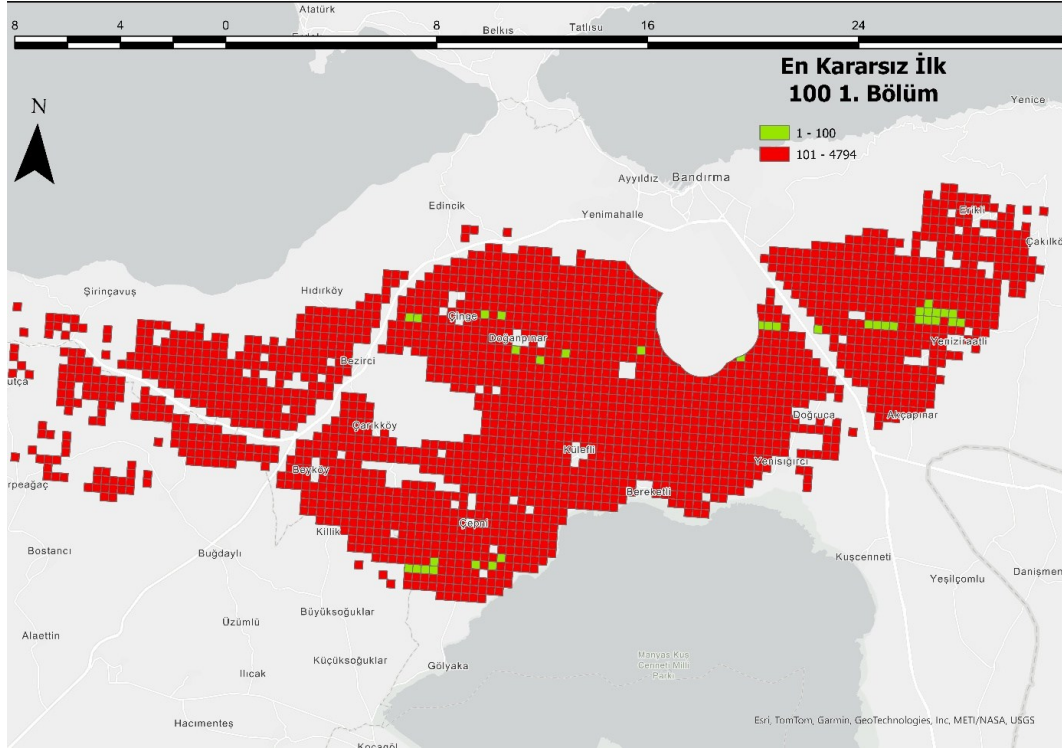
**Şekil 4.18:** TOPSIS yöntemi ve Fuzzy AHP ağırlıkları altında elde edilen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.



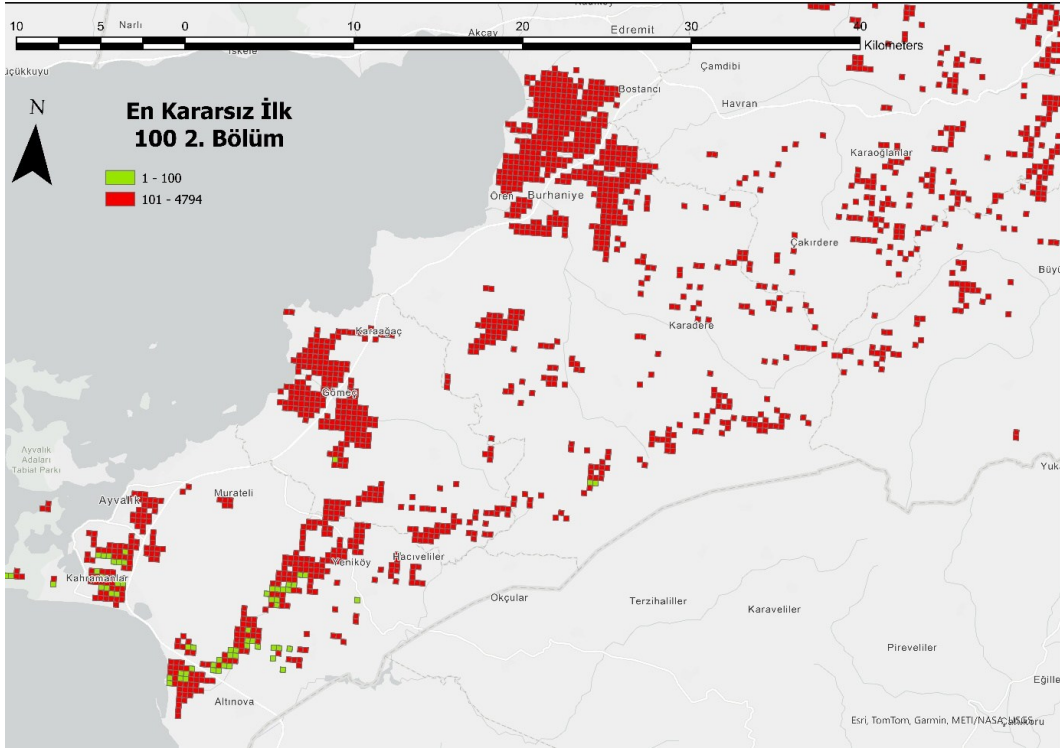
**Şekil 4.19:** TOPSIS yöntemi ve hibrit (Entropi + Fuzzy AHP) ağırlıkları altında belirlenen en uygun 100 alternatifin mekânsal dağılımı.



kümelenme eğilimi gösteren alanlar, yöntemler arası sıralama varyansının bu bölgelerde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.21: Kararlılık indeksi en düşük ilk 100 alternatifin (1. bölüm) mekânsal dağılımı.



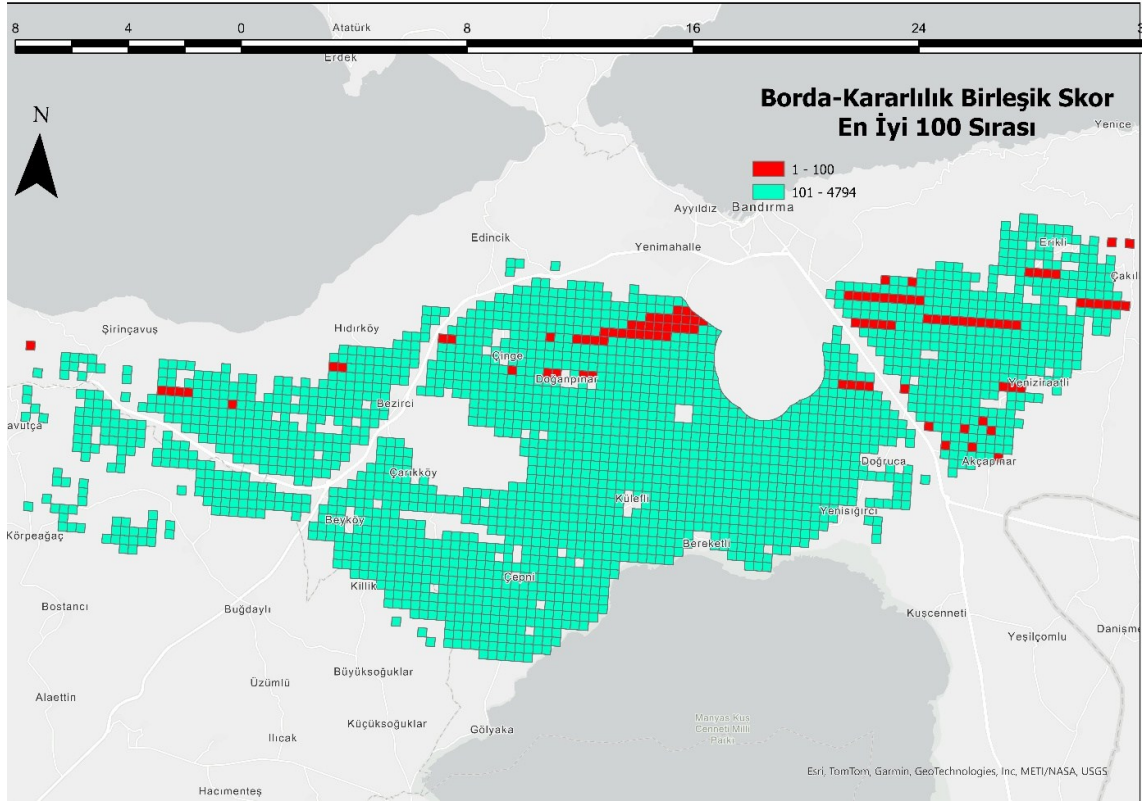
**Şekil 4.22:** Kararlılık indeksi en düşük ilk 100 alternatifin (2. bölüm) mekânsal dağılımı.

Farklı alt bölgelerde küçük kümeler halinde dağılan bu alanlar, yöntem duyarlılığının yüksek olduğu gridleri temsil etmektedir. Bu durum, söz konusu bölgelerde kriterler arası etkileşimin daha heterojen ve yer yer çatışmalı olduğunu, dolayısıyla farklı karar modellerinin alternatifleri farklı biçimlerde konumlandığını göstermektedir. Mekânsal olarak bakıldığında kararsızlık örüntüsü, belirli bir coğrafi eksen boyunca yoğunlaşmaktan ziyade, karar uzayındaki belirsizliğin farklı alt bölgelerde yerel olarak ortaya çıktığını göstermektedir.

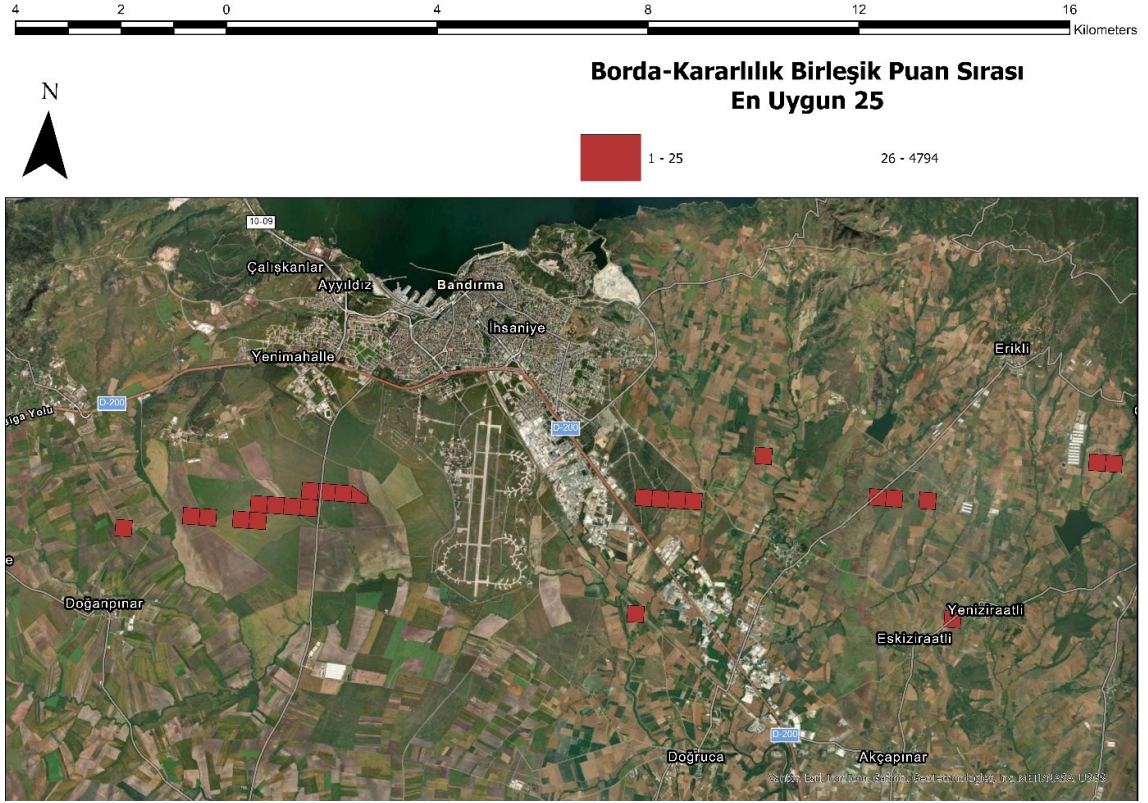
#### 4.1.10.3 Performans ve kararlılık entegrasyonu: birleşik skor yaklaşımı

Yalnızca performans boyutunu görmek amacıyla Borda sayım yöntemi uygulanmış ve ilk 100 alternatif Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Bu haritada doğu aksında belirgin bantlaşma ve kompakt kümelenmeler görülmektedir. Ancak bu dağılım yalnızca görelî performansı yansıtmaktadır; yöntemler arası sıralama tutarlılığına ilişkin bilgi içermemektedir.





**Şekil 4.24:** Borda–Kararlılık birleşik skoru altında belirlenen en iyi 100 alternatifin mekânsal dağılımı.



**Şekil 4.25:** Birleşik karar çerçevesi altında nihai optimum (Top-25) alternatiflerin mekânsal yoğunlaşma deseni.

Tüm haritalar birlikte değerlendirildiğinde üç temel sonuç ortaya çıkmaktadır:

1. Doğruca–Yeniziraatlı–Akçapınar hattı hem performans hem kararlılık açısından istikrarlı bir mekânsal çekirdek oluşturmaktadır.
2. Marmara OSB–Çarikköy çevresi yöntem duyarlılığı göstermekte ve bazı modellerde öne çıkarken bazılarında geride kalmaktadır.
3. Performans ve kararlılığın birlikte değerlendirilmesi, karar uzayındaki belirsizliği azaltarak daha güvenilir bir mekânsal çözüm kümesi üretmektedir.

Bu sonuçlar, CBS tabanlı mekânsal karar analizlerinde yalnızca performans sıralamasının yeterli olmadığını; sıralama kararlılığının karar güvenilirliği açısından tamamlayıcı ve filtreleyici bir rol üstlendiğini göstermektedir. Bütünleşik yaklaşım, mekânsal karar destek sürecinde yöntem duyarlılığını minimize eden ve daha sağlam bir nihai alan seçimi sağlayan bir çerçeve sunmaktadır.

## 4.2 Yenilenebilir destekli hidrojen üretiminin tekno-ekonomik analizi

Yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim sistemlerinde performans yalnızca kurulu güç büyüklükleri ile değil, üretim profillerinin zaman içindeki dağılımı ve elektrik fiyat dinamikleri ile birlikte değerlendirilmelidir. Fotovoltaik sistemler gün içi ışınım değişimlerine bağlı olarak belirgin bir gündüz üretim karakteristiği sergilerken, rüzgâr türbinleri daha düzensiz ancak çoğu durumda gece saatlerinde de üretim sağlayabilen bir yapı göstermektedir. Bununla birlikte, elektrolizör yükü yalnızca üretim varlığına değil, aynı zamanda şebeke elektrik fiyatının saatlik değişimine de duyarlıdır. Bu nedenle hibrit PV–RT konfigürasyonunun performansı, üretim tamamlayıcılığı kadar fiyat–üretim etkileşimi bağlamında da ele alınmalıdır.

Bu bölümde, 8760 saatlik meteorolojik veriler ile saatlik Elektrik Satın Alma Anlaşması (PPA) kapsamında belirlenen elektrik fiyat profili birlikte değerlendirilerek hibrit sistemin zaman eksenindeki davranışı analiz edilmiştir. Amaç, PV ve RT kaynaklarının birbirini hangi zaman dilimlerinde tamamladığını ve bu tamamlayıcılığın elektrolizör işletimi ile LCOH ve RenF üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu analiz, takip eden çok amaçlı optimizasyon bölümünün gerekçelendirilmesini sağlayacak temel performans eğilimlerini tanımlamaktadır.

Elde edilen bulgular, üretim kaynaklarının tekil değerlendirilmesinin sistem performansını açıklamakta yetersiz kalabileceğini, PV–RT oranının ve elektrik fiyatının birlikte dikkate alınmasının tasarım kararları açısından belirleyici olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu bölüm, hibrit konfigürasyonun zamansal ve ekonomik boyutta nasıl bir davranış sergilediğini ortaya koyarak optimizasyon probleminin matematiksel çerçevesine geçişi hazırlamaktadır.

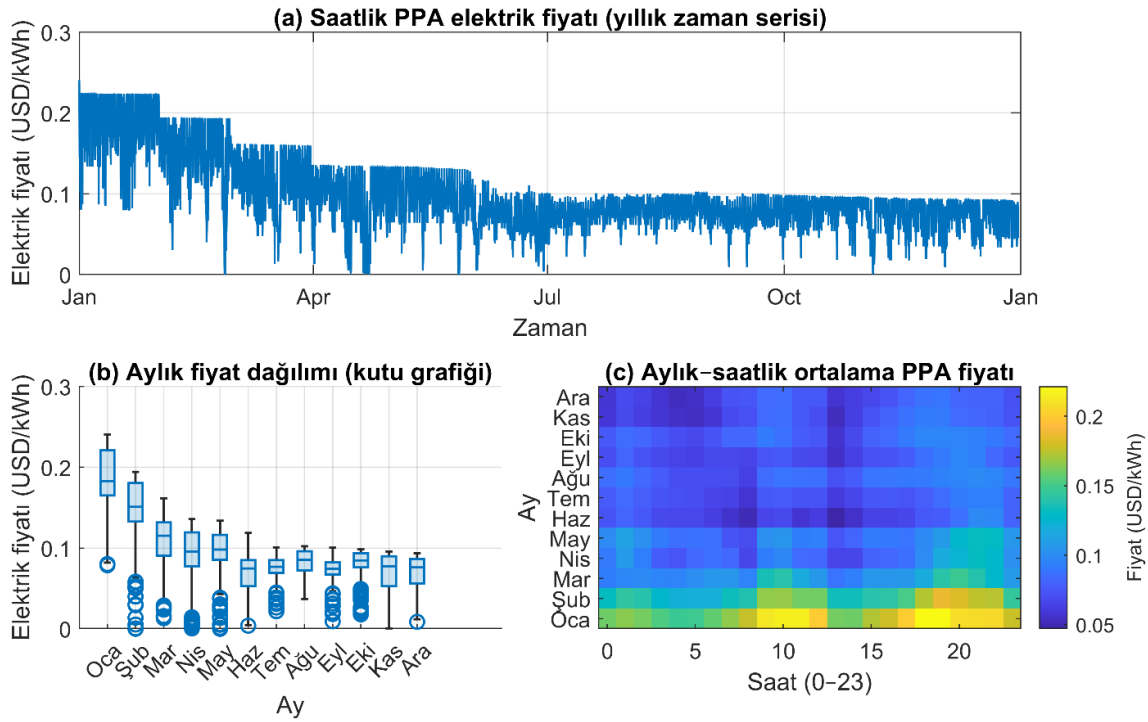
### 4.2.1 Balıkesir lokasyonu için 8760 saatlik kaynak ve piyasa verilerinin analizi

Hidrojen üretim sisteminin performansı yalnızca kurulu güç büyüklükleri ile açıklanamaz. Özellikle saatlik çözünürlükte çalışan bir model söz konusu olduğunda, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının zamansal değişkenliği hem de elektrik fiyatının saatlik dalgalanması sistem davranışını doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle optimizasyon aşamasına geçmeden önce, seçilen lokasyona ait 8760 saatlik PPA elektrik fiyat profili ile 1 MW kurulu güce sahip PV ve rüzgâr türbini sistemlerinin yıllık performans karakteristikleri birlikte

incelenmiştir. Bu değerlendirme, sistemin içinde çalıştığı fiziksel ve ekonomik ortamı ortaya koymak açısından temel teşkil etmektedir.

#### 4.2.1.1 2024 Yılı EÜAŞ PPA elektrik fiyatının saatlik değişimi

Şekil 4.26’da simülasyonlarda kullanılan 2025 yılına ait EÜAŞ PPA elektrik fiyatının saatlik zaman serisi, aylık dağılımı ve aylık-saatlik ortalama haritası sunulmaktadır.



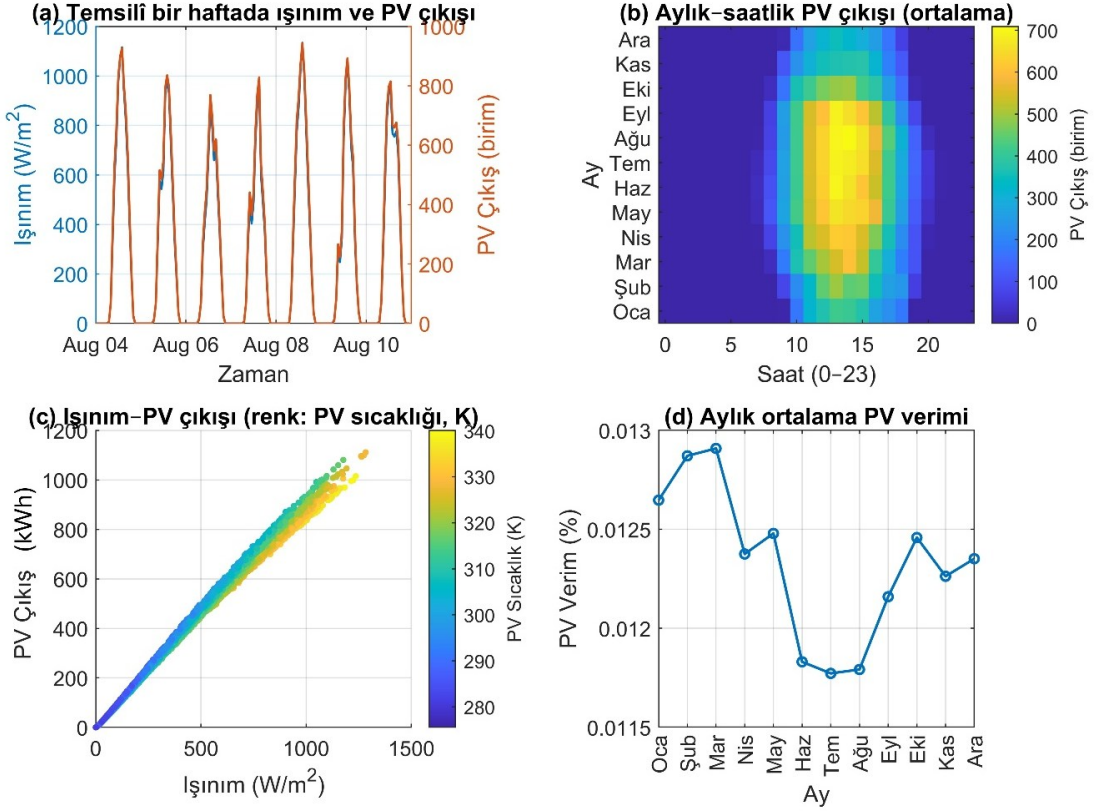
Şekil 4.26: 8760 Saatlik PPA Elektrik Fiyatı Profili.

Yıllık zaman serisi incelendiğinde fiyatın yıl boyunca sabit bir seviyede kalmadığı, özellikle yılın ilk aylarında daha yüksek ortalama değerlere sahip olduğu görülmektedir. Yaz aylarına doğru fiyat seviyesinde belirgin bir düşüş ve görece daha dar bir dalgalanma bandı oluşmaktadır. Aylık dağılım grafiği bu eğilimi desteklemektedir. Kış aylarında medyan fiyatın daha yüksek olduğu, yaz döneminde ise fiyatın daha düşük bir bantta yoğunlaştığı görülmektedir. Aylık-saatlik ortalama harita incelendiğinde ise gün içi davranış açıkça ortaya çıkmaktadır: Sabah ve akşam saatlerinde fiyat yükselmekte, gün ortasında nispeten düşmektedir. Bu durum özellikle PV üretim zamanlaması ile birlikte değerlendirildiğinde önem kazanmaktadır. Çünkü sistem ekonomisi yalnızca enerji üretimine değil, üretimin gerçekleştiği saatlerdeki fiyat seviyesine de bağlıdır. Bu çalışmada şebekeden temin edilen elektriğin yenilenebilir enerji katkısı tamamen sıfır kabul edilmemiş; şebeke elektrik karışımında %50 yenilenebilir enerji payı bulunduğu varsayılmıştır. Böylece şebeke destekli

senaryolarda yenilenebilir enerji oranı hesaplanırken, yalnızca saha içi PV ve rüzgâr üretimi değil, şebeke elektriğinin yenilenebilir içerik katkısı da dikkate alınmıştır.

#### 4.2.1.2 Balıkesir lokasyonu için PV sisteminin 8760 saatlik performansı

Şekil 4.27’de Balıkesir lokasyonuna ait meteorolojik veriler kullanılarak hesaplanan 1 MW kurulu güce sahip PV sisteminin yıllık performans özeti verilmektedir.



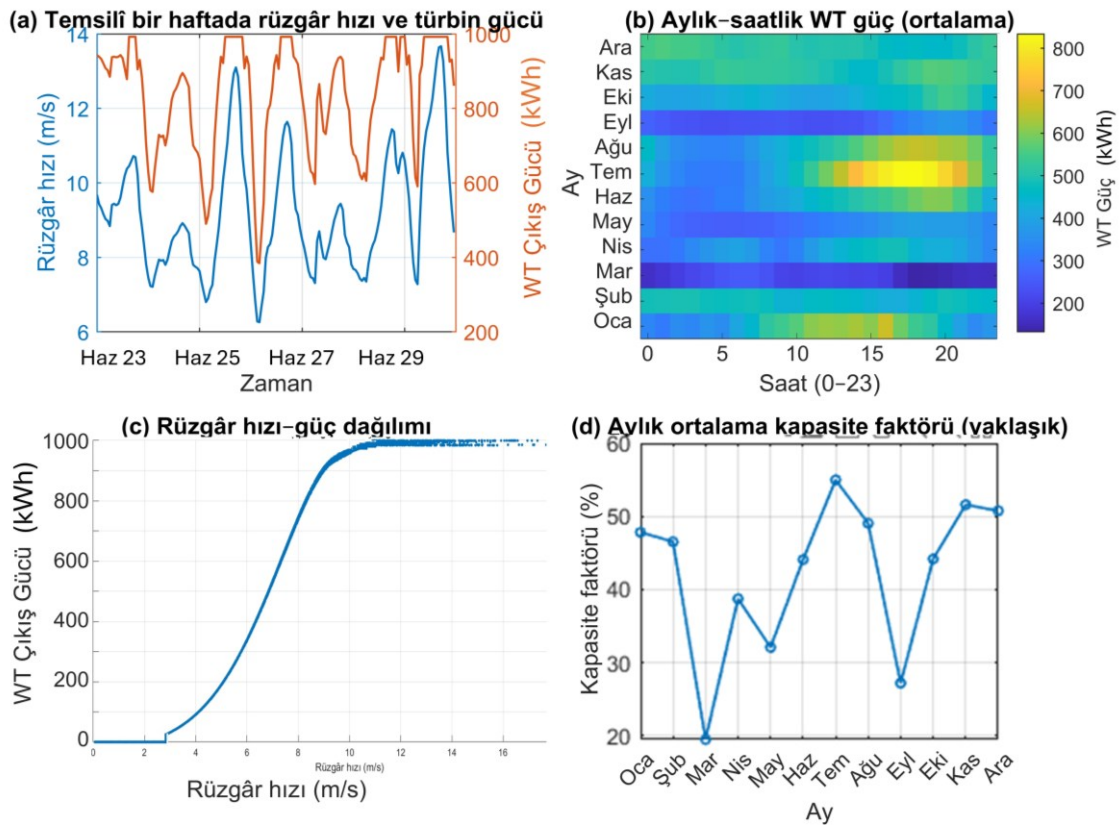
**Şekil 4.27:** Balıkesir lokasyonu için 1 MW kurulu güce sahip fotovoltaik (PV) sisteminin 8760 saatlik performansının özetlenmesi: (a) temsili bir haftada ışınım ve PV çıkışı değişimi, (b) aylık-saatlik ortalama PV üretim dağılımı, (c) ışınım ile PV çıkışı arasındaki ilişki (renk: PV modül sıcaklığı), (d) aylık ortalama PV verimi.

Haftalık grafikte ışınım ile PV çıkışı arasındaki güçlü korelasyon açıkça görülmektedir. Üretim yalnızca gündüz saatlerinde gerçekleşmekte ve öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu davranış Balıkesir’in yaz döneminde yüksek güneşlenme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Aylık-saatlik ortalama üretim haritası yaz aylarında üretimin belirgin şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Özellikle Haziran-Temmuz döneminde hem üretim süresi hem de güç seviyesi maksimuma ulaşmaktadır. Buna karşılık

kış aylarında üretim hem daha kısa süreli hem de daha düşük seviyededir. Işınım–çıkış dağılım grafiğinde modül sıcaklığının artışı ile verimde sınırlı bir düşüş olduğu görülmektedir. Aylık ortalama verim grafiğinde yaz aylarında küçük bir gerileme gözlenmesine rağmen toplam üretim en yüksek seviyededir. Bu bilgiler ışığında, Balıkesir lokasyonunda PV üretimi güçlü olmakla birlikte, zamansal olarak gün ortası saatlerine yoğunlaşmış bir yapı göstermektedir.

#### 4.2.1.3 Balıkesir lokasyonu için 8760 saatlik rüzgâr türbini performansı

Şekil 4.28’de Balıkesir lokasyonu için 1 MW kurulu güce sahip rüzgâr türbininin performansı özetlenmektedir.



**Şekil 4.28:** Balıkesir lokasyonu için 1 MW kurulu güce sahip rüzgâr türbininin performansının özetlenmesi: (a) temsili bir haftada rüzgâr hızı ve türbin güç çıkışı değişimi, (b) aylık-saatlik ortalama rüzgâr türbini güç üretim dağılımı, (c) rüzgâr hızı ile güç çıkışı arasındaki doğrusal olmayan ilişki (güç eğrisi), (d) aylık ortalama kapasite faktörü değişimi.

Rüzgâr hızındaki değişimin türbin güç çıkışına doğrusal olmayan biçimde yansıdığı görülmekte; türbinin belirli bir kesme hızının üzerinde üretime başladığı, hız arttıkça güç

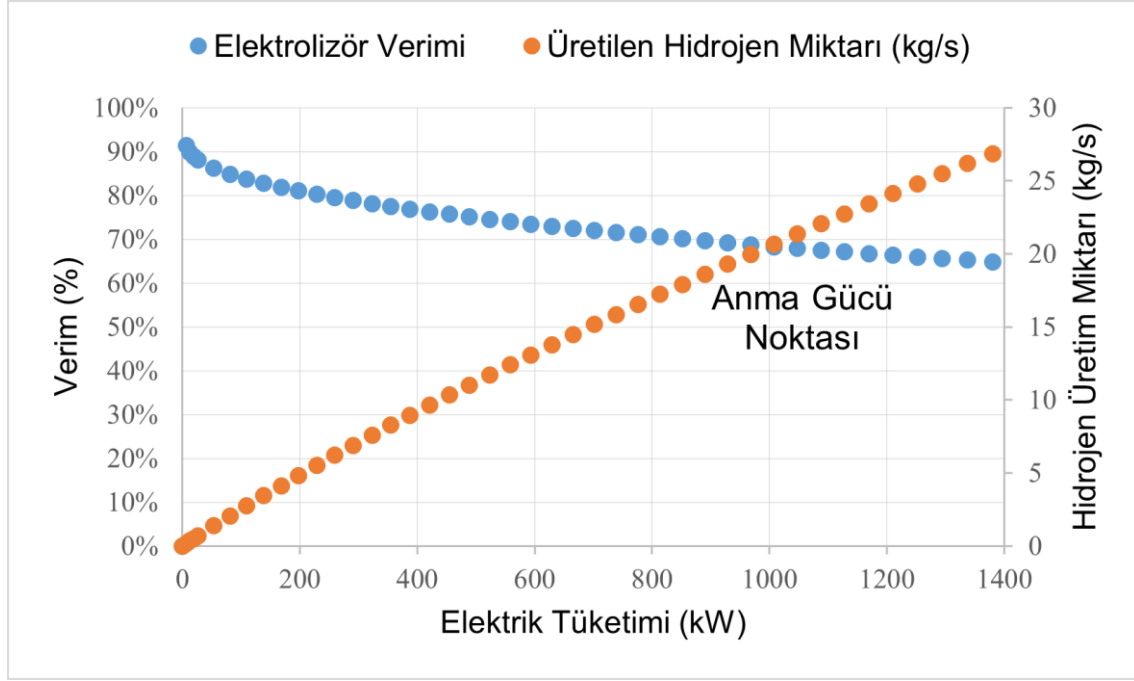
çıkışının yükseldiği ve nominal bölgede sabitlendiği anlaşılmaktadır. Aylık kapasite faktörü sonuçları Balıkesir’de özellikle kış ve geçiş aylarında daha yüksek rüzgâr potansiyeline işaret ederken, aylık-saatlik ortalama güç dağılımı rüzgâr üretiminin gece saatlerinde de sürdüğünü göstermektedir. Bu durum, PV sisteminden farklı olarak, güneş üretiminin olmadığı saatlerde sistemin çalışmaya devam etmesine katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, PV ve rüzgâr kaynaklarının zamansal olarak tamamlayıcı bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır; PV üretimi yaz ayları ve gün ortasında yoğunlaşırken, rüzgâr üretimi daha çok kış aylarında ve gece saatlerinde öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, 2025 yılı PPA fiyat profiline üretim zamanlaması ile tam örtüşmediği, özellikle PV üretiminin yüksek olduğu yaz döneminde fiyat seviyelerinin görece düşük kalması nedeniyle fazla üretimin ekonomik değerinin sınırlanabildiği görülmektedir. Dolayısıyla hibrit sistem performansının yalnızca toplam üretim miktarına değil, üretim ile fiyatın zaman eksenindeki uyumuna bağlı olarak şekillendiği anlaşılmakta olup, bu çerçevede tekno-ekonomik analizler kapsamında farklı PV-RT kurulu güç kombinasyonlarının LCOH ve yenilenebilir enerji oranı üzerindeki etkileri tasarım uzayı yaklaşımıyla detaylı olarak incelenmiştir.

#### **4.2.2 PEM elektrolizörün kısmi yük performans analizi**

Hibrit PV-RT ve şebeke (PPA) ile beslenen sistemin hidrojen üretim kapasitesi, 1 MW anma gücüne sahip PEM elektrolizör modeli üzerinden değerlendirilmiştir. Elektrolizörün yıllık işletme performansı yalnızca toplam elektrik enerjisine değil, bu enerjinin yıl boyunca hangi güç seviyelerinde elektrolizöre aktarılabildiğine de bağlıdır. PV üretiminin gün içinde belirli saatlerde yoğunlaşması ve rüzgârın değişken karakteri düşünüldüğünde, elektrolizörün yılın dikkate değer bir kısmında tam yükte değil, farklı kısmi yük seviyelerinde çalışması beklenir. Bu nedenle tüm sistem optimizasyonuna geçmeden önce, elektrolizörün part-load davranışı netleştirilmiş; yani farklı elektrik tüketimi seviyelerinde verimin nasıl değiştiği ve birim zamanda hidrojen üretiminin nasıl arttığı ortaya konulmuştur.

Şekil 4.29’da elektrik tüketimi arttıkça iki temel çıktının birlikte değişimi verilmiştir: elektrolizör verimi (%) ve üretilen hidrojen miktarı (kg/s). Grafik genel olarak iki dikkate değer eğilimi ortaya koymaktadır. Birincisi, düşük güç seviyelerinde elektrolizör veriminin daha yüksek bir bantta başladığı ve yük arttıkça verimin kademeli biçimde azaldığıdır. Bu, PEM elektrolizörlerin pratik işletmesinde sık görülen bir karakterdir: güç yükseldikçe hücre gerilimi ve kayıpların etkisi daha belirgin hale gelir ve verim eğrisi aşağı yönlü bir eğilim gösterir. İkincisi ise hidrojen üretim miktarının elektrik tüketimi ile beklenildiği şekilde

arttıdır. Turuncu seri, tüketim yükseldikçe hidrojen üretiminin artış eğilimini açık biçimde ortaya koyar; bu da yıl içindeki saatlik güç girişinin hidrojen debisini doğrudan “sürüklediğini” gösterir.



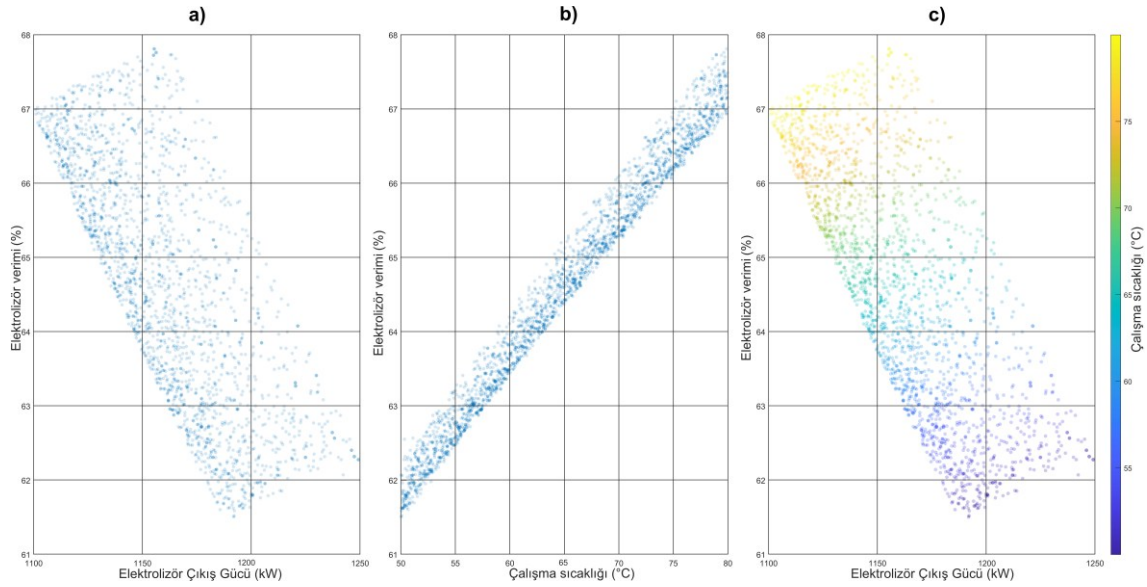
**Şekil 4.29:** PEM elektrolizörde elektrik tüketimine bağlı verim ve hidrojen üretiminin değişimi.

Şekil üzerinde ayrıca “Anma Gücü Noktası” işaretlenmiştir. Bu nokta, elektrolizörün nominal çalışma bölgesini temsil etmekte olup sistem tasarımı açısından temel bir referans oluşturmaktadır. Ancak hibrit üretim yapısı gereği elektrolizörün yıl boyunca sürekli bu noktada çalıştırılması gerçekçi değildir; sistem, bazı saatlerde kısmi yükte çalışırken, bazı saatlerde ise yenilenebilir üretim fazlası veya şebeke desteği ile daha yüksek güç seviyelerine yaklaşabilmektedir. Elektrolizöre aktarılan elektrik tüketimi ise doğrudan hücrelerde uygulanan akım yoğunluğuna bağlıdır ve bu durum hidrojen üretim hızı ile verim davranışını belirleyen temel fiziksel mekanizmayı oluşturmaktadır. Bu nedenle kısmi yük eğrileri, sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek LCOH ve yenilenebilir enerji oranı (RenF) analizleri için temel bir referans sağlamaktadır. Aynı toplam enerji girdisinin farklı saatlik güç dağılımları ile elektrolizöre iletilmesi durumunda, üretim miktarı ve verim değerleri farklılaşabilmektedir. Bu bağlamda, PV–RT üretim dalgalanmaları ile Elektrik Satın Alma Anlaşması fiyat profilinin zaman içindeki değişimi birlikte değerlendirildiğinde, elektrolizörün hangi saatlerde ve hangi güç seviyelerinde işletildiği hem toplam hidrojen

üretimini hem de birim hidrojen maliyetini belirleyen etkili bir işletme parametresi olarak ortaya çıkmaktadır.

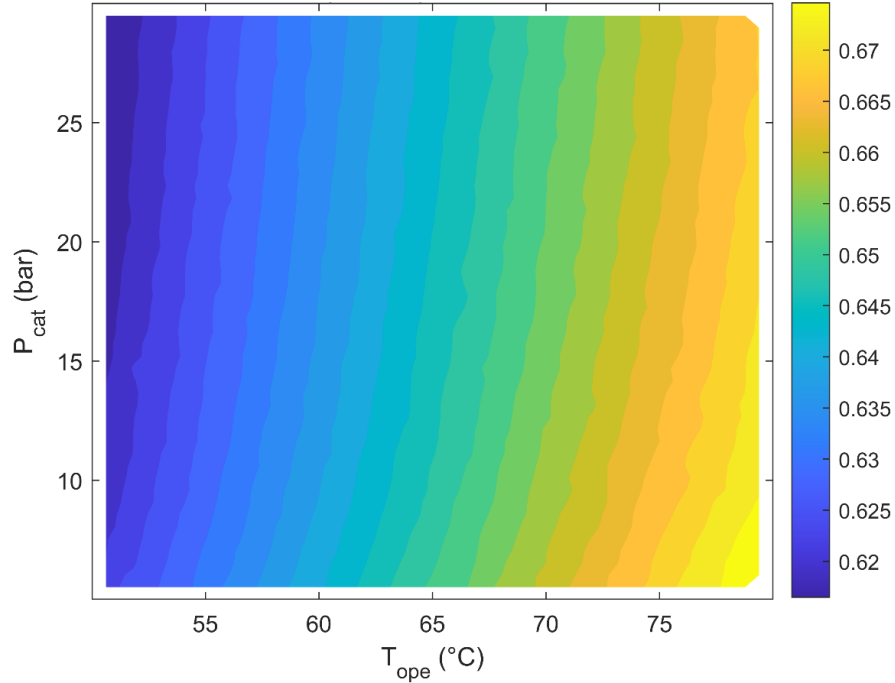
#### 4.2.3 Elektrolizör işletme parametrelerinin parametrik etkisi

Elektrolizörün saatlik güç girişine verdiği yanıt kadar, elektrolizörün hangi işletme koşullarında çalıştırıldığı da (özellikle sıcaklık ve basınç) sistem performansını belirleyen ikinci bir katmandır. Bu nedenle tüm sistemi optimize etmeden önce, 1 MW PEM elektrolizör için işletme parametrelerinin verim ve çıkış gücü üzerindeki etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Şekil 4.30'da elektrolizörün farklı çalışma noktalarından elde edilen dağılımlar üç bakış açısı ile temsil edilmektedir: (a) çıkış gücü–verim ilişkisi, (b) çalışma sıcaklığı–verim ilişkisi ve (c) çıkış gücü–verim ilişkisinin çalışma sıcaklığı ile renklendirilmiş hali. Bu üçlü gösterim, verimin tek bir değişkenle açıklanmadığını; güç seviyesi ve sıcaklık birlikte değiştiğinde verim davranışının farklı bantlara taşındığını pratik biçimde anlatır. Özellikle sıcaklık–verim grafiğinde verimin sıcaklıkla birlikte belirgin bir eğilim gösterdiği görülürken, çıkış gücü–verim dağılımı verimin güç seviyesine göre de farklılaştığını ortaya koymaktadır. Renkli gösterimde sıcaklığın devreye girdiği bölgeler daha net seçilir; aynı güç bandında farklı sıcaklıkların verimi yukarı/aşağı taşıması, işletme parametrelerinin optimizasyon açısından neden etkili olduğunu doğrudan gösterir.



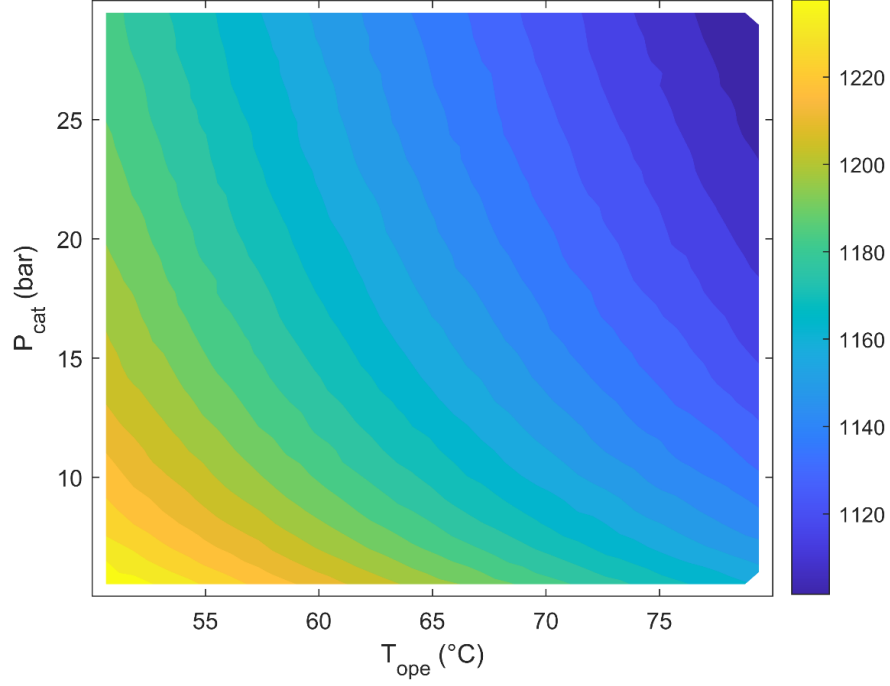
**Şekil 4.30:** 1 MW PEM elektrolizör için parametrik tarama sonuçları: (a) çıkış gücü–verim ilişkisi, (b) çalışma sıcaklığı–verim ilişkisi, (c) çıkış gücü–verim dağılımının çalışma sıcaklığına göre renklendirilmiş gösterimi.

Bu davranışı daha “tasarım diliyle” okumak için verim ve çıkış gücü iki ayrı kontur haritası üzerinden ayrıca görselleştirilmiştir. Şekil 4.31’de verilen verim kontur haritası, işletme sıcaklığı arttıkça verimin yükseldiğini; basıncın ise bu aralıkta daha sınırlı ama yine de hissedilir bir etkide bulunduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.31:** PEM elektrolizör için işletme sıcaklığı ve basınca bağlı verim (eff\_out) kontur haritası.

Buna karşılık Şekil 4.32’deki güç (P\_out) kontur haritası, sıcaklık ve basınç arttıkça çıkış gücü tarafında ters yönlü bir eğilimin ortaya çıkabildiğini göstermektedir. Yani bir bölgede verim artarken, aynı bölgede güç/çıkış karakteri aynı ölçüde avantajlı kalmayabilir. Bu iki harita birlikte okunduğunda, elektrolizör işletmesinde tek hedefli (sadece verimi büyütme gibi) bir yaklaşımın her zaman doğru sonuç vermeyebileceği; verim, güç ve dolayısıyla hidrojen üretimi arasında bir denge problemi bulunduğu anlaşılır.



**Şekil 4.32:** PEM elektrolizör için işletme sıcaklığı ve basınca bağlı çıkış gücü ( $P_{out}$ ) kontur haritası.

Şekil 4.30 a)'da elektrolizör çıkış gücü ile verim arasındaki ilişki görülmektedir. Nokta dağılımı incelendiğinde verimin tek bir doğru boyunca ilerlemediği, belirli bir bant içinde yayıldığı dikkat çekmektedir. Bu bant yapısı şunu gösterir: aynı güç seviyesinde bile verim sabit değildir; sistem farklı sıcaklık koşullarında farklı verim değerleri üretebilmektedir. Özellikle daha yüksek çıkış gücü bölgelerine gidildikçe verim değerlerinde genel bir düşüş eğilimi gözlenmektedir. Bu durum, kısmi yük analizinde görülen eğilimle tutarlıdır ve artan yüklerle birlikte hücre kayıplarının daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Şekil 4.30 b)'de ise doğrudan çalışma sıcaklığı ile verim arasındaki ilişki verilmiştir. Bu grafik oldukça net bir eğilim ortaya koymaktadır: sıcaklık arttıkça verim artma eğilimindedir. Noktaların yaklaşık doğrusal bir bant oluşturması, sıcaklığın elektrolizör verimi üzerinde sistematik bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu fiziksel olarak da beklenen bir durumdur; sıcaklık artışı elektrokimyasal reaksiyon kinetiğini iyileştirerek hücre içi kayıpları azaltabilmektedir. Ancak burada dikkate değer olan, sıcaklık artışının tek başına “sınırsız iyileşme” anlamına gelmemesidir; çünkü sistemin diğer çıktıları da aynı anda değişmektedir.

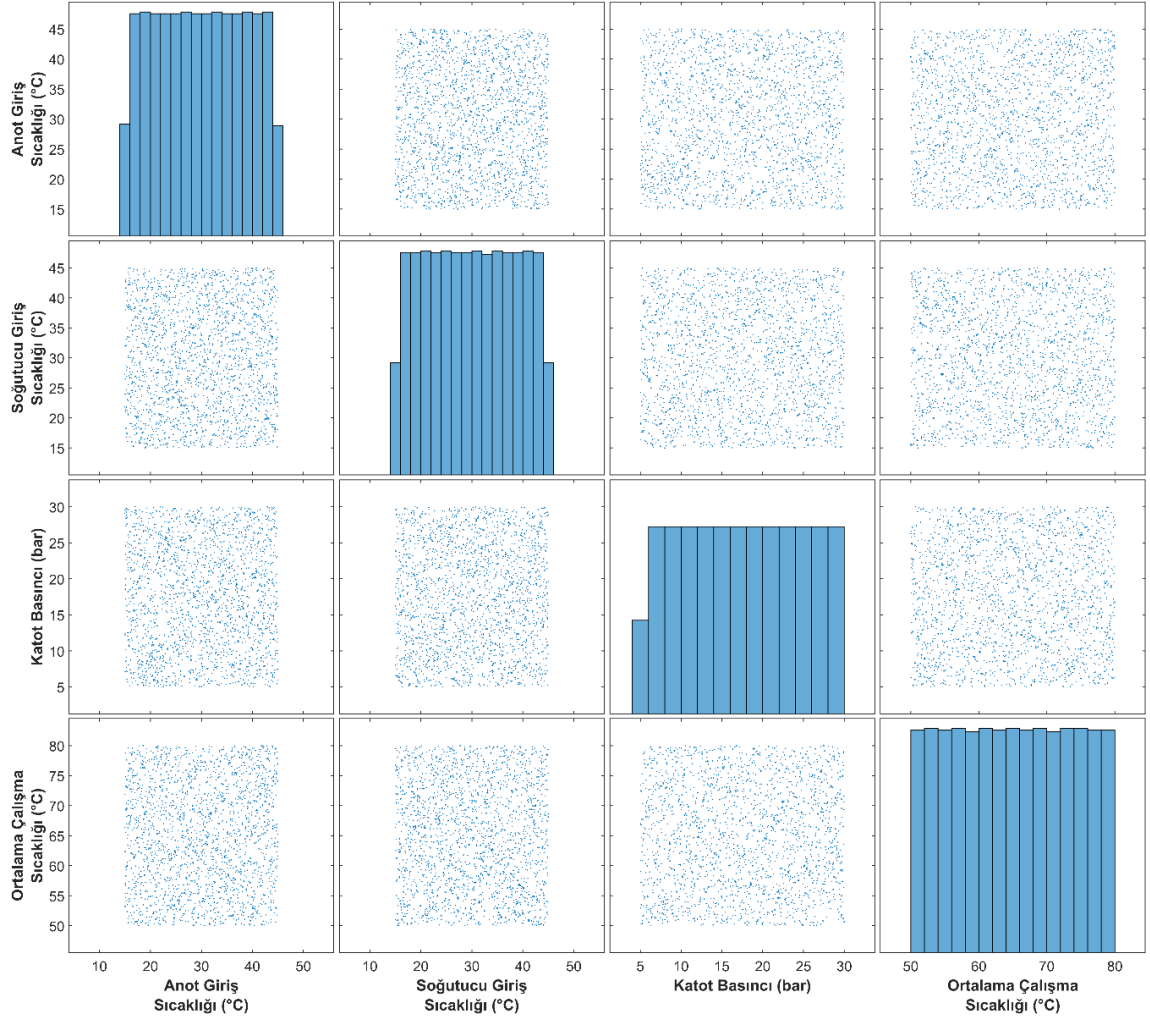
Şekil 4.30 c)'deki grafik aslında ilk iki grafiğin birleşik okumasıdır. Burada çıkış gücü ile verim arasındaki ilişki, çalışma sıcaklığına göre renklendirilmiştir. Renk dağılımı dikkatle incelendiğinde, yüksek sıcaklık bölgelerinin (sarı tonlar) genellikle daha yüksek verim bölgelerine karşılık geldiği görülmektedir. Buna karşılık daha düşük sıcaklıklar (mavi tonlar) verim eğrisinin alt kısmında yoğunlaşmaktadır.

Bu üçlü grafik birlikte değerlendirildiğinde, elektrolizör veriminin hem çıkış gücüne hem de çalışma sıcaklığına bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Aynı güç seviyesinde farklı sıcaklıklarda farklı verim değerleri elde edilebilmekte, sıcaklık artışı verimi iyileştirirken çıkış gücü arttıkça verimin azalma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla “en yüksek verim noktası” ile “en yüksek üretim noktası” her zaman aynı parametre kombinasyonunda gerçekleşmemektedir. Bu durum, sistemin işletilmesinde doğrudan bir optimizasyon ihtiyacına işaret etmektedir. Hibrit PV–RT ve PPA ile beslenen bir yapıda elektrolizöre gelen güç saatlik olarak değiştiğinden, sabit işletme koşullarında çalıştırılması bazı zaman dilimlerinde potansiyel verim kazanımlarının kaçırılmasına, bazı durumlarda ise gereksiz kayıpların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, tüm sistem optimizasyonuna geçmeden önce elektrolizörün işletme parametrelerinin uygun şekilde optimize edilmesi etkili bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

#### **4.2.4 Elektrolizör çalışma parametrelerinin çok amaçlı optimizasyon sonuçları**

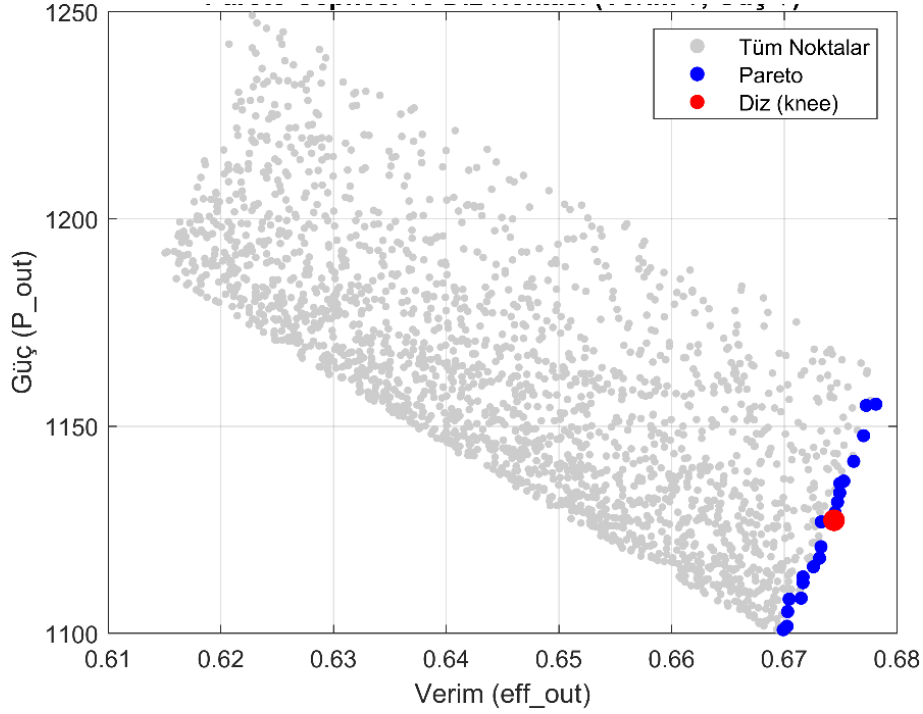
Bu bölümde, elektrolizörün çalışma koşullarının belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon analizinin sonuçları sunulmaktadır. Analiz kapsamında, elektrolizör performansını doğrudan etkileyen anot giriş sıcaklığı, soğutucu giriş sıcaklığı, katot basıncı ve ortalama çalışma sıcaklığı olmak üzere dört temel işletme parametresi ele alınmıştır. Amaç fonksiyonları olarak sistem veriminin ( $\eta$ ) maksimize edilmesi ve güç tüketiminin ( $P_{out}$ ) minimize edilmesi esas alınmıştır.

Latin Hiper Küp Örnekleme yöntemi ile oluşturulan 2000 adet parametre kombinasyonunun dağılımı Şekil 4.33'te sunulmaktadır. Bu şekil, her bir parametrenin tanımlanan aralıklar boyunca homojen biçimde temsil edildiğini ve örnekleme sürecinin istatistiksel açıdan dengeli olduğunu açıkça göstermektedir. Böylece, elde edilen sonuçların belirli bölgelerde kümelenme veya örnekleme yanlılığı içermediği doğrulanmıştır.



**Şekil 4.33:** Latin Hiper Küp Örnekleme (LHS) yöntemi kullanılarak oluşturulan 2000 adet elektrolizör çalışma parametresinin ( $T_{anode}$ ,  $T_{coolant}$ ,  $P_{cat}$  ve  $T_{ope}$ ) dağılımı ve parametreler arası örnekleme dengesi.

Verim ve güç tüketimi hedeflerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesi amacıyla Pareto analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.34'te sunulmuştur. Şekilde gri noktalar tüm simülasyon sonuçlarını, mavi noktalar Pareto-dominant çözümleri ve kırmızı nokta ise diz noktasını temsil etmektedir.



**Şekil 4.34:** Verimin maksimize edilmesi ve güç tüketiminin minimize edilmesi hedefleri için elde edilen Pareto cephesi, Pareto-dominant çözümler ve diz (diz) noktası.

Pareto cephesi incelendiğinde, verim arttıkça güç tüketiminin azaldığı; ancak bu azalmanın belirli bir noktadan sonra sınırlı hale geldiği görülmektedir. Bu kırılma bölgesi, literatürde diz noktası olarak tanımlanan ve iki hedef fonksiyon arasında en dengeli ödünleşimi sağlayan çözümü ifade etmektedir.

Bu çalışmada belirlenen diz noktası; verim ( $\eta$ ): 0,6744 güç tüketimi ( $P_{out}$ ): 1127,3 değerlerine karşılık gelmektedir. Diz noktası, ne maksimum verim çözümündeki gibi görece yüksek enerji tüketimine sahiptir ne de minimum güç çözümündeki gibi verimden belirgin ölçüde ödün vermektedir. Bu nedenle, mühendislik uygulamaları açısından kararlı, dengeli ve uzun süreli işletmeye uygun bir çalışma noktası olarak değerlendirilmektedir. Optimizasyon sonuçları, her bir hedef fonksiyonun tek başına ele alınması durumunda elde edilen uç çözümleri de ortaya koymuştur. En yüksek sistem veriminin elde edildiği Eff\_max çözümünde verim %67,81 seviyesine ulaşırken güç tüketimi 1155,3 olarak hesaplanmıştır. Bu çözüm, düşük katot basıncı ve yüksek çalışma sıcaklığı ile karakterize edilmektedir. Buna karşılık, minimum güç tüketimini sağlayan P\_min çözümünde güç tüketimi 1100,9 seviyesine inerken verim %66,99 olarak hesaplanmıştır. Bu çözüm, daha yüksek katot

basıncı ile çalışmakta olup, verimde sınırlı bir düşüş pahasına enerji tüketiminde anlamlı bir azalma sağlamaktadır.

Optimizasyon sonuçları, her bir hedef fonksiyonun tek başına ele alınması durumunda elde edilen uç çözümleri de ortaya koymuştur. En yüksek sistem veriminin elde edildiği Eff\_max çözümünde verim %67,81 seviyesine ulaşırken güç tüketimi 1155,3 olarak hesaplanmıştır. Bu çözüm, düşük katot basıncı ve yüksek çalışma sıcaklığı ile karakterize edilmektedir.

Buna karşılık, minimum güç tüketimini sağlayan P\_min çözümünde güç tüketimi 1100,9 seviyesine inerken verim %66,99 olarak gerçekleşmiştir. Bu çözüm, daha yüksek katot basıncı ile çalışmakta olup, verimde sınırlı bir düşüş pahasına enerji tüketiminde anlamlı bir azalma sağlamaktadır.

Bu iki uç çözüm, elektrolizör işletiminde maksimum verim ile minimum enerji tüketimi arasında doğal bir çatışma bulunduğunu açık biçimde göstermektedir. Karar verici tercihlerini yansıtabilmek amacıyla, normalize edilmiş verim ve güç tüketimi değerleri eşit ağırlıklarla birleştirilerek kombine bir performans skoru hesaplanmıştır. Bu analiz sonucunda elde edilen Combined\_max çözümü, minimum güç tüketimi çözümü ile aynı parametre setine karşılık gelmiş ve toplam skor değeri 0,9348 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, eşit ağırlıklandırma altında güç tüketimindeki azalmanın birleşik performans üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, sistem genelinde enerji tüketiminin azaltılması, verimdeki sınırlı düşüşe kıyasla daha avantajlı bir sonuç üretmiştir.

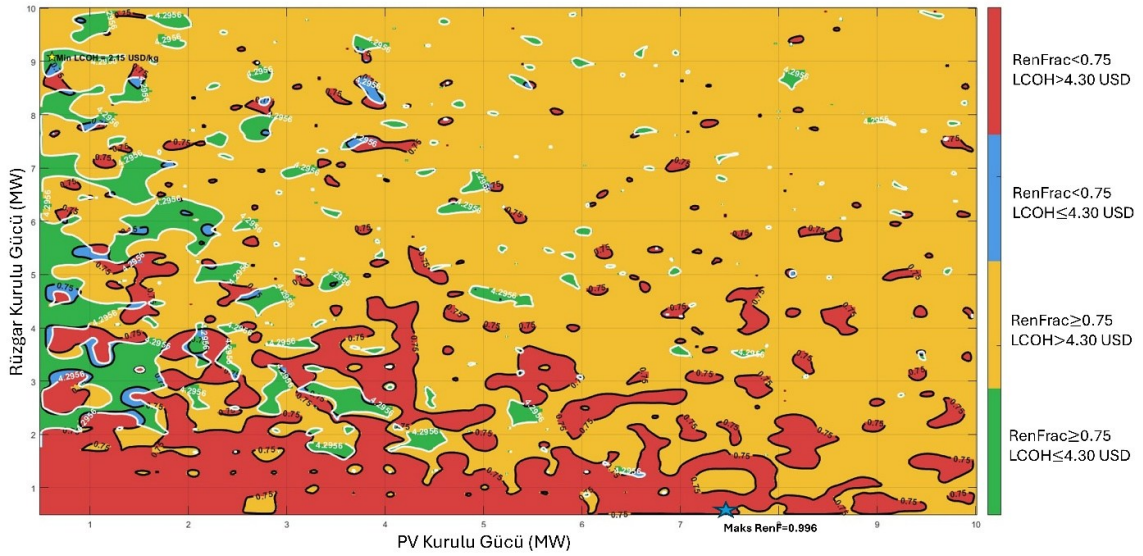
#### **4.2.5 Karar uzayında LCOH ve yenilenebilir enerji oranının (RenF) dağılımı**

Bu aşamada, PV kurulu gücü (MW) ve rüzgâr türbini kurulu gücü (MW) tasarım değişkenleri olarak ele alınmış ve her bir kombinasyon için sistem 8760 saatlik zaman serisi üzerinden simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda her bir (PV, RT) çifti için iki temel performans göstergesi elde edilmiştir:

- Hidrojenin seviyelendirilmiş maliyeti (LCOH, USD/kg)
- Yenilenebilir enerji oranı (RenF)

Şekil 4.35, bu iki çıktının karar uzayı üzerindeki birlikte dağılımını göstermektedir. Yatay eksen PV kurulu gücünü (MW), düşey eksen ise rüzgâr kurulu gücünü (MW) temsil

etmektedir. Renk bölgeleri ve kontur çizgileri kullanılarak LCOH ve RenF eş zamanlı olarak görselleştirilmiştir.



**Şekil 4.35:** PV ve RT kurulu güçlerine bağlı olarak elde edilen LCOH ve RenF değerlerinin karar uzayı üzerindeki dağılımı. Minimum LCOH ve maksimum RenF noktaları işaretlenmiştir.

Şekil 4.35'te görüldüğü üzere karar uzayı homojen bir yapı göstermemektedir. Aynı toplam kurulu güç seviyesinde bile PV-RT dağılımının farklı olması LCOH ve RenF değerlerinde belirgin değişimlere yol açmaktadır. Bu durum, sistem performansının yalnızca toplam kapasiteye değil, kapasite bileşimine de duyarlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Alt bölgelerde (düşük RT kapasitesi) kırmızı alanların yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölgelerde RenF genellikle düşük kalmakta ve aynı zamanda LCOH değerleri de görece yüksek gerçekleşmektedir. Bunun temel nedeni, yetersiz rüzgâr kapasitesi sebebiyle sistemin yıl boyunca şebekeye (PPA) daha fazla bağımlı kalmasıdır. Şebeke fiyatının 2024 yılı EÜAŞ verilerine dayalı olması nedeniyle belirli saatlerde maliyet baskısı oluşmakta ve bu durum LCOH'yi yukarı çekmektedir.

Orta ve üst bölgelerde ise özellikle PV ve RT'nin daha dengeli olduğu alanlarda yeşil bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Bu alanlar  $RenF \geq 0,75$  ve  $LCOH \leq 4,30$  USD/kg koşullarını sağlayan daha avantajlı tasarım bölgelerini temsil etmektedir. Şeklin sol üst bölgesinde işaretlenmiş olan nokta minimum LCOH değerini göstermektedir ( $\approx 2,15$  USD/kg). Bu bölge dikkat çekicidir çünkü görece düşük PV kapasitesi ile daha yüksek RT

kapasitesinin birleştiği bir noktada maliyet avantajı oluşmuştur. Bunun nedeni rüzgârın Balıkesir koşullarında daha istikrarlı üretim sağlaması ve elektrolizörün daha yüksek kapasite faktörü ile çalışabilmesidir. Ancak bu noktada RenF değeri maksimum değildir. Yani en düşük maliyet noktası ile en yüksek yenilenebilir oran noktası çakışmamaktadır. Bu durum doğrudan çok amaçlı optimizasyon gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şeklin alt sağ kısmında yıldız ile işaretlenen nokta maksimum RenF değerini göstermektedir ( $RenF \approx 0,996$ ). Bu bölge PV kapasitesinin oldukça yüksek olduğu bir tasarım alanına karşılık gelmektedir. Bu noktada sistem neredeyse tamamen yenilenebilir kaynaklarla beslenmektedir. Ancak bu tasarım maliyet açısından en iyi nokta değildir. Yüksek PV kapasitesi beraberinde yatırım maliyetini artırmakta ve LCOH üzerinde yukarı yönlü baskı oluşturmaktadır. Şekilde küçük ada şeklinde görülen renk geçişleri, sistemin doğrusal olmayan karakterini göstermektedir. Bunun temel nedeninin:

- 8760 saatlik üretim dalgalanmaları
- Elektrolizörün kısmi yük verim eğrisi
- PPA fiyatının saatlik değişimi
- Yenilenebilir üretim ile şebeke etkileşimi

olduğu düşünülmektedir. Bu faktörlerin birlikte çalışması sonucu karar uzayında düzgün bir eğim yerine parçalı ve lokal minimumlar içeren bir yapı oluşmuştur. Bu durum klasik tek değişkenli analizlerin yetersiz kalacağını ve sezgisel seçimlerin yanıltıcı olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.35 açık biçimde göstermektedir ki:

- En düşük LCOH noktası, en yüksek RenF noktasına eşit değildir.
- Yüksek yenilenebilir oranı maliyet açısından her zaman optimal değildir.
- Düşük maliyetli tasarım çevresel açıdan en iyi tasarım değildir.

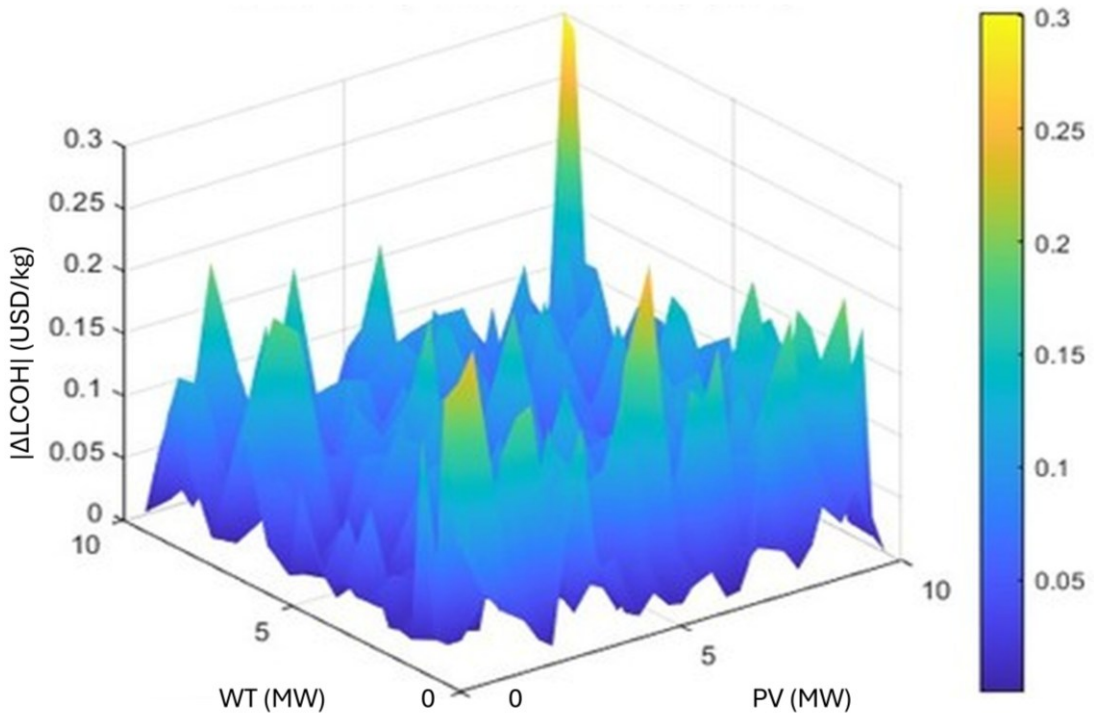
Dolayısıyla problem tek amaçlı değil, çok amaçlı bir optimizasyon problemidir. Bu nedenle sistem tasarımı, LCOH'yi minimize ederken aynı zamanda RenF'i maksimize etmeye çalışan Pareto-temelli bir yaklaşım ile ele alınmalıdır.

## **4.2.6 Tekno-Ekonomik analizlerin çok amaçlı optimizasyon sonuçları**

### **4.2.6.1 Vekil modelin doğrulanması ve güvenilirliği**

Çok amaçlı optimizasyon sürecinde, yüksek çözünürlüklü Simulink modelinin doğrudan optimizasyon döngüsü içerisinde kullanılması hesaplama süresi açısından pratik değildir. Bu nedenle PV ve RT kurulu güçleri ile elde edilen LCOH, yenilenebilir enerji oranı (RenF) ve

toplam yatırım maliyeti arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi temsil etmek üzere yapay sinir ağı tabanlı bir vekil model geliştirilmiştir. Bu model, optimizasyon algoritmalarının karar uzayında hızlı ve kararlı biçimde tarama yapabilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen YSA modelinin güvenilirliği, beş katlı çapraz doğrulama ve örneklem dışı hata analizi ile test edilmiştir. Üç gizli katmandan (64–64–32 nöron) oluşan ağ mimarisi, Levenberg–Marquardt algoritması kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim süreci 434 epok sonunda yakınsamış,  $9.98 \times 10^{-8}$  minimum gradyan ve  $2,38 \times 10^{-10}$  ortalama karesel hata (MSE) değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.36’da verilen bu sonuçlar, modelin sayısal kararlılığının ve yakınsama başarısının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.36:** Eğitilmiş yapay sinir ağı modelinin örneklem dışı LCOH tahmin hatası yüzeyi.

Doğrulama sonuçları, tüm çıktı değişkenleri için çok yüksek tahmin doğruluğu elde edildiğini ortaya koymuştur. LCOH için ortalama mutlak hata (MAE) 0,0031 USD/kg ve kök ortalama kare hata (RMSE) 0,0096 USD/kg olarak hesaplanırken; yenilenebilir enerji payı için MAE ve RMSE değerleri sırasıyla 0.0001 ve 0.0003 olarak bulunmuştur. Toplam yatırım maliyeti için ise MAE =  $4,2 \times 10^3$  USD ve RMSE =  $1,1 \times 10^4$  USD düzeyindedir. Bu değerler, tüm tasarım uzayı genelinde %0,5’in altında sapmalara karşılık gelmekte olup, vekil modelin yüksek genelleme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Örneklem dışı hata dağılımları incelendiğinde, LCOH tahmin hatasının büyük ölçüde  $\pm 0,05$  USD/kg sınırları içerisinde kaldığı, yalnızca yüksek kapasiteli ve nispeten az örneklenen bölgelerde

sınırlı lokal sapmalar ( $\sim 0,3$  USD/kg) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, hata yayılımı dikkate alınarak oluşturulan %95 güven aralıklı Pareto ön yüzü (Şekil 4.36), LCOH için  $\pm 0,1$  USD/kg'dan daha dar bir belirsizlik bandı sunmuştur. Bu durum, YSA tabanlı yaklaşımın tasarım uzayının genel Pareto eğilimini temsil etmede yeterli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek kapasiteli ve daha az örneklenen bölgelerde yaklaşık 0,3 USD/kg düzeyine ulaşabilen lokal sapmalar, özellikle LCOH değerleri birbirine yakın Pareto çözümleri arasında nihai seçim yapılırken dikkate alınmalıdır. Bu nedenle vekil model optimizasyon sürecinde güvenilir bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılmış; ancak sınır bölgelerdeki veya birbirine yakın aday çözümlerin doğrudan MATLAB/Simulink simülasyonu ile yeniden kontrol edilmesi gerekli görülmüştür.

#### 4.2.6.2 Lokasyon bazlı çok amaçlı optimizasyon sonuçları

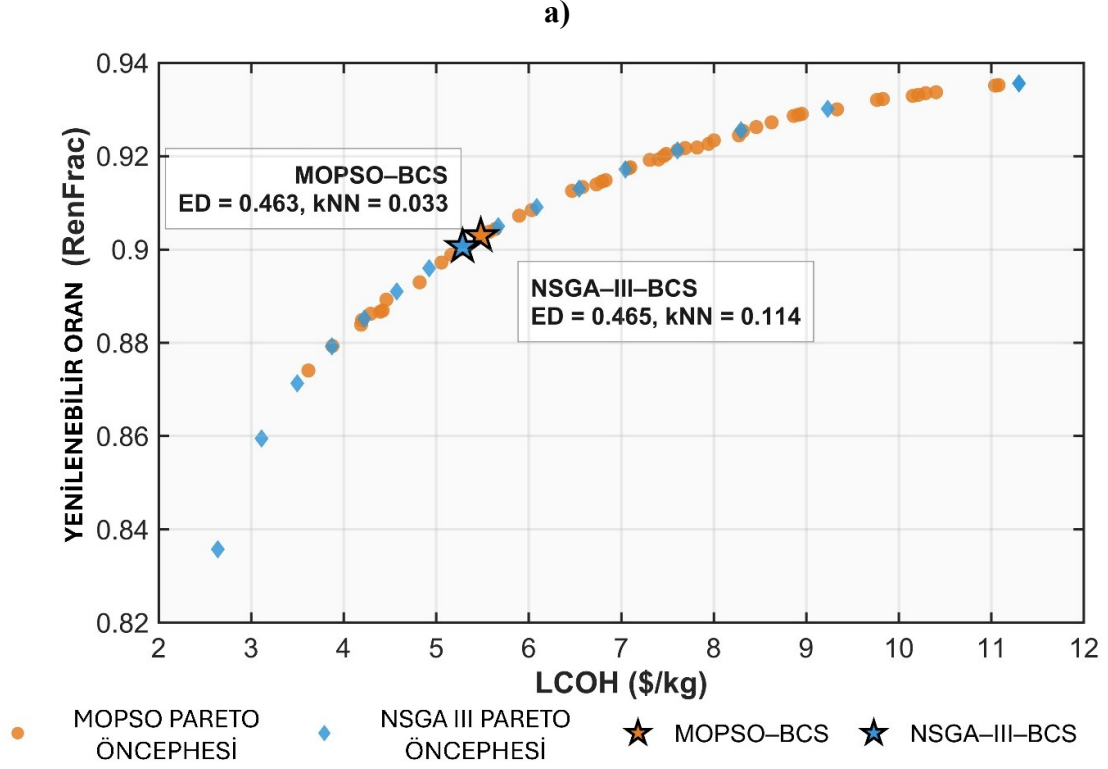
Bu bölümde; Bandırma, Çeşme ve Mersin lokasyonları için gerçekleştirilen iki amaçlı optimizasyon çalışmaları kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Amaç fonksiyonları olarak LCOH minimizasyonu ve RenF maksimizasyonu dikkate alınmış; her bir lokasyon için MOPSO ve NSGA-III algoritmaları kullanılarak Pareto-optimal çözüm kümeleri elde edilmiştir. Analiz yalnızca en düşük maliyetli veya en yüksek yenilenebilir oranlı çözümlerin karşılaştırılması ile sınırlı tutulmamış; çok amaçlı optimizasyonun doğası gereği oluşan maliyet–yenilenebilirlik ödünleşim yapısı hem görsel hem de nicel metrikler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda üç farklı analiz katmanı dikkate alınmıştır:

- (i) Pareto ön yüzlerinin geometrik ve görsel karakteri,
- (ii) Ütopya noktasına uzaklık (ED) ve yerel yoğunluk (kNN) göstergeleri üzerinden belirlenen en iyi uzlaşım çözümleri (BCS),
- (iii) Hypervolume, Spacing ( $\Delta$ ) ve ortalama ütopya mesafesi gibi küresel Pareto kalite metrikleri ile algoritmik performans analizi.

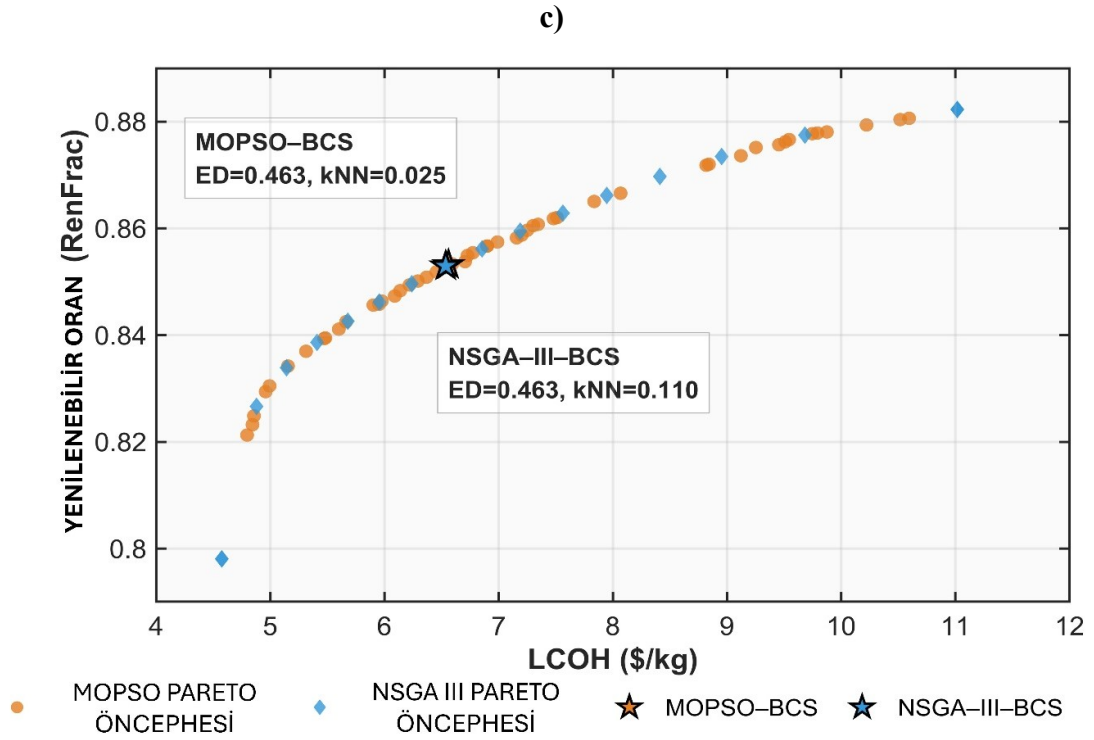
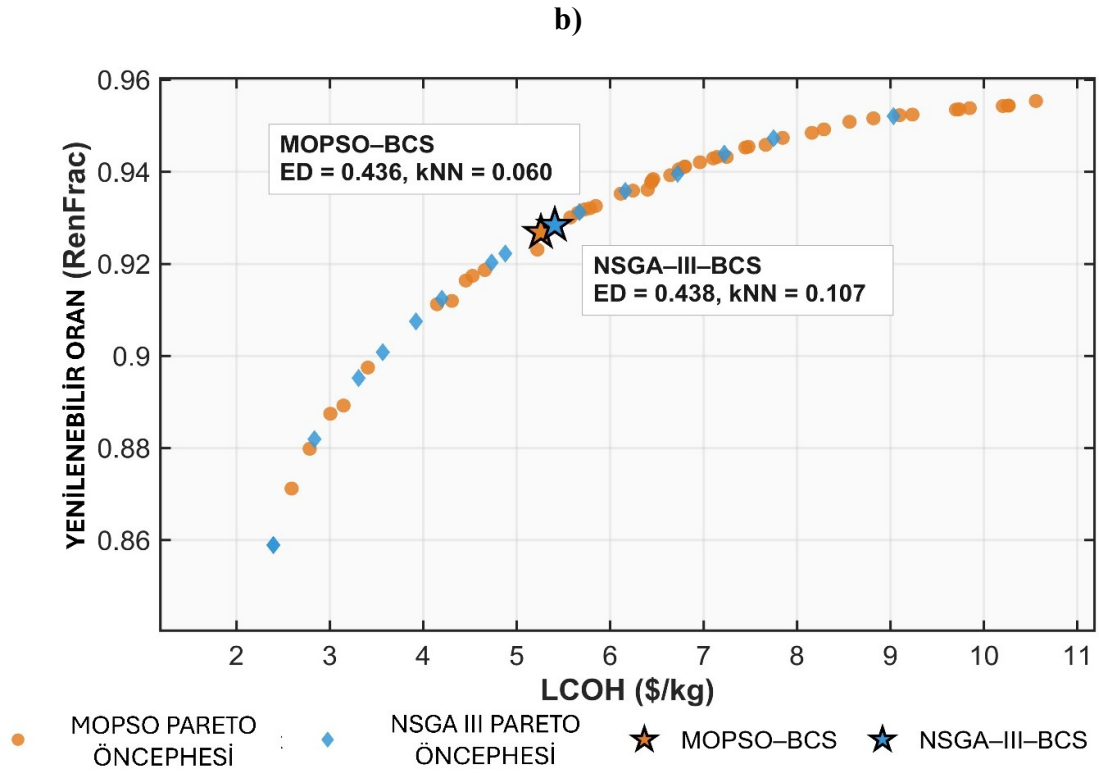
Bu çok katmanlı değerlendirme yaklaşımı sayesinde yalnızca hangi tasarımın seçildiği değil, aynı zamanda algoritmaların Pareto cephesini ne derece kaliteli ve dengeli biçimde temsil ettiği de ortaya konulmuştur. Böylece optimizasyon performansının yalnızca matematiksel yakınsama başarısına değil, lokasyonun yenilenebilir kaynak karakterine ve Pareto yüzey geometrisine bağlı olarak nasıl değiştiği sistematik biçimde analiz edilmiştir.

- Pareto ön yüzlerinin görsel ve geometrik karşılaştırılması

Şekil 4.37’de a), b) ve c) sırasıyla Bandırma, Çeşme ve Mersin lokasyonlarına ait Pareto ön yüzleri verilmiştir. Yatay eksen LCOH değerini, dikey eksen ise yenilenebilir enerji oranını göstermektedir. Turuncu noktalar MOPSO tarafından, mavi işaretler NSGA-III tarafından elde edilen baskın olmayan çözümleri temsil etmektedir.



Şekil 4.37: LCOH ve Yenilenebilir enerji oranına göre a) Bandırma, b) Çeşme ve c) Mersin lokasyonlarına ait Pareto ön yüzleri.



Şekil 4.37 (devam): LCOH ve Yenilenebilir enerji oranına göre a) Bandırma, b) Çeşme ve c) Mersin lokasyonlarına ait Pareto ön yüzleri.

Üç lokasyonda da Pareto eğrilerinin genel olarak artan ve konkav bir karakter sergilediği görülmektedir. Başka bir ifadeyle, RenF arttıkça LCOH artış hızı belirli bir eşikten sonra

daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, yüksek yenilenebilirlik hedeflerinin marjinal maliyetinin arttığını göstermektedir. Eğrilerin bu konkav yapısı, sistemin belirli bir yenilenebilir oranına kadar görece ekonomik biçimde ölçeklenebildiğini, ancak daha yüksek oranlarda ek kapasite yatırımının hızla maliyet baskısı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte eğrilerin geometrik yapısı lokasyona bağlı olarak farklılaşmaktadır.

Bandırma'da Pareto eğrisi nispeten daha kırıklı ve yer yer eğim değişimleri gösteren bir yapıdadır. Bu durum, rüzgâr ve güneş üretimindeki saatlik dalgalanmaların ekonomik yüzeye yansıdığını düşündürmektedir. Çeşme'de eğri daha düzgün fakat orta bölgede hafif bir eğim yumuşaması gözlenmektedir; bu da belirli bir RenF aralığında sistemin daha dengeli bir kapasite kombinasyonu sunabildiğini göstermektedir. Mersin'de ise Pareto cephesi daha düzgün ve daha konveks bir formdadır; eğim değişimi daha homojendir ve çözüm noktaları daha lineer bir ödünleşim hattı boyunca dağılmıştır. Bu yapı, Mersin'in daha istikrarlı güneş potansiyelinin sistem davranışını daha öngörülebilir hale getirdiğini göstermektedir. Görsel analiz, algoritmaların her lokasyonda benzer genel eğriyi yakalayabildiğini; ancak çözüm noktalarının yoğunluk ve yayılım özelliklerinin farklılaştığını ortaya koymaktadır. Bu farkların karar kalitesine nasıl yansıdığı bir sonraki alt başlıkta ele alınmaktadır.

- *BCS tabanlı karar analizi ve yerel kararlılık değerlendirilmesi*

Pareto ön yüzleri çok sayıda baskın olmayan çözüm üretmektedir. Ancak pratik tasarım ve yatırım kararı açısından tek bir önerilebilir sistem konfigürasyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla her lokasyon ve her algoritma için en iyi uzlaşım çözümü (BCS) belirlenmiştir.

BCS seçimi, normalize edilmiş amaç fonksiyonları üzerinden ütopya noktasına olan Öklidyen uzaklık (ED) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ED değeri, LCOH minimizasyonu ve RenF maksimizasyonu arasında en dengeli çözümü temsil etmektedir. ED değeri ne kadar küçükse, çözüm iki amaç arasında o kadar dengeli kabul edilmektedir. Ancak yalnızca ED kullanılması yeterli görülmemiştir. Çünkü aynı ED değerine sahip iki çözüm, Pareto cephesinde farklı geometrik bölgelerde yer alabilir. Bu nedenle yerel çözüm yoğunluğunu ölçmek amacıyla k-en yakın komşu (kNN) metriği hesaplanmıştır. kNN metriği, BCS noktasının çevresindeki çözüm yoğunluğunu nicel olarak ifade etmektedir. Daha düşük kNN değeri daha izole bir çözümü, daha yüksek değer ise daha yoğun ve kararlı bir bölgeyi temsil

etmektedir. Tablo 4.3'te üç lokasyon için MOPSO ve NSGA-III algoritmaları tarafından elde edilen BCS sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Tablo 4.3:** Bandırma, Çeşme ve Mersin Lokasyonları için MOPSO ve NSGA-III algoritmaları tarafından elde edilen BCS sonuçları.

LOKASYON	METOD	PV (MW)	RT (MW)	LCOH <sub>BCS</sub> (USD/KG)	REN <sub>FBCS</sub>	ED	KNN	LCOH <sub>SİM</sub> (USD/KG)	REN <sub>SİM</sub>
BANDIRMA	MOPSO	2,72	5,85	5,48	0,90	0,46	0,033	5,47	0,9
	NSGA-III	2,68	5,59	5,29	0,90	0,46	0,113	5,29	0,9
ÇEŞME	MOPSO	1,90	5,99	5,26	0,93	0,44	0,060	5,26	0,93
	NSGA-III	1,69	6,46	5,41	0,93	0,44	0,107	5,41	0,93
MERSİN	MOPSO	4,04	7,30	6,56	0,85	0,46	0,025	6,56	0,85
	NSGA-III	4,18	7,14	6,54	0,85	0,46	0,111	6,54	0,85

Tablo incelendiğinde öncelikle Simulink doğrulama sonuçlarının surrogate model çıktıları ile neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, optimizasyon sürecinde kullanılan YSA tabanlı yaklaşımın güvenilirliğini teyit etmektedir.

- *Bandırma lokasyonu*

Bandırma'da her iki algoritma da yaklaşık %90 yenilenebilir enerji oranına ulaşmıştır. ED değerleri her iki yöntem için de 0,46'dır. Bu durum, maliyet-yenilenebilirlik dengesi açısından iki algoritmanın da benzer bir uzlaşım noktasına ulaştığını göstermektedir. Ancak kNN değerleri farklıdır. MOPSO için kNN = 0,033 iken, NSGA-III için kNN = 0,113'tür. Bu fark, NSGA-III çözümünün Pareto cephesinde daha yoğun bir bölgede yer aldığını, MOPSO çözümünün ise daha izole bir konumda olduğunu göstermektedir. Yani Bandırma'da iki algoritma benzer denge noktasını bulmuş olsa da çözümün çevresel kararlılığı farklılaşmaktadır. Maliyet açısından bakıldığında NSGA-III (5,29 USD/kg) MOPSO'ya (5,48 USD/kg) kıyasla daha düşük bir LCOH üretmiştir. Ancak bu avantaj, yerel yoğunluk farklılığı ile değerlendirilmelidir.

- *Çeşme lokasyonu*

Çeşme'de ED değerleri 0,44 olup iki algoritma arasında yine benzer bir denge noktası söz konusudur. Ancak MOPSO çözümü 5,26 USD/kg LCOH üretirken, NSGA-III 5,41 USD/kg değerinde kalmıştır. kNN değerleri ise sırasıyla 0,060 ve 0,107'dir. Bu sonuç, Çeşme'de

MOPSO'nun hem maliyet hem de yerel yoğunluk açısından daha avantajlı bir BCS ürettiğini göstermektedir. Çeşme'nin rüzgâr karakterindeki dalgalanma, Pareto yüzeyinde kırılmalar oluşturmakta; bu tür yapıda MOPSO'nun daha dengeli bir yerel yapı yakaladığı görülmektedir.

- *Mersin lokasyonu*

Mersin'de ED değerleri her iki algoritma için 0,46'dır. LCOH değerleri de oldukça yakındır (6,56 ve 6,54 USD/kg). Bu durum, iki algoritmanın da benzer bir küresel denge noktasına ulaştığını göstermektedir. Ancak kNN metriği yine farklılaşmaktadır: MOPSO için 0,025, NSGA-III için 0,111. Bu sonuç, NSGA-III çözümünün daha yoğun bir Pareto bölgesinde konumlandığını göstermektedir. Mersin'in daha düzgün ve konveks Pareto yapısı, referans yönlü sıralama kullanan NSGA-III için daha uygun bir ortam sağlamış görünmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde şu çıkarımlar yapılabilir:

ED değerleri üç lokasyonda da algoritmalar arasında büyük farklılık göstermemektedir. Farklılık esas olarak yerel yoğunluk (kNN) ve bazı lokasyonlarda maliyet düzeyinde ortaya çıkmaktadır. Simulink doğrulaması, BCS seçimlerinin model güvenilirliği açısından tutarlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla BCS analizi, yalnızca maliyet-yenilenebilirlik dengesi açısından değil; çözümün Pareto cephesindeki yapısal konumu açısından da değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, tasarım kararının daha sağlam temellere oturtulmasını sağlamaktadır.

- *Küresel pareto kalite metrikleri ile algoritmik performans*

Bir önceki alt bölümde algoritmaların en iyi uzlaşım çözümü (BCS) üzerinden karşılaştırılması yapılmıştır. Ancak çok amaçlı optimizasyon problemlerinde algoritmik performans yalnızca tek bir çözüm noktası üzerinden değerlendirilemez. Asıl değerlendirilmesi gereken yapı, algoritmanın tüm Pareto cephesini ne ölçüde kapsadığı, çözümleri ne kadar dengeli dağıttığı ve ideal noktaya genel olarak ne kadar yakınsadığıdır. Bu nedenle her lokasyon için baskın olmayan çözüm kümeleri üzerinden üç temel kalite metriği hesaplanmıştır: Hypervolume (HV), Spacing ( $\Delta$ ) ve Ortalama Ütopya Mesafesi (Mean Utopia Distance). Bu metrikler birlikte ele alındığında, yakınsama ve çeşitlilik performansı eş zamanlı olarak değerlendirilebilmektedir. Hypervolume metriği, Pareto cephesinin referans noktaya göre kapsadığı hacmi ifade etmektedir. Daha yüksek HV değeri hem daha iyi yakınsama hem de daha geniş çözüm kapsamı anlamına gelmektedir. Spacing

( $\Delta$ ) metriği ise çözümler arası boşluk homojenliğini ölçmektedir. Düşük  $\Delta$  değeri, çözümlerin Pareto cephesi boyunca daha dengeli dağıldığını göstermektedir. Ortalama ütopya mesafesi ise tüm baskın olmayan çözümlerin ideal noktaya olan ortalama uzaklığını ifade etmektedir; bu değer ne kadar küçükse, genel yakınsama o kadar başarılı kabul edilmektedir. Tablo 4.4'te üç lokasyon için MOPSO ve NSGA-III algoritmalarına ait küresel performans metrikleri sunulmuştur.

**Tablo 4.4:** Bandırma, Çeşme ve Mersin için MOPSO ve NSGA-III algoritmalarına ait küresel performans metrikleri.

LOKASYON	ALGORİTMA	NPOINTS	HYPERVOLUME	SPACING $\Delta$	MEAN UTOPIA DIST
Çeşme	MOPSO	50	0,9491	1,0454	0,6121
Çeşme	NSGA-III	100	0,9374	2,9326	0,9361
Bandırma	MOPSO	50	0,8969	0,8248	0,6182
Bandırma	NSGA-III	100	0,9111	2,8149	0,9398
Mersin	MOPSO	50	0,9281	0,9100	0,5892
Mersin	NSGA-III	100	0,9206	3,0351	0,9382

- *Bandırma lokasyonu*

Bandırma'da farklı bir tablo ortaya çıkmaktadır. Hypervolume değeri NSGA-III için 0,9111 iken, MOPSO için 0,8969'dur. Bu sonuç, NSGA-III'ün Pareto cephesini biraz daha geniş bir hacimde kapsadığını göstermektedir. Ancak Spacing metriği açısından MOPSO ( $\Delta = 0,8248$ ) daha homojen bir dağılım üretmiştir. NSGA-III'de  $\Delta$  değeri 2,8149 olup çözümler arası boşluk daha düzensizdir. Ortalama ütopya mesafesi incelendiğinde MOPSO (0,6182), NSGA-III'e (0,9398) kıyasla daha düşük bir değer üretmiştir. Bu durum, küresel yakınsama açısından MOPSO'nun Bandırma'da daha dengeli bir yapı sergilediğini göstermektedir.

- *Çeşme lokasyonu*

Çeşme'de MOPSO algoritması HV = 0.9491 değeri ile NSGA-III (0,9374)'e kıyasla daha yüksek bir kapsama alanı üretmiştir. Bu durum, MOPSO'nun Pareto cephesini hem yakınsama hem de yayılım açısından daha etkin biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Spacing metriği incelendiğinde MOPSO için  $\Delta = 1,0454$  iken, NSGA-III için  $\Delta = 2,9326$ 'dır. Bu fark oldukça belirgindir. NSGA-III çözümlerinin daha düzensiz ve heterojen aralıklara sahip olduğu görülmektedir. Ortalama ütopya mesafesi de MOPSO lehinedir (0,6121'e karşı

0,9361). Bu sonuç, yalnızca BCS noktasında değil, tüm çözüm kümesi genelinde MOPSO'nun daha dengeli bir yakınsama sergilediğini göstermektedir.

- *Mersin lokasyonu*

Mersin'de MOPSO'nun HV değeri 0,9281 iken, NSGA-III için 0,9206'dır. Fark sınırlıdır ancak MOPSO lehinedir. Spacing metriği açısından yine belirgin bir fark bulunmaktadır: MOPSO için  $\Delta = 0,9100$ , NSGA-III için  $\Delta = 3,0351$ 'dir. Bu durum NSGA-III çözümlerinin daha parçalı bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Ortalama ütopya mesafesi MOPSO'da 0,5892, NSGA-III'de 0,9382'dir. Bu sonuç, Mersin'de de genel yakınsama kalitesinin MOPSO'da daha güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Üç lokasyon birlikte değerlendirildiğinde şu genel eğilim ortaya çıkmaktadır:

- Hypervolume açısından algoritmalar arasında belirgin bir mutlak üstünlük yoktur; bazı lokasyonlarda MOPSO, bazı lokasyonlarda NSGA-III öne çıkmaktadır.
- Spacing ve Ortalama Ütopya Mesafesi metrikleri ise daha tutarlı bir biçimde MOPSO'nun çözümleri daha homojen ve ideal noktaya daha yakın ürettiğini göstermektedir.
- Özellikle  $\Delta$  değerlerinin NSGA-III'de yüksek çıkması, çözümlerin referans yönler boyunca kümelenme eğilimi gösterdiğini düşündürmektedir.

Bu sonuçlar, algoritmik performansın yalnızca tek bir kalite metriği üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini açık biçimde göstermektedir. Yakınsama ve çeşitlilik birlikte ele alındığında daha dengeli bir değerlendirme yapılabilmektedir. Bu noktada bir sonraki adım, bu performans farklılıklarının lokasyonun yenilenebilir kaynak karakteri ile nasıl ilişkili olduğunu tartışmaktır.

- *Lokasyon karakterine bağlı algoritma davranışının değerlendirilmesi*

Önceki alt bölümlerde Pareto ön yüzlerinin geometrik yapısı, BCS tabanlı karar analizi ve küresel kalite metrikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Bu bölümde ise elde edilen tüm bulgular birlikte değerlendirilerek algoritmik davranışın lokasyonun yenilenebilir kaynak karakteri ile nasıl ilişkilendiği analiz edilmektedir. Çalışmada incelenen üç lokasyonun üretim profilleri birbirinden belirgin biçimde farklıdır. Bandırma ve Çeşme, özellikle rüzgâr rejimi açısından güçlü olmakla birlikte saatlik ve mevsimsel dalgalanmaların daha belirgin olduğu bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık Mersin, daha istikrarlı ve yüksek güneş

potansiyeline sahip olup üretim profili daha düzenli ve süreklilik arz eden bir karakter sergilemektedir.

- *Bandırma ve çeşme lokasyonlarında dalgali pareto yapısının analizi*

Bandırma ve Çeşme lokasyonlarında Pareto eğrileri incelendiğinde, eğimin belirli bölgelerde ani değişimler gösterdiği ve marjinal maliyet artışının yenilenebilir oran yükseldikçe doğrusal olmayan bir biçimde arttığı görülmektedir. Bu tür davranış, karar uzayında yerel kırılmalar ve non-konveks yapılar oluştuğuna işaret etmektedir.

Bu iki lokasyonda:

- Spacing ( $\Delta$ ) ve Ortalama Ütopya Mesafesi değerleri MOPSO lehine daha düşük çıkmıştır.
- BCS noktaları incelendiğinde, MOPSO çözümleri daha kompakt Pareto bölgelerinde konumlanmıştır.
- NSGA-III çözümlerinin referans yönler boyunca daha parçalı dağıldığı gözlenmiştir.

Bu tablo, parçacık sürü temelli MOPSO algoritmasının dalgali ve düzensiz arama alanlarında çeşitliliği koruma ve lokal yoğunlaşma yeteneğinin daha etkili olabildiğini göstermektedir. Özellikle saatlik rüzgâr dalgalanmalarının PV-RT oranını hassaslaştırdığı bölgelerde, arama mekanizmasının esnekliği önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, Bandırma ve Çeşme’de algoritmik performans farkı, matematiksel üstünlükten ziyade, arama alanının topolojik yapısına verilen tepkiyle açıklanabilir.

- *Mersin lokasyonunda düzgün ve konveks pareto yapısının analizi*

Mersin lokasyonunda ise Pareto eğrisi daha düzgün ve konveks bir karakter sergilemektedir. Yenilenebilir oran artışı ile maliyet artışı daha kontrollü ve daha az kırılmalı bir form göstermektedir. Bu durum, karar uzayının daha pürüzsüz bir optimizasyon peyzajına sahip olduğunu düşündürmektedir. Bu lokasyonda:

- Hypervolume değerleri iki algoritma arasında oldukça yakındır.
- Ancak Spacing metriği yine MOPSO lehine daha düşük çıkmıştır.
- ED değerleri BCS seviyesinde neredeyse eşittir.

NSGA-III’ün referans vektör temelli seçim mekanizması teorik olarak düzgün ve konveks Pareto yüzeylerinde homojen dağılım üretmeye daha yatkındır. Ancak bu çalışmada spacing değerlerinin yüksek çıkması, referans yön sayısının ve çözüm yoğunluğunun dağılım

üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Mersin’de iki algoritma arasındaki farkın Bandırma ve Çeşme’ye kıyasla daha sınırlı olması, optimizasyon yüzeyinin daha az karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır.

- *Genel değerlendirme*

Üç lokasyon birlikte değerlendirildiğinde şu çıkarımlar yapılabilir:

1. Algoritmik performans lokasyondan bağımsız değildir.
2. Dalgalı ve non-konveks Pareto yüzeylerinde MOPSO daha dengeli ve homojen çözüm kümeleri üretmiştir.
3. Daha düzgün ve konveks yapılarda algoritmalar arasındaki fark azalmaktadır.
4. Tek bir kalite metriği üzerinden “mutlak üstünlük” iddiasında bulunmak doğru değildir.

Bu sonuç, hibrit yenilenebilir hidrojen sistemlerinin tasarımında optimizasyon algoritması seçiminin yalnızca algoritmanın teorik yapısına göre değil, sistemin fiziksel ve meteorolojik karakterine göre yapılması gerektiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, algoritma seçimi problemden bağımsız bir tercih değil; problem yapısına bağlı stratejik bir karardır.

#### **4.2.7 Bandırma için duyarlılık analizi ve ekonomik kırılganlık değerlendirmesi**

Bu bölümde, Balıkesir için gerçekleştirilen yer seçimi analizleri sonucunda en uygun yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretim tesisi lokasyonu olarak belirlenen Bandırma bölgesinde sistemin ekonomik kırılganlığı ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bandırma’nın seçilme nedeni yalnızca çalışma alanı olması değildir; aynı zamanda bu lokasyonun hem yüksek yenilenebilir potansiyele sahip olması hem de saatlik rüzgâr–güneş dalgalanmalarının belirgin olmasıdır. Duyarlılık analizi dört farklı sistem konfigürasyonu için gerçekleştirilmiştir:

- PV–RT–Şebeke (hibrit sistem)
- PV–Şebeke
- RT–Şebeke
- Yalnızca Şebeke (Grid-only)

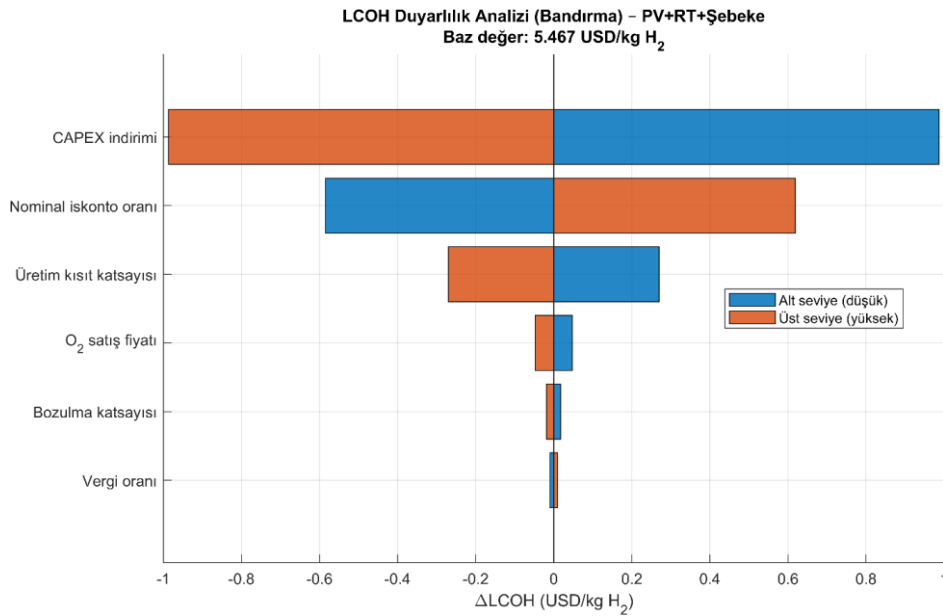
Analiz kapsamında aşağıdaki temel tekno-ekonomik parametreler  $\pm\%20$  aralığında değiştirilerek LCOH üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır:

- Vergi oranı

- Net iskonto oranı
- Oksijen yan ürün satış fiyatı
- Toplam ilk yatırım maliyeti (CAPEX)
- Yük kısıtı katsayısı
- Sistem performans kaybı oranı

#### 4.2.7.1 PV+RT+Şebeke konfigürasyonu (Baz LCOH = 5.467 USD/kg H<sub>2</sub>)

PV+RT+Şebeke sistemine ait duyarlılık sonuçları Şekil 4.38’de verilmiştir. Bu konfigürasyon hem fotovoltaik hem rüzgâr yatırımı içerdiğinden yüksek sermaye yoğunluklu bir hibrit yapıya sahiptir ve aynı zamanda üretim entegrasyon kalitesine duyarlıdır.



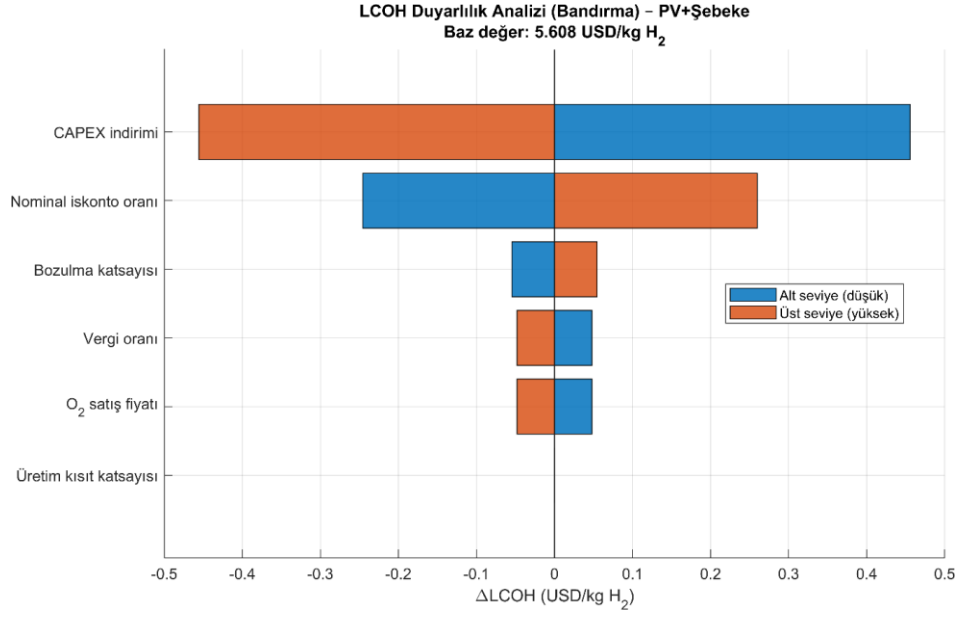
**Şekil 4.38:** Bandırma için PV+RT+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin  $\pm\%20$  değişiminin LCOH üzerindeki etkisini gösteren duyarlılık (tornado) diyagramı.

Analiz sonuçları, bu senaryoda en belirleyici parametrenin CAPEX indirimi olduğunu açık biçimde göstermektedir. Yatırım maliyetinin  $\pm\%20$  değiştirilmesi LCOH üzerinde yaklaşık  $\pm\%18$  mertebesinde bir değişim oluşturmaktadır. Bu büyüklük, hibrit sistemin ekonomik performansının temel olarak ilk yatırım hacmi tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır. PV ve rüzgâr yatırımlarının birlikte yer aldığı bu yapıda toplam sermaye büyüklüğü artmakta, dolayısıyla amortisman ve finansman yükü doğrudan birim hidrojen maliyetine yansımaktadır. İkinci en güçlü etki nominal iskonto oranında gözlenmektedir. İskonto oranındaki  $\pm\%20$  değişim LCOH’de yaklaşık  $-\%10$  ile  $+\%11$  aralığında bir değişime yol

açmaktadır. Bu sonuç, sistemin yalnızca yatırım büyüklüğüne değil, yatırımın finansman koşullarına da yüksek derecede bağımlı olduğunu göstermektedir. Sermaye yoğun hibrit sistemlerde faiz oranı veya finansman maliyetindeki küçük değişimler dahi 20 yıllık yaşam döngüsü boyunca dikkate değer maliyet kaymalarına neden olmaktadır. Üretim kısıt katsayısı bu senaryoda üçüncü dikkate değer parametre olarak ortaya çıkmaktadır ve yaklaşık  $\pm 5\%$  düzeyinde bir duyarlılık üretmektedir. Hibrit yapıda PV ve rüzgârın eş zamanlı üretim pikleri oluşabildiğinden, fazla üretimin ne ölçüde elektrolizöre aktarılabilirdiği veya şebeke ile etkileşime girebilirdiği ekonomik sonucu belirlemektedir. Bu parametre, sistemin yenilenebilir kaynak entegrasyon başarısını temsil etmektedir. O<sub>2</sub> satış fiyatı, performans kaybı (bozulma) oranı katsayısı ve vergi oranı ise daha sınırlı etkilere sahiptir. Bu değişkenler LCOH seviyesini marjinal olarak yukarı veya aşağı kaydırmakta; ancak sistemin ekonomik karakterini değiştirecek büyüklükte bir etki oluşturmamaktadır. Genel olarak PV+RT+Şebeke konfigürasyonunda LCOH'yi belirleyen temel unsurlar yatırım büyüklüğü, finansman maliyeti ve üretim entegrasyon verimliliği olarak ortaya çıkmaktadır.

#### **4.2.7.2 PV+Şebeke konfigürasyonu (Baz LCOH = 5.608 USD/kg H<sub>2</sub>)**

PV+Şebeke sistemine ait duyarlılık analizi sonuçları Şekil 4.39'da verilmiştir. Bu konfigürasyonda rüzgâr entegrasyonu bulunmadığından sistem yapısı daha basittir ve sermaye yoğunluğu hibrit yapıya kıyasla daha düşüktür.



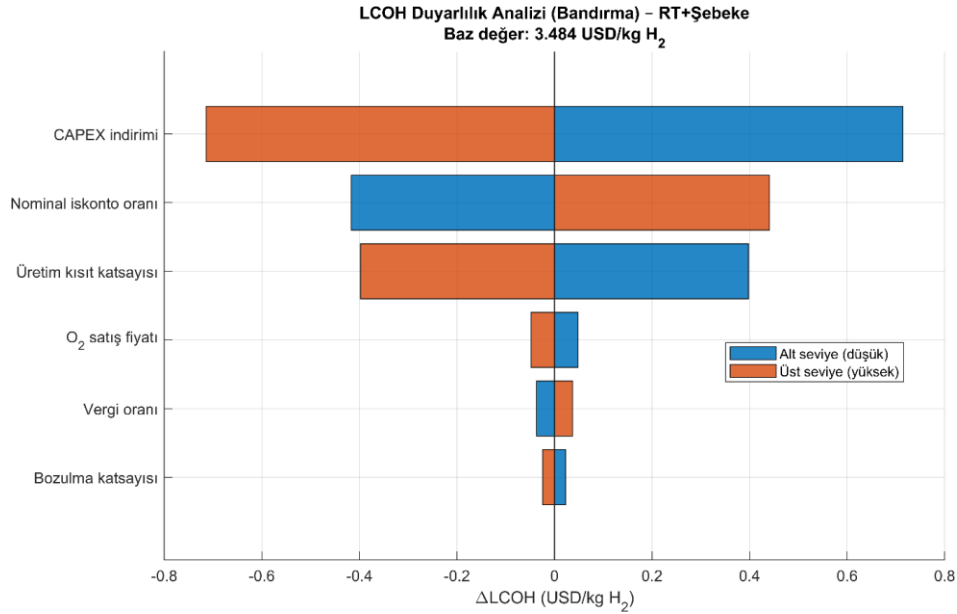
**Şekil 4.39:** Bandırma için PV+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin  $\pm\%20$  değişiminin LCOH üzerindeki etkisi.

Bu senaryoda da en yüksek duyarlılık CAPEX indirimi değişkeninde görülmektedir. Yatırım maliyetindeki  $\pm\%20$  değişim LCOH üzerinde yaklaşık  $\pm\%8$  mertebesinde bir etki üretmektedir. Bu değer hibrit sisteme kıyasla daha düşük olmakla birlikte, PV yatırım maliyetlerinin ekonomik performans üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu göstermektedir. Nominal iskonto oranı ikinci sırada yer almakta ve yaklaşık  $\pm\%4-5$  düzeyinde değişim oluşturmaktadır. PV+Şebeke sisteminde toplam sermaye büyüklüğü daha sınırlı olduğundan finansman parametresinin çarpan etkisi hibrit yapıya göre daha düşüktür.

Bozulma katsayısı, O<sub>2</sub> satış fiyatı ve vergi oranı yaklaşık  $\pm\%1$  mertebesinde etki göstermektedir. Bu sonuç, sistemin maliyet yapısının ağırlıklı olarak yatırım ve finansman odaklı olduğunu; yan ürün geliri ve vergi düzenlemelerinin ise ikincil düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır. Üretim kısıt katsayısının bu konfigürasyonda anlamlı bir etkisinin bulunmaması dikkat çekicidir. Bunun nedeni, yalnızca PV kaynağının bulunması ve çift kaynaklı pik üretim senaryosunun oluşmamasıdır. Dolayısıyla operasyonel esneklik parametresi ekonomik sonucu belirleyici bir faktör haline gelmemektedir.

#### 4.2.7.3 RT+Şebeke konfigürasyonu (Baz LCOH = 3.484 USD/kg H<sub>2</sub>)

RT+Şebeke sistemine ait duyarlılık analizi sonuçları Şekil 4.40'ta verilmiştir. Bu konfigürasyon analiz edilen senaryolar arasında en düşük baz LCOH değerine sahiptir ve rüzgâr yatırımının Bandırma koşullarında ekonomik olarak güçlü bir katkı sunduğunu göstermektedir.



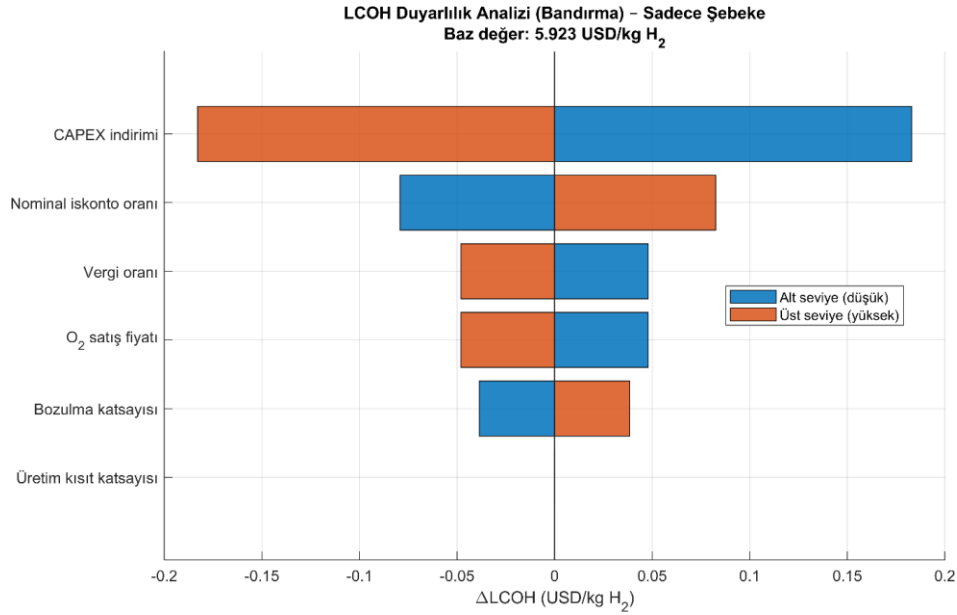
**Şekil 4.40:** Bandırma için RT+Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin  $\pm\%20$  değişiminin LCOH üzerindeki etkisi.

Bu senaryoda en yüksek duyarlılık CAPEX indirimi parametresinde gözlenmektedir ve  $\pm\%20$  değişim LCOH üzerinde yaklaşık  $\pm\%20$  mertebesinde bir etki oluşturmaktadır. Bu değer tüm senaryolar içindeki en yüksek yatırım duyarlılığına işaret etmektedir. Rüzgâr türbini yatırım maliyeti doğrudan maliyet yapısını belirlemekte ve küçük yüzdesel değişimler dahi birim hidrojen maliyetini belirgin biçimde kaydırmaktadır. Nominal iskonto oranı yaklaşık  $\pm\%12$  seviyesinde ikinci güçlü parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, rüzgâr yatırımının finansman maliyetine yüksek bağımlılığını göstermektedir. RT+Şebeke konfigürasyonunda dikkat çeken bir diğer dikkate değer unsur üretim kısıt katsayısıdır. Bu parametredeki  $\pm\%20$  değişim yaklaşık  $\pm\%11$  mertebesinde bir etki üretmektedir. Rüzgâr üretiminin pik karakteri nedeniyle fazla üretimin sistem içinde etkin biçimde değerlendirilememesi durumunda LCOH hızla artabilmektedir. Bu sonuç, operasyonel esnekliğin ve sistem tasarımının ekonomik performans üzerindeki etkili rolünü ortaya koymaktadır. O<sub>2</sub> satış fiyatı, vergi oranı ve bozulma katsayısı daha sınırlı etkilere

sahiptir; ancak hibrit olmayan bu yapıda dahi yatırım ve entegrasyon kalitesi ekonomik sonucu belirleyen ana unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

#### 4.2.7.4 Sadece Şebeke konfigürasyonu (Baz LCOH = 5.923 USD/kg H<sub>2</sub>)

Sadece Şebeke sistemine ait duyarlılık sonuçları Şekil 4.41’de verilmiştir. Bu konfigürasyonda yenilenebilir yatırım bulunmadığından sistem temel olarak elektrik alım maliyetine dayanmaktadır.



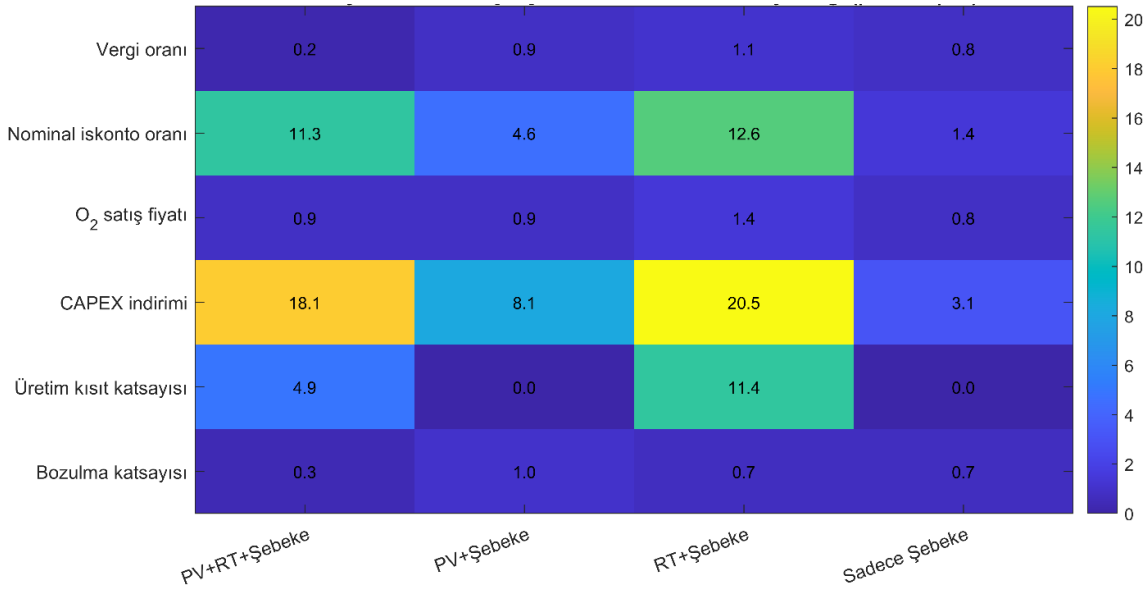
**Şekil 4.41:** Bandırma için Sadece Şebeke konfigürasyonunda temel parametrelerin  $\pm\%20$  değişiminin LCOH üzerindeki etkisi.

Bu nedenle CAPEX duyarlılığı yalnızca  $\pm\%3$  civarında kalmakta; nominal iskonto oranının etkisi de yaklaşık  $\pm\%1-1,5$  mertebesinde sınırlı olmaktadır. Üretim kısıt katsayısının etkisi bulunmamaktadır. O<sub>2</sub> fiyatı ve vergi oranı da düşük düzeyde etki göstermektedir. Bu sonuç, şebeke tabanlı sistemde LCOH'nin esas olarak elektrik birim fiyatına bağlı olduğunu; analiz edilen yatırım ve finansman parametrelerinin ekonomik sonucu kökten değiştirecek düzeyde etkili olmadığını göstermektedir.

#### 4.2.7.5 Senaryolar arası genel değerlendirme

Şekil 4.42’de verilen ısı haritası incelendiğinde bazı temel eğilimler net biçimde ortaya çıkmaktadır. Tüm senaryolarda CAPEX indirimi en yüksek duyarlılık değerine sahiptir ve yatırım yoğunluğu arttıkça bu duyarlılık belirgin biçimde artmaktadır. RT+Şebeke ve

PV+RT+Şebeke sistemlerinde finansal parametrelerin etkisi daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

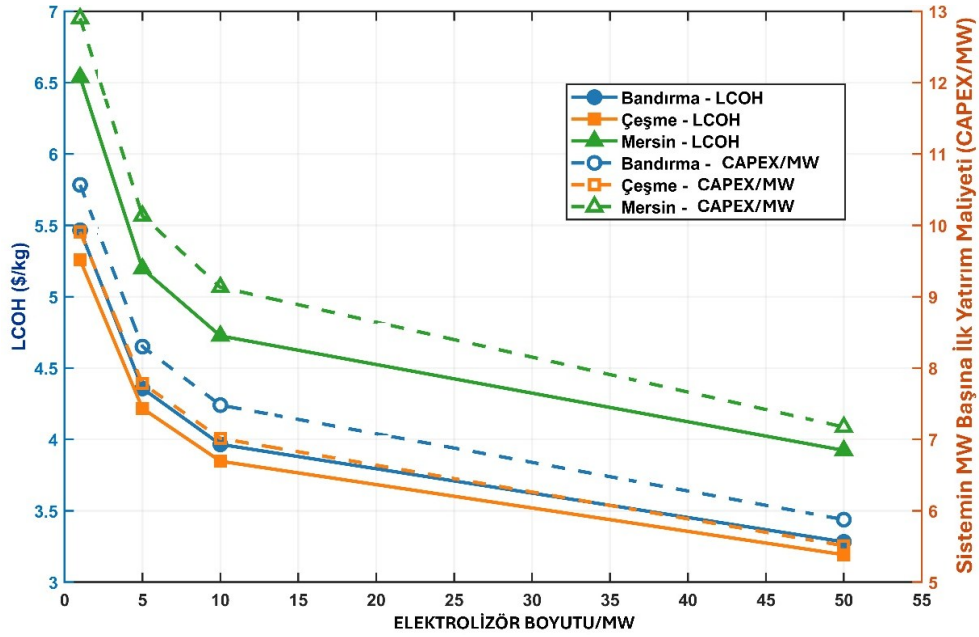


**Şekil 4.42:** Bandırma’da dört sistem konfigürasyonu için LCOH mutlak yüzde duyarlılıklarının karşılaştırmalı ısı haritası.

Üretim kısıt katsayısı yalnızca yenilenebilir entegrasyonu bulunan sistemlerde anlamlı hale gelmekte; özellikle rüzgâr ağırlıklı sistemlerde operasyonel esneklik ekonomik performans üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Vergi oranı ve bozulma katsayısı ise tüm senaryolarda ikincil düzeyde kalmaktadır ve sistem tercihini tek başına değiştirecek büyüklükte bir etki oluşturmamaktadır. Genel olarak Bandırma bölgesinde düşük LCOH hedefi için yatırım maliyetlerinin azaltılması, uygun finansman koşullarının sağlanması ve yenilenebilir üretimin sistem içinde etkin biçimde entegre edilmesi etkili politika ve tasarım kaldıraçları olarak ortaya çıkmaktadır. RT+Şebeke konfigürasyonu maliyet açısından avantajlı görünmekle birlikte, yenilenebilir enerji kullanım oranının görece düşük kalması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik ve yeşil hidrojen niteliği açısından sınırlı bir çözüm sunmaktadır. Buna karşılık hibrit sistem, daha yüksek yenilenebilir payı sağlamasına rağmen finansal parametrelere ve yatırım maliyetlerine daha bağımlı bir yapı sergilemektedir. Bu sonuç, rüzgâr ağırlıklı sistemlerde hem yatırım maliyetinin hem de üretim esnekliğinin ekonomik performans üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle üretim kısıt katsayısının yüksek etkisi, rüzgâr fazlasının sistem içinde değerlendirilememesi durumunda maliyet artışının hızla gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

#### 4.2.8 Ölçek etkileri ve ölçek ekonomileri

Yeşil hidrojen üretim sistemlerinin tekno-ekonomik uygulanabilirliğinde sistem ölçeğinin rolünü ayrıntılı biçimde incelemek amacıyla, karşılaştırmalı bir kapasite ölçeklendirme analizi çalışmanın bu kısmında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, elektrolizör kapasitesinin artmasının hem LCOH hem de kurulu güç başına toplam yatırım maliyeti (Toplam Yatırım / MW<sub>el</sub>) üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 4.43'te Bandırma, Çeşme ve Mersin olmak üzere üç farklı lokasyon için 1 MW, 5 MW, 10 MW ve 50 MW elektrolizör kapasitelerine karşılık gelen ekonomik performans göstergeleri sunulmaktadır.



Şekil 4.43: Bandırma, Çeşme ve Mersin için elektrolizör kapasitelerine (1–50 MW) göre LCOH ve MW başına yatırım maliyeti.

Her bir elektrolizör kapasitesi için fotovoltaik (PV) ve rüzgâr türbini (RT) kurulu güçleri, sistem simülasyonları yardımıyla ekonomik açıdan optimal olacak şekilde belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile, ölçek etkileri sabit veya keyfi kapasite varsayımlarına dayanmadan, her kapasite seviyesinde mühendislik ve ekonomi açısından rasyonel sistem konfigürasyonları üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistem ölçeğinin hidrojen üretim maliyetleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Tüm lokasyonlar için hem LCOH hem de birim kapasite başına yatırım maliyetlerinin, elektrolizör kapasitesi arttıkça belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Bu durum, yeşil hidrojen sistemlerinde ölçek ekonomilerinin varlığını doğrulamaktadır. En keskin maliyet

düşüşleri 1 MW'dan 5 MW'a geçişte gözlenmiş; bu aralıkta sermaye maliyetlerinin daha geniş bir üretim hacmine yayılması, denge-tesis (balance of plant) bileşenlerinin daha verimli kullanılması ve yenilenebilir kaynaklarla elektrolizör arasındaki entegrasyonun iyileşmesi belirleyici olmuştur. 10 MW ve üzerindeki kapasitelerde ise maliyet azalış eğrilerinin yataylaşmaya başladığı, yani ölçek artışına bağlı marjinal kazanımların giderek azaldığı tespit edilmiştir.

LCOH açısından incelendiğinde, Bandırma ve Çeşme lokasyonlarının oldukça benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Bu iki lokasyonda elektrolizör kapasitesinin 1 MW'dan 50 MW'a çıkarılmasıyla LCOH'de yaklaşık %35–40 mertebesinde bir azalma sağlanmıştır. Mersin lokasyonu ise küçük ölçeklerde daha yüksek başlangıç LCOH değerleriyle (yaklaşık 6,54 USD/kg) öne çıkmakta olup, bu durum bölgesel yenilenebilir enerji potansiyeli ve şebeke etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak kapasite arttıkça Mersin için hesaplanan LCOH değerlerinin diğer iki lokasyona yakınsadığı görülmektedir. Bu sonuç, yeterince büyük ölçeklerde sistem kurulduğunda bölgesel dezavantajların ölçek ekonomileri sayesinde kısmen telafi edilebildiğini göstermektedir.

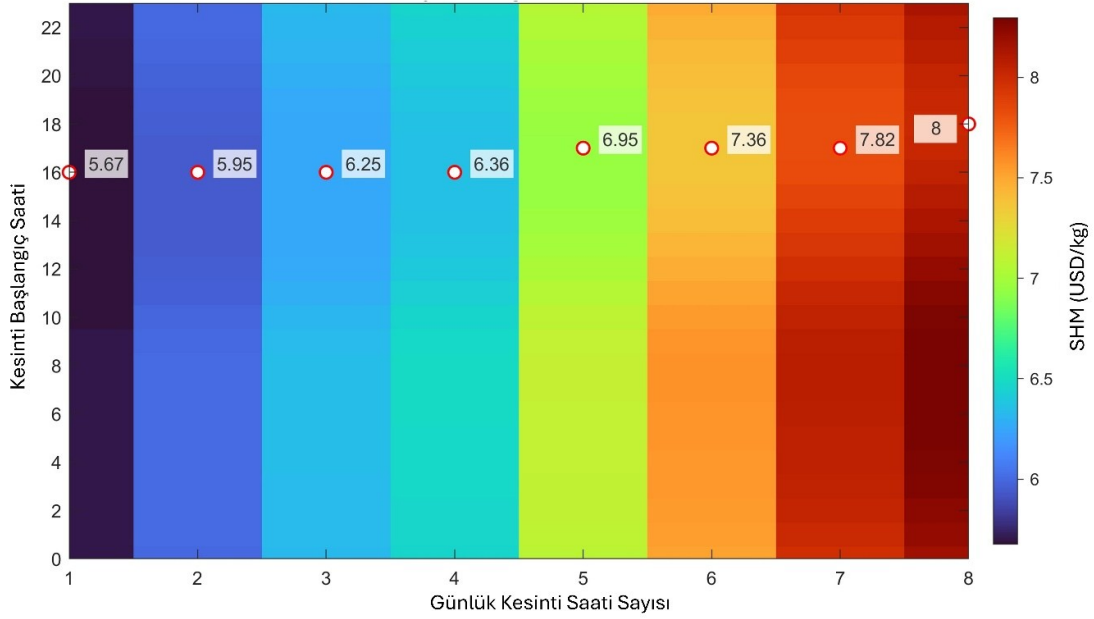
Kurulu güç başına toplam yatırım maliyeti açısından da benzer bir eğilim söz konusudur. Mersin lokasyonu genel olarak daha yüksek yatırım maliyetlerine sahip olmakla birlikte, kapasite arttıkça lokasyonlar arasındaki farklar dikkate değer ölçüde azalmaktadır. 50 MW seviyesinde, üç lokasyon için yatırım maliyetlerinin dar bir bantta toplandığı görülmekte; bu durum büyük ölçekli projelerde maliyetlerin büyük ölçüde elektrolizör teknolojisi ve ortak sistem bileşenleri tarafından belirlendiğini, yerel faktörlerin etkisinin ise görece azaldığını göstermektedir.

LCOH ve yatırım maliyeti eğrileri arasındaki görece mesafe, küçük ölçeklerde oldukça yüksektir. Bu durum, düşük kapasiteli sistemlerin hem yüksek birim hidrojen maliyetleri hem de yüksek sermaye yoğunluğu ile dezavantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Kapasite arttıkça bu eğrilerin birbirine yaklaşması ve yataylaşması, ölçek büyütmenin belirli bir noktadan sonra sınırlı ekonomik fayda sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda, yaklaşık 5 MW ve üzerindeki sistemlerin maliyet azaltımı ile yatırım büyüklüğü arasında daha dengeli bir yapı bulunduğu söylenebilir. 10 MW'tan daha büyük sistemlerde ise ilave kapasite artışlarının, gerekli sermaye artışına kıyasla sınırlı ek fayda sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen ölçek etkileri, literatürde raporlanan bulgularla da uyumludur. Terlouw ve arkadaşları (Terlouw et al., 2022), elektrolizör sistemlerinde kapasite artışının sermaye maliyetlerinin seyreltilmesi ve yardımcı sistemlerin optimizasyonu sayesinde LCOH üzerinde %40'ı aşan düşüşler sağlayabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Schmidt ve arkadaşları (Schmidt et al., 2017), elektrolizör imalatında ve sistem entegrasyonunda öğrenme eğrilerinin özellikle orta ölçekli tesislere kadar dikkate değer maliyet avantajları sunduğunu, ancak daha büyük ölçeklerde bu etkinin giderek azaldığını rapor etmiştir. Bu çalışmalar, yatırım maliyeti ile hidrojen üretim hacmi arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin, ölçek büyüme stratejilerinin ekonomik başarısında temel belirleyici olduğunu vurgulamaktadır. Bu bölümde sunulan analizler, yeşil hidrojen üretiminde sistem ölçeğinin etkili bir tasarım parametresi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle orta ölçekli elektrolizör sistemleri hem ekonomik verimlilik hem de yatırım uygulanabilirliği açısından cazip bir denge noktası sunmaktadır. Daha büyük ölçeklerde ise maliyet avantajlarının sınırlı hale gelmesi, ölçek büyümeye ek olarak teknolojik gelişmelerin, işletme optimizasyonunun ve piyasa entegrasyonunun önemini artırmaktadır.

#### **4.2.9 Elektrolizör dur-kalk stratejisinin LCOH üzerindeki etkisi**

Elektrolizörün gün içindeki dur-kalk süresinin ve bu sürenin zamanlamasının hidrojen üretim maliyeti üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir işletme senaryosu analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, elektrolizörün gün içerisinde tamamen kapalı kaldığı süre 1 ila 8 saat arasında değiştirilmiş; her bir off-hour süresi için kapalı kalma periyodunun günün farklı saatlerinde başlatıldığı çok sayıda senaryo test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.44'te renkli bir kontur haritası biçiminde sunulmakta olup, her bir kombinasyon için hesaplanan LCOH değerleri doğrudan görselleştirilmektedir. Şekil incelendiğinde, off-hour süresinin hidrojen maliyeti üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Elektrolizörün günlük kapalı kalma süresi arttıkça LCOH'nin monoton biçimde yükseldiği tespit edilmiştir. Örneğin, yalnızca 1 saatlik günlük dur-kalk uygulamasında minimum LCOH değeri yaklaşık 5,67 USD/kg seviyesinde gerçekleşirken, bu sürenin 8 saate çıkarılması durumunda LCOH yaklaşık 8,00 USD/kg değerine yükselmektedir. Bu artış, yaklaşık %40'ı aşan bir maliyet artışına karşılık gelmekte olup, elektrolizör kapasite faktöründeki düşüşün ekonomik performans üzerindeki güçlü etkisini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, elektrolizörlerin sermaye yoğun sistemler olması nedeniyle, düşük yıllık çalışma saatlerinin birim hidrojen maliyetini hızla artırdığı yönündeki genel literatür bulgularıyla uyumludur (Al-Mahmodi et al., 2025; Curcio, 2025).



**Şekil 4.44:** Hidrojen üretim sisteminde günlük kesinti süresi ve başlangıç zamanının LCOH üzerindeki etkisi.

Dur-kalk süresinin yanı sıra, dur-kalk periyodunun gün içerisinde hangi saatlerde başlatıldığına da LCOH üzerinde dikkate değer bir rol oynadığı görülmektedir. Şekil 4.44'te işaretlenen optimum noktalar, özellikle 16:00–18:00 saatleri arasında başlatılan dur-kalk periyotlarının daha düşük LCOH değerleriyle sonuçlandığını göstermektedir. Bu saat aralığı, güneş ışınımının hızla azalmaya başladığı, rüzgâr üretiminin belirsizleştiği ve buna karşılık elektrik piyasa fiyatlarının yükselme eğilimine girdiği bir zaman dilimine karşılık gelmektedir. Elektrolizörün bu saatlerde devre dışı bırakılması, sistemin yüksek maliyetli şebeke elektriğine maruz kalmasını azaltmakta ve dolayısıyla toplam hidrojen üretim maliyetini düşürmektedir.

Sayısal sonuçlar incelendiğinde, aynı dur-kalk süresi için dahi başlangıç saatinin değiştirilmesiyle LCOH'de anlamlı farklılıklar olduğu görülmektedir. Örneğin, 4 saatlik bir dur-kalk senaryosunda, dur-kalk periyodunun sabah saatlerinde başlatılması LCOH'yi yaklaşık 6,36 USD/kg seviyesine taşırken, aynı sürenin akşamüstü saatlerinde başlatılması durumunda daha düşük maliyet değerleri elde edilebilmektedir. Bu durum, yalnızca dur-kalk süresinin değil, zamanlamasının da optimizasyon problemi kapsamında birlikte ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Elde edilen bu bulgular, şebekeye bağlı ve hibrit yenilenebilir-şebeke sistemlerinde elektrik fiyatlarının saatlik değişiminin hidrojen üretim maliyeti üzerindeki etkili rolünü bir kez daha doğrulamaktadır. Literatürde yapılan çok sayıda geniş ölçekli tekno-ekonomik çalışmada, elektrik fiyat dalgalanmalarının ve yenilenebilir kaynak süreksizliğinin, LCOH'nin en baskın belirleyicileri arasında yer aldığı gösterilmiştir. Özellikle Terlouw ve arkadaşları (Terlouw et al., 2022), elektrolizörlerin esnek işletme stratejileriyle yüksek fiyatlı saatlerden kaçınmasının, LCOH üzerinde dikkate değer iyileştirmeler sağlayabileceğini rapor etmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da, söz konusu literatür bulgularını sayısal ve görsel olarak desteklemektedir. Bu analiz elektrolizör işletme stratejisinin yalnızca teknik bir kontrol problemi değil, aynı zamanda doğrudan ekonomik performansı belirleyen bir optimizasyon değişkeni olduğunu göstermektedir. Günlük dur-kalk süresinin mümkün olduğunca kısa tutulması, ancak bu sürenin yüksek elektrik maliyetlerinin söz konusu olduğu saatlere denk gelecek şekilde stratejik olarak planlanması, hidrojen üretim maliyetinin düşürülmesi açısından etkili öneme sahiptir. Bu nedenle, elektrolizörün dur-kalk zamanlamasının, PV ve rüzgâr üretim profilleri ile birlikte elektrik piyasa fiyatları dikkate alınarak optimize edilmesi, yeşil hidrojen sistemlerinin ekonomik sürdürülebilirliğini artıran temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

#### **4.2.10 Su kaynağı seçiminin ekonomik analiz üzerindeki etkisi**

PV ve rüzgâr türbini (RT) kapasite bileşenleri optimum değerlerde belirlenmiş 1 MW'lık PEM elektrolizörlü hibrit sistem için su teminine bağlı maliyet etkileri ayrı bir duyarlılık eksenini olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, “su maliyetleri hariç” referans durum ile birlikte şebeke suyu (TW), arıtılmış endüstriyel atıksu (IW), yeraltı suyu (GW), yağmur suyu (RW) ve deniz suyu (SW) olmak üzere beş su kaynağı için toplam sistem yatırımı ve LCOH karşılaştırılmıştır. Tablo 4.5'te verilen sonuçlar, su yönetimi altyapısının yalnızca LCOH üzerinde değil, aynı zamanda ilk yatırım büyüklüğü üzerinde de belirgin bir fark oluşturduğunu göstermektedir. Referans durumda (su maliyetleri hariç) LCOH 5,467 USD/kg düzeyindeyken su kaynağı senaryolarına geçişle birlikte LCOH değerleri 5,605–6,154 USD/kg aralığına yükselmiştir. Bu durum, optimizasyonla boyutlandırılmış PV+RT sisteminde dahi su temini-arıtımı-depolaması gibi tamamlayıcı altyapı kalemlerinin toplam maliyet yapısını kayda değer biçimde etkilediğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.5:** Farklı su kaynakları için LCOH ve toplam yatırım maliyetinin karşılaştırılması.

<b>Su Kaynağı</b>	<b>LCOH<sub>2</sub></b>	<b>Sistemin İlk Yatırım Maliyeti</b>
<b>Temel Senaryo (Su Modeli Yok)</b>	5,467	10569484
<b>Tw (Şebeke Suyu)</b>	5,696	11010076
<b>Iw (Arıtılmış Endüstriyel Atıksu)</b>	5,833	11274426
<b>Gw (Yeraltı Suyu)</b>	6,017	11626657
<b>Rw (Yağmur Suyu)</b>	5,605	10833794
<b>Sw (Deniz Suyu)</b>	6,154	11890854

İlk yatırım cephesinde “su maliyetleri hariç” senaryoda toplam yatırım 10569484 iken, su kaynağının sisteme eklenmesiyle yatırım tutarı tüm senaryolarda artmıştır. Artış miktarları karşılaştırıldığında en düşük yatırım artışı RW senaryosunda gerçekleşmiş (10833794; +264310) ve RW’yi TW (11010076; +440592) ve IW (11274426; +704942) izlemiştir. Buna karşılık, GW (11626657; +1057173) ve özellikle SW (11890854; +1321370) senaryolarında yatırım artışlarının belirgin biçimde yükseldiği görülmektedir. Bu sıralama, su kaynağının “elektrolizör besleme suyu” standardına ulaştırılması için gereken arıtma treninin karmaşıklığı ve su kayıplarının (ör. deniz suyunda yüksek kayıp oranları) altyapı boyutlarını büyütmesiyle tutarlıdır. Örneğin RW senaryosunda arıtma hattı görece olarak daha basit olduğu için CAPEX artışı sınırlı kalırken, SW senaryosunda hem daha yoğun arıtım ihtiyacı hem de kayıp telafisi için daha yüksek brüt su hazırlama gereksinimi, ekipman ve altyapı yatırımını yukarı taşımaktadır.

LCOH açısından bakıldığında, referans duruma göre artışların 0.138–0.687 USD/kg bandında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük LCOH artışı RW senaryosunda olup (5.605; +0.138 USD/kg), bunu TW (5,696; +0,229 USD/kg) takip etmektedir. IW (5,833; +0,366 USD/kg) orta seviyede bir artış üretirken, GW (6,017; +0,550 USD/kg) ve SW (6,154; +0,687 USD/kg) en yüksek LCOH değerlerine karşılık gelmektedir. Bu sonuç iki açıdan dikkat çekicidir. Birincisi, LCOH sıralamasının yatırım artışı sıralamasıyla genel olarak aynı yönde ilerlemesi, su altyapısı CAPEX’in seviyesi yükseldikçe LCOH’a olan yansımının da arttığını göstermektedir. İkincisi, yenilenebilir kaynaklarla optimal boyutlandırılmış bir sistemde dahi su kaynağının seçimi, LCOH’u yaklaşık %2,5 (RW) ile %12,6 (SW) arasında değiştirebilecek büyüklükte bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, su yönetimi bileşenleri

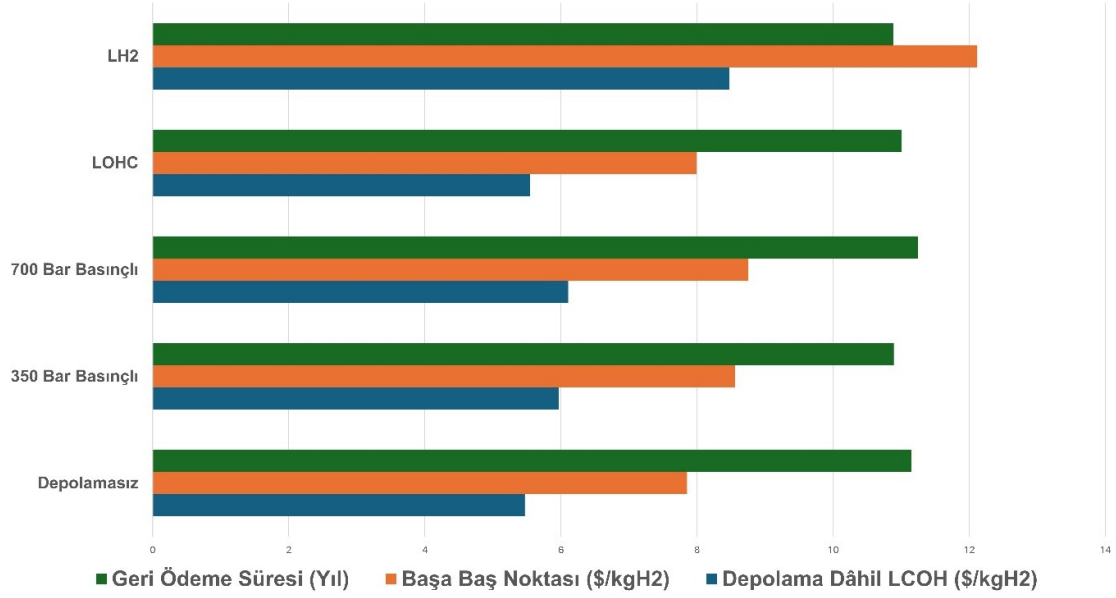
“yardımcı” bir alt sistem gibi görünse de özellikle kıyı yerleşkelerinde deniz suyuna yönelim söz konusu olduğunda LCOH üzerinde belirgin bir maliyet baskısı oluşturabilmektedir.

Sonuçların pratik yorumu açısından, 1 MW ölçeğinde optimum PV+RT konfigürasyonunda en avantajlı su alternatifi RW olarak öne çıkmaktadır, ayrıca hem yatırım artışı hem de LCOH artışı en düşük seviyededir. TW seçeneği, altyapı erişimi bulunan yarı kentsel/industriyel lokasyonlarda düşük ek yatırım ve sınırlı LCOH artışıyla uygulanabilir bir “baz çözüm” profili sergilemektedir. IW seçeneğinin LCOH ve yatırım üzerindeki etkisi daha belirgin olup, arıtılmış endüstriyel arıtılmış atıksu erişimi olan endüstriyel kümelerde çevresel fayda potansiyeli bulursa da maliyet açısından TW/RW’ye göre dezavantajlı olabilmektedir. GW ve SW senaryoları ise maliyet etkilerinin en yüksek olduğu durumları temsil etmektedir. Bu iki senaryoda hem toplam yatırım hem de LCOH değerleri en üst düzeye çıkmakta; özellikle SW senaryosu, kıyı lokasyonları için teorik olarak “bol kaynak” olmasına rağmen yüksek arıtma gereksinimi ve kayıp telafisi nedeniyle ekonomik performansı zayıflatabilmektedir. Bu bulgu, hidrojen üretim tesislerinin tasarımında su kaynağı seçiminin yalnızca erişilebilirlik üzerinden değil, arıtma zinciri ve altyapı maliyetlerini de içeren bütüncül bir çerçevede değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

#### **4.2.11 Hidrojen depolama seçeneklerinin karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizi**

Bu bölümde, Bandırma bölgesi için optimize edilmiş PV-Rüzgâr-PEM elektrolizör sisteminde üretilen hidrojenin farklı depolama konfigürasyonları altında tekno-ekonomik performansı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında beş alternatif depolama yolu ele alınmıştır: depolamasız işletme (No Storage), 350 bar sıkıştırılmış hidrojen, 700 bar sıkıştırılmış hidrojen, sıvı organik hidrojen taşıyıcı (LOHC) ve kriyojenik sıvı hidrojen (LH<sub>2</sub>). Tüm senaryolar, aynı üretim kapasitesi, aynı şebeke bağlantı koşulları ve aynı ekonomik varsayımlar altında karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.45, her bir depolama seçeneği için Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim ve Depolama Maliyeti, NPV=0 koşulunda belirlenen başa-baş hidrojen satış fiyatı ve geri ödeme süresini birlikte göstermektedir.



**Şekil 4.45:** Bandırma bölgesi için hidrojen depolama seçeneklerinin karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizi.

#### 4.2.11.1 Depolamasız referans senaryo

Bandırma için depolamasız referans senaryoda LCOH 5,467 USD kg<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. Net bugünkü değer analizine göre sistemin ekonomik olarak başa-baş noktaya ulaştığı hidrojen satış fiyatı ≈ 7,85 USD kg<sup>-1</sup>, geri ödeme süresi ise ≈ 11,15 yıl düzeyindedir. Depolama yatırımının bulunmaması, sermaye maliyetlerini sınırlı tutarak LCOH açısından avantaj sağlamakta; ancak hidrojenin talep tarafında zamanlama ve esneklik sunmaması, operasyonel açıdan bu senaryoyu kısıtlamaktadır. Bu nedenle depolamasız yapı, analiz kapsamında ekonomik referans senaryo olarak değerlendirilmiştir.

#### 4.2.11.2 Sıkıştırılmış hidrojen (350 bar ve 700 bar)

Sıkıştırılmış hidrojen senaryolarında, ilave kompresyon enerjisi gereksinimi ve yüksek basınçlı tank sistemlerine bağlı sermaye harcamaları, sistem maliyetlerini artırıcı yönde etki göstermektedir.

- 350 bar depolama seçeneğinde LCOH 5,965 USD kg<sup>-1</sup> seviyesine yükselmiş, başa-baş hidrojen satış fiyatı ≈ 8,55 USD kg<sup>-1</sup>, geri ödeme süresi ise ≈ 10,89 yıl olarak hesaplanmıştır.
- 700 bar depolama senaryosunda daha yüksek sıkıştırma oranı ve tank gereksinimleri nedeniyle LCOH 6,106 USD kg<sup>-1</sup> değerine çıkmış, başa-baş satış fiyatı ≈ 8,76 USD

kg<sup>-1</sup> seviyesine ulaşmıştır. Buna karşılık geri ödeme süresi  $\approx 11,24$  yıl ile 350 bar seçeneğine oldukça yakın gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar, yüksek basınçlı depolama seçeneklerinin hidrojenin kullanım esnekliğini artırmasına rağmen, özellikle enerji tüketimi ve ekipman maliyetleri nedeniyle ekonomik performansı depolamasız referans senaryoya kıyasla zayıflattığını göstermektedir.

#### **4.2.11.3 LOHC (Sıvı organik hidrojen taşıyıcı)**

LOHC seçeneği, hidrojenin kimyasal olarak bağlanması sayesinde yüksek basınç veya kriyojenik koşullara ihtiyaç duymadan depolanmasına olanak tanımaktadır. Bandırma senaryosunda LOHC için LCOH 5,546 USD kg<sup>-1</sup> olarak hesaplanmış olup, bu değer sıkıştırılmış hidrojen seçeneklerinden daha düşük, depolamasız referans senaryoya ise oldukça yakındır. NPV = 0 koşulunda başa-baş hidrojen satış fiyatı  $\approx 7,99$  USD kg<sup>-1</sup>, geri ödeme süresi ise  $\approx 11$  yıl olarak bulunmuştur.

Her ne kadar LOHC sistemlerinde hidrojenasyon/dehidrojenasyon süreçlerine bağlı enerji tüketimi ve katalizör maliyetleri bulursa da yüksek basınçlı ekipman ihtiyacının ortadan kalkması güvenlik, lojistik ve ölçeklenebilirlik açısından dikkate değer avantajlar sağlamaktadır. Bu yönüyle LOHC, Bandırma gibi sanayi altyapısı gelişmiş ve liman bağlantısı bulunan bölgeler için dengeleyici ve rekabetçi bir depolama alternatifi olarak öne çıkmaktadır.

#### **4.2.11.4 Kriyojenik sıvı hidrojen (LH<sub>2</sub>)**

LH<sub>2</sub> senaryosu, incelenen tüm depolama seçenekleri arasında en yüksek maliyetli yapı olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda LCOH 8,479 USD kg<sup>-1</sup> seviyesine yükselmiş, başa-baş hidrojen satış fiyatı ise  $\approx 12,12$  USD kg<sup>-1</sup> gibi oldukça yüksek bir değere ulaşmıştır. Buna rağmen geri ödeme süresi  $\approx 10,88$  yıl ile diğer senaryolarla benzer bir düzeyde kalmıştır. Bu durum, LH<sub>2</sub> sistemlerinde yüksek sıvılaştırma enerjisi gereksinimi (yaklaşık 10–12 kWh kg<sup>-1</sup>) ve kriyojenik tank yatırımlarının birim maliyetleri artırmasına karşın, büyük ölçekli ve sürekli işletme koşullarında sağlanan operasyonel verimliliğin yatırım geri dönüşünü kısmen dengelediğini göstermektedir. Ancak Bandırma ölçeği ve mevcut piyasa koşulları altında LH<sub>2</sub>, ekonomik açıdan ancak yüksek hidrojen satış fiyatları veya ilave politika teşvikleri ile rekabetçi hale gelebilmektedir.

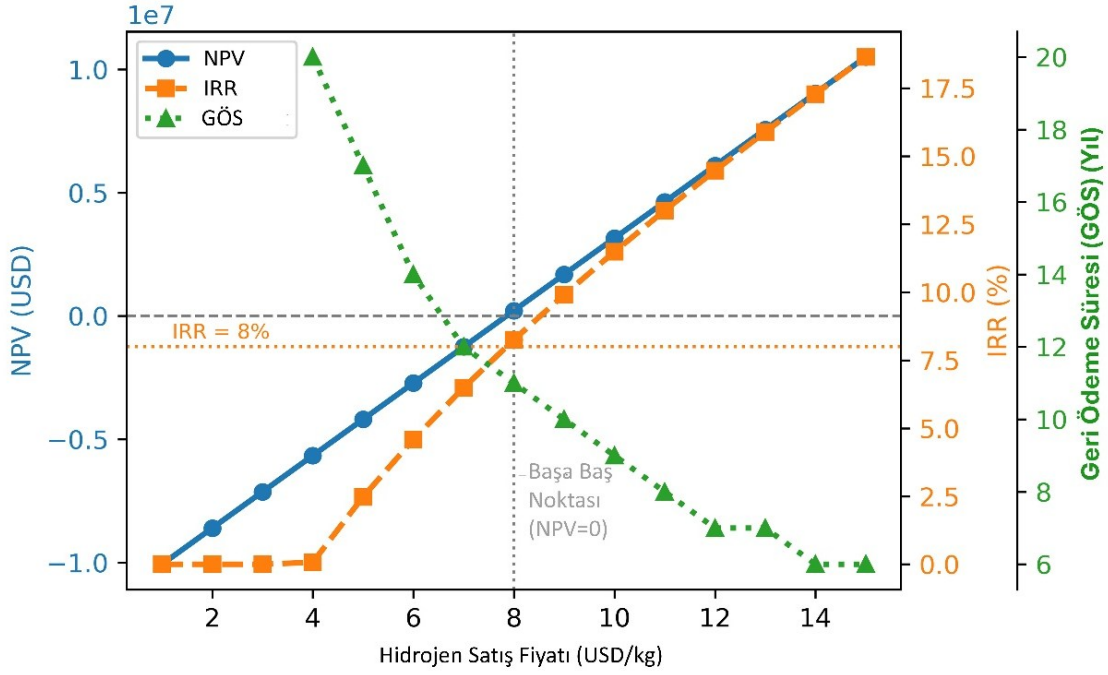
#### 4.2.11.5 Depolama senaryoları için genel değerlendirme

Bandırma için elde edilen sonuçlar, Bandırma bölgesi için hidrojen depolama teknolojisi seçiminin proje ekonomisi üzerinde etkili ve ayrıştırıcı bir etkiye sahip olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır. Depolamasız ve LOHC senaryoları,  $\approx 7,85\text{--}8,00$  USD  $\text{kg}^{-1}$  aralığındaki başa-baş fiyatlarıyla en rekabetçi seçenekler olarak öne çıkarken; sıkıştırılmış hidrojen depolama seçenekleri bu eşiği  $\approx 8,55\text{--}8,76$  USD  $\text{kg}^{-1}$  bandına taşımaktadır. LH<sub>2</sub> senaryosu ise mevcut koşullarda  $\approx 12$  USD  $\text{kg}^{-1}$ 'nin altında ekonomik fizibilite sağlayamamaktadır.

Bu bulgular, Bandırma gibi karma üretim-şebeke bağlantılı sistemlerde depolama teknolojisi seçiminin yalnızca teknik değil, aynı zamanda stratejik ve bölgesel bir ekonomik karar olduğunu göstermektedir. Özellikle karbon fiyatlandırması, CBAM uyumlu teşvik mekanizmaları veya büyük ölçekli sanayi talebine dayalı uzun vadeli alım garantileri devreye alınmadığı sürece, enerji yoğun depolama seçeneklerinin kısa ve orta vadede ekonomik açıdan dezavantajlı kalacağı sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4.2.12 Hidrojen satış fiyatına bağlı ekonomik performans analizi

Bu bölümde, Bandırma lokasyonu için belirlenen referans PV-RT-PEM elektrolizör konfigürasyonunun ekonomik performansı, hidrojen satış fiyatına bağlı olarak net bugünkü değer, iç kârlılık oranı ve geri ödeme süresi göstergeleri üzerinden ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Analizler, %8 net iskonto oranı ve %2 enflasyon varsayımı altında gerçekleştirilmiş olup, bu parametreler literatürde yenilenebilir enerji ve yeşil hidrojen yatırımları için yaygın olarak kabul edilen finansal kabullerle uyumludur. Şekil 4.46'da sunulan sonuçlar, hidrojen satış fiyatının proje kârlılığı üzerindeki etkisinin son derece belirgin ve doğrusal olmayan bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Düşük satış fiyatı seviyelerinde (1-3 USD/kg), proje boyunca elde edilen nakit akışları başlangıç yatırım maliyetlerini karşılayamamakta; bu nedenle net bugünkü değer yüksek düzeyde negatif kalmakta ve geri ödeme süresi tanımlanamamaktadır. Bu fiyat aralığında IRR değeri sıfıra yakın seyretmekte, yatırım finansal açıdan uygulanabilir olmaktan uzak görünmektedir.



**Şekil 4.46:** Karlılık ölçütleri ile hidrojen alım fiyatı arasındaki ilişki (Bandırma örneği).

Hidrojen satış fiyatının artmasıyla birlikte ekonomik göstergelerde kademeli ancak belirgin bir iyileşme gözlenmektedir. 7 USD/kg seviyesinde NPV hâlâ negatif olup (–1.25 milyon USD), IRR değeri yaklaşık %6,5 düzeyindedir ve bu değer iskonto oranının altında kalmaktadır. Buna karşılık 8 USD/kg seviyesinde NPV pozitif değerlere geçerek yaklaşık +0,22 milyon USD olmakta ve IRR değeri %8,25 seviyesine ulaşmaktadır. Bu analiz, net bugünkü değerın sıfıra yaklaştığı ve IRR'nin iskonto oranına eşitlendiği break-even hidrojen satış fiyatının yaklaşık 7,8 USD/kg civarında olduğunu göstermektedir.

Bu sonuç, sistemin finansal açıdan başabaş noktaya ulaşabilmesi için gerekli minimum satış fiyatını nicel olarak ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle, hidrojen satış fiyatının  $\approx 7,8$ –8.0 USD/kg aralığını aşmasıyla birlikte proje, yatırımcı açısından kabul edilebilir bir getiri sunmaya başlamaktadır. Bu eşik değer, çalışmada modellenen sistem için etkili bir ekonomik sınır niteliğindedir.

Satış fiyatının 8 USD/kg seviyesinin üzerine çıkmasıyla birlikte proje kârlılığı hızla artmaktadır. Bu fiyat aralığında NPV pozitif yönde büyümekte, IRR iskonto oranının üzerine çıkarak yatırımın cazibesini artırmaktadır. Özellikle 10–12 USD/kg aralığında IRR değerlerinin yaklaşık %11–15 seviyelerine yükseldiği, geri ödeme süresinin ise 9 yıldan 7 yıla kadar gerilediği görülmektedir. Bu durum, hidrojen satış fiyatındaki görece sınırlı

artışların bile uzun vadeli nakit akışları üzerinde çarpan etkisi yarattığını ve projenin finansal performansını belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir.

Daha yüksek satış fiyatlarında ( $\geq 12$  USD/kg) net bugünkü değerin hızla artmaya devam ettiği, IRR'nin %15–19 aralığına ulaştığı ve geri ödeme süresinin 6–7 yıl seviyelerinde stabilize olduğu gözlemlenmektedir. Bu davranış, sistemin yüksek fiyat senaryolarında güçlü bir ekonomik dayanıklılık sergilediğini ve sermaye geri kazanım süresinin kabul edilebilir seviyelere indiğini göstermektedir.

Elde edilen bu eşik değerler, mevcut ve öngörülen hidrojen piyasa fiyatları ile karşılaştırıldığında anlamlı bir tutarlılık sergilemektedir. Türkiye'de kısa vadede hidrojen offtake fiyatlarının 7–9 USD/kg aralığında olduğu, Avrupa Birliği pazarına yönelik ithalat fiyatlarının ise 2030 yılına doğru 8–10 USD/kg bandında dengelenmesinin beklendiği literatürde rapor edilmektedir (IRENA, 2020). Bu bağlamda, çalışmada modellenen sistemlerin, özellikle uygun politika destekleri ve maliyet azaltıcı önlemlerle birlikte, orta vadede finansal uygulanabilirliğe oldukça yakın olduğu söylenebilir.

Bununla birlikte, bu analiz yeşil hidrojen projelerinin ekonomik başarısının yalnızca teknik performansa değil; hidrojen satış fiyatı, yatırım maliyetleri ve finansal varsayımların birlikte değerlendirilmesine güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Break-even hidrojen fiyatının yaklaşık 7,8–8.0 USD/kg seviyesinde belirlenmesi, politika yapıcılar ve yatırımcılar açısından etkili bir referans değer sunmakta; özellikle CAPEX destekleri, karbon fiyatlandırması ve esnek işletme stratejilerinin devreye alınması hâlinde bu eşik değerin daha da aşağı çekilebileceğine işaret etmektedir.

#### **4.2.13 Politika duyarlılığı ve mali senaryo değerlendirme**

Bu bölümde, optimize edilmiş PV–Rüzgâr–PEM elektrolizör sisteminin ekonomik performansı üzerinde farklı mali ve politika temelli teşvik mekanizmalarının etkisi değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında beş ayrı senaryo ele alınmıştır: baz durum, karbon kredisi, yatırım vergi indirimi (ITC), kurumlar vergisi indirimi ve hızlandırılmış amortisman. Her bir senaryo için LCOH, hidrojen satış fiyatına bağlı olarak IRR, NPV ve geri ödeme süresi hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Tablo 4.6).

**Tablo 4.6:** Farklı mali politika senaryoları altında LCOH, IRR ve NPV Karşılaştırması.

SENARYO	LCOH (USD/KG)	Δ LCOH (%)	BAŞABAŞ H <sub>2</sub> SATIŞ FİYATI (USD/KG)	IRR (%), NPV = 0	GERİ ÖDEME SÜRESİ (YIL)	BAZ SENARYOYA ΔNPV (USD)
<b>Baz Durum</b>	5,467	0,00	7,80	8,03	11	–
<b>Karbon Kredisi</b>	4,188	–23,39	6,21	8,57	9	+4,04 × 10 <sup>6</sup>
<b>Yatırım Vergi Kredisi (Itc)</b>	4,480	–18,06	5,88	9,95	8	+6,03 × 10 <sup>6</sup>
<b>Azaltılmış</b>	5,451	–0,29	6,68	9,82	9	+1,54 × 10 <sup>6</sup>
<b>Kurumlar Vergisi</b>						
<b>Hızlandırılmış Amortisman</b>	4,216	–22,87	5,52	9,79	8	+7,05 × 10 <sup>6</sup>

Baz senaryo, herhangi bir ilave teşvik veya mali destek mekanizması olmaksızın sistemin mevcut piyasa ve vergi koşulları altında performansını temsil etmektedir. Bu durumda LCOH değeri 5,467 USD/kg olarak hesaplanmıştır. Hidrojen satış fiyatı 7 USD/kg seviyesinin altında kaldığında NPV'nin negatif olduğu ve IRR'nin sifıra yakın seyrettiği görülmektedir. Projenin ekonomik olarak pozitif bölgeye geçtiği eşik, yaklaşık 8 USD/kg hidrojen satış fiyatıdır. Bu noktada IRR %8,25 seviyesine ulaşmakta ve geri ödeme süresi yaklaşık 11 yıl olarak gerçekleşmektedir. Satış fiyatının 10–12 USD/kg seviyelerine yükselmesi durumunda IRR %11–14 aralığına çıkmakta ve geri ödeme süresi 7–9 yıl bandına gerilemektedir.

Kurumlar vergisi indirimi senaryosunda, LCOH değeri 5,451 USD/kg seviyesine düşerek baz senaryoya kıyasla sınırlı ancak ölçülebilir bir iyileşme göstermektedir. Hidrojen satış fiyatı 7 USD/kg civarında IRR %8,28'e yükselmekte ve NPV pozitif bölgeye geçmektedir. Vergi indiriminin etkisi özellikle orta ve yüksek satış fiyatlarında daha belirgin hale gelmekte, 10 USD/kg seviyesinde IRR yaklaşık %13,7'ye ulaşmaktadır. Genel olarak bu senaryo, diğer politika araçlarına kıyasla daha sınırlı bir ekonomik kaldıraç sağlamaktadır.

Karbon kredisi senaryosu, sistem ekonomisi üzerinde çok daha güçlü bir etki yaratmaktadır. Karbon fiyatının modele dâhil edilmesiyle LCOH değeri 4.188 USD/kg seviyesine düşmüş ve baz duruma kıyasla yaklaşık %23,4 oranında bir maliyet azalması sağlanmıştır. Bu senaryoda proje, hidrojen satış fiyatı 7 USD/kg seviyesinde dahi pozitif NPV üretmeye başlamaktadır. Aynı fiyat seviyesinde IRR yaklaşık %9,5'e yükselirken, geri ödeme süresi 10 yılın altına inmektedir. Satış fiyatının 9–10 USD/kg aralığında olması durumunda IRR

%13–14 seviyelerine ulaşmakta ve NPV hızlı bir artış göstermektedir. Bu sonuçlar, karbon fiyatlandırmasının yeşil hidrojen projeleri için güçlü bir ekonomik kaldıraç oluşturduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Yatırım vergi indirimi (Investment Tax Credit – ITC) senaryosunda, başlangıç sermaye maliyetlerinin bir kısmının vergi yoluyla geri kazanılması modele dâhil edilmiştir. Bu durumda LCOH değeri 4.48 USD/kg olarak hesaplanmış ve baz senaryoya göre yaklaşık %18 oranında bir düşüş sağlanmıştır. ITC senaryosunda hidrojen satış fiyatı 7 USD/kg seviyesinde IRR yaklaşık %9,23 olarak gerçekleşmekte, NPV pozitif değerlere ulaşmakta ve geri ödeme süresi 10 yıl civarına inmektedir. Satış fiyatının 8–9 USD/kg aralığında olması durumunda IRR %11–13 seviyelerine çıkmakta ve geri ödeme süresi 8–9 yıl bandına gerilemektedir. Bu durum, sermaye desteklerinin özellikle yatırımın erken dönemlerinde proje fizibilitesini dikkate değer ölçüde güçlendirdiğini göstermektedir.

Hızlandırılmış amortisman senaryosu, değerlendirilen tüm politika mekanizmaları arasında en güçlü ekonomik iyileşmeyi sağlamıştır. Bu senaryoda LCOH değeri 4,216 USD/kg seviyesine düşerek baz duruma kıyasla yaklaşık %23 oranında bir maliyet avantajı oluşturmuştur. Hidrojen satış fiyatı 7 USD/kg seviyesinde IRR %9,7'ye yaklaşmakta ve NPV belirgin şekilde pozitif olmaktadır. 8 USD/kg seviyesinde IRR %11,6'ya ulaşırken geri ödeme süresi 8 yıl seviyesine düşmektedir. Daha yüksek satış fiyatlarında ise IRR %14–15 bandına çıkmakta ve geri ödeme süresi 5–6 yıl aralığına kadar gerilemektedir. Bu sonuçlar, amortisman temelli teşviklerin nakit akışının zamanlamasını iyileştirerek yatırımcı açısından belirgin bir avantaj sağladığını göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, karbon kredisi, yatırım vergi indirimi (ITC) ve özellikle hızlandırılmış amortisman senaryolarının, yeşil hidrojen üretim maliyetini anlamlı biçimde düşürdüğü ve projenin ekonomik fizibilitesini güçlendirdiği görülmektedir. Baz senaryoda 8 USD/kg civarında başlayan ekonomik fizibilite, destekleyici politika mekanizmaları altında 6–7 USD/kg seviyelerine kadar gerilemektedir. Bu durum, yeşil hidrojenin fosil bazlı hidrojenle maliyet farkının 1–1,3 USD/kg mertebesinde kapatılabileceğini göstermekte ve CBAM uyumlu politika çerçevelerinin proje ekonomisi üzerindeki etkili rolünü nicel olarak ortaya koymaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışma, yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretim sistemlerini; mekânsal uygunluk, zamana bağlı üretim davranışı, elektrolizör işletmesi, ekonomik performans ve politika etkilerini birlikte ele alan bütünsel bir çerçevede değerlendirmiştir. Bu kapsamda coğrafi bilgi sistemleri tabanlı yer seçimi, saatlik dinamik simülasyon, tekno-ekonomik analiz ve çok amaçlı optimizasyon ortak bir değerlendirme yapısı içinde bir araya getirilmiştir. Yer seçimi sonuçları nihai karar olarak kabul edilmemiş; belirlenen lokasyonlar işletme ve yatırım koşulları bakımından saatlik simülasyon, optimizasyon ve ekonomik analizlerle yeniden incelenmiştir. Böylece literatürde, çoğunlukla ayrı biçimde değerlendirilen karar aşamaları arasında ilişki kurulmuş ve geliştirilen çerçevenin farklı coğrafya ve sistem yapılarına uyarlanabilirliği tartışılmıştır.

Yer seçimi analizleri, tek bir ÇKKV yöntemi veya ağırlıklandırma yaklaşımına dayalı sonuçların karar sürecini sınırlayabileceğine işaret etmektedir. Farklı yöntemlerin ve ağırlık senaryolarının birlikte kullanılması, alternatiflerin farklı açılardan karşılaştırılmasına imkân sağlamıştır. Borda–kararlılık yaklaşımıyla yalnızca yüksek sıralama elde eden alternatifler değil, aynı zamanda yöntem değişimlerine karşı konumunu büyük ölçüde koruyan seçenekler de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda Bandırma, Balıkesir’de değerlendirilen alanlar arasında performans ve kararlılık bakımından en öne çıkan lokasyon olmuştur.

Mekânsal uygunluğun sistem performansını tek başına açıklamakta yetersiz kalması nedeniyle, enerji üretiminin zamana bağlı değişimi de incelenmiştir. Saatlik analizlerde güneş ve rüzgâr kaynaklarının belirli dönemlerde birbirini tamamladığı görülmüştür. Ancak üretim saatleri ile elektrik fiyatlarının her zaman örtüşmemesi, bu tamamlayıcılığın ekonomik sonuçlara aynı ölçüde yansımadağını göstermiştir. Bu bulgu, şebekeye bağlı hibrit sistemlerde yıllık toplam hidrojen üretiminin tek başına yeterli bir değerlendirme ölçütü olmadığına ve üretim zamanı, piyasa fiyatları ve şebeke etkileşiminin birlikte değerlendirilmesinin önemine işaret etmektedir.

Elektrolizörün işletme davranışı, sistem sonuçlarını etkileyen unsurlardan biri olmuştur. Maksimum verim noktası ile minimum güç tüketimi noktası aynı işletme koşullarında oluşmamıştır. Anot suyu sıcaklığı, soğutucu akışkan sıcaklığı, katot basıncı ve çalışma sıcaklığı için gerçekleştirilen Pareto analizinde, minimum güç tüketimi ile maksimum verim arasındaki ödünleşimi temsil eden diz noktası çözümü sırasıyla 25,29 °C, 41,85 °C, 28,55

bar ve 79,81 °C olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, elektrolizör işletme parametrelerinin verim ve güç tüketimi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesinin önemine işaret etmektedir.

Elektrolizör düzeyinde gerçekleştirilen bu optimizasyonun ardından, tüm enerji sistemi maliyet ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından çok amaçlı olarak değerlendirilmiştir. Sistem düzeyindeki optimizasyon sonuçlarında LCOH ile yenilenebilir enerji kullanım oranı arasında doğrusal olmayan bir ilişki gözlenmiştir. En düşük maliyeti sağlayan çözüm ile en yüksek yenilenebilir enerji oranına ulaşan çözüm aynı noktada oluşmamıştır. Bu nedenle sistem tasarımı, tek bir optimum çözüm yerine Pareto çözüm kümeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen Pareto cepheleri, maliyet ve yenilenebilir enerji kullanımı arasında farklı önceliklere karşılık gelen alternatif tasarım seçenekleri sunmuştur.

Algoritmaların performansları birlikte değerlendirildiğinde, MOPSO'nun bazı göstergelerde daha dengeli ve homojen dağılımlar ürettiği görülmüştür. NSGA-III ise belirli senaryolarda çözüm uzayının daha geniş bir bölümünü kapsayabilmiştir. Bu durum, algoritma performansının problem yapısına ve değerlendirme ölçütlerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Bandırma için elde edilen uzlaşım çözümlerinde yenilenebilir enerji oranı yaklaşık %90 düzeyine ulaşmıştır. LCOH değerleri MOPSO ve NSGA-III sonuçlarında sırasıyla yaklaşık 5,48 ve 5,29 USD/kg olarak hesaplanmıştır.

Geliştirilen tekno-ekonomik model, 20 yıllık analiz dönemi için toplam 175200 saatlik simülasyon verisine dayandırılmıştır. Böylece sistemin uzun dönemli teknik ve ekonomik davranışı saatlik çözünürlükte izlenebilmiştir. Sonuçlar, yatırım maliyetlerinin LCOH üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sistem ölçeğinin büyümesi belirli bir noktaya kadar maliyet avantajı sağlamış, ancak kapasite artışının etkisi daha yüksek ölçeklerde sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, sistem boyutlandırmasında yalnızca üretim artışının değil, yatırım maliyeti ve kapasite kullanım oranının da dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

İşletme stratejilerinin hidrojen maliyeti üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Günlük 1 saatlik dur-kalk senaryosunda minimum LCOH yaklaşık 5,67 USD/kg olarak hesaplanmıştır. Dur-kalk süresinin 8 saate yükseltilmesiyle bu değer yaklaşık 8,00 USD/kg seviyesine çıkmıştır. Ayrıca, duruş zamanlamasının etkisi değerlendirilmiş ve en düşük LCOH değerinin elektrolizörün 16.00–18.00 saatleri arasında devre dışı bırakıldığı durumda olduğu görülmüştür. Elektrolizörün uzun süre devre dışı kalması hidrojen üretimini azaltarak birim

maliyeti artırırken, yüksek elektrik fiyatlarının görüldüğü saatlerde kontrollü duruş belirli koşullarda maliyet avantajı sağlayabilmektedir. Bu nedenle duruş süresi kadar duruşun zamanlaması da önem taşımaktadır.

Su kaynağı ve depolama teknolojisi seçimlerinin de ekonomik sonuçları etkilediği görülmüştür. Yağmur suyu, incelenen seçenekler arasında düşük maliyetli alternatiflerden biri olarak öne çıkmıştır. Deniz suyu ise arıtma ve enerji gereksinimleri nedeniyle daha yüksek maliyet oluşturmuştur. Depolama sistemleri, yatırım ve işletme giderleri nedeniyle LCOH değerlerinde artışa yol açmıştır. Depolamasız senaryolar ile görece düşük maliyetli depolama seçenekleri daha rekabetçi sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte, depolama tercihinin nihai kullanım amacı ve arz güvenliği gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

İlaveten, ekonomik uygulanabilirlik üzerinde etkili değişkenlerden birinin hidrojen satış fiyatı olduğu belirlenmiştir. LCOH, hidrojen üretiminin seviyelendirilmiş birim maliyetini gösterirken, başa baş satış fiyatı yatırımın finansal koşullar, vergiler ve gelir-gider akışları altında ekonomik dengeye ulaşması için gerekli fiyatı ifade etmektedir. Bandırma'da 1 MW elektrolizör için depolamasız referans senaryosunda finansal başa baş noktası için gerekli hidrojen satış fiyatı yaklaşık 7,8–8,0 USD/kg olarak hesaplanmıştır. Politika ve teşvik senaryolarında bu eşikte farklı düzeylerde düşüşler görülmüştür. Başa baş satış fiyatı karbon kredisi senaryosunda 6,21 USD/kg, yatırım vergi kredisi senaryosunda 5,88 USD/kg ve azaltılmış kurumlar vergisi senaryosunda 6,68 USD/kg seviyesine gerilemiştir. Hızlandırılmış amortisman senaryosunda ise 5,52 USD/kg değeri elde edilmiştir. Bu sonuçlar; karbon kredisi, yatırım desteği, vergi indirimi ve amortisman uygulamalarının yeşil hidrojen projelerinin ekonomik görünümüne katkı sunabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Sonuçlar, kullanılan meteorolojik veriler, teknoloji maliyetleri, elektrik alım-satım fiyatları ve finansal kabuller çerçevesinde değerlendirilmelidir. Modelde güneş enerjisi sistemi, rüzgâr türbini ve elektrolizör davranışı saatlik çözünürlükte ele alınmıştır. Ancak ekipman arızaları, izin süreçleri, arazi mülkiyeti, şebeke bağlantı kapasitesi ve tedarik zinciri belirsizlikleri ayrıntılı olarak modellenmemiştir. Su ve depolama seçenekleri ekonomik açıdan karşılaştırılmış, ancak ayrıntılı yaşam döngüsü analizi ve çevresel etki değerlendirmesi kapsam dışında bırakılmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, doğrudan bir yatırım kararı yerine alternatif

lokasyonların ve sistem konfigürasyonlarının karşılaştırılmasına yönelik karar destek çıktıları olarak değerlendirilmelidir.

Gelecek çalışmalarda elektrik fiyatlarının, meteorolojik koşulların, karbon fiyatlarının, teşvik mekanizmalarının ve ekipman maliyetlerinin zamana bağlı olarak modele dâhil edilmesi daha ayrıntılı sonuçlar sağlayabilir. Belirsizlik ve risk analizlerinin eklenmesi, farklı koşullar altında sistem davranışının incelenmesine katkı sunabilir. Hidrojenin taşınması, depolanması ve son kullanım aşamaları da değer zincirine dâhil edilebilir. Amonyak, metanol ve sentetik yakıt üretimi gibi hidrojen türevi uygulamalar modelin kapsamını genişletebilir. Yaşam döngüsü analizi ve karbon ayak izi hesaplamalarıyla sistemlerin çevresel performansı da değerlendirilebilir. Farklı coğrafyalar, elektrolizör teknolojileri ve hibrit yenilenebilir enerji sistemleri üzerine yapılacak uygulamalar, geliştirilen yaklaşımın farklı koşullardaki kullanılabilirliğinin incelenmesine imkân verebilir.

Genel olarak bulgular, yeşil hidrojen sistemlerinde yer seçimi, saatlik işletme davranışı, sistem boyutlandırması ve ekonomik koşulların birlikte değerlendirilmesinin önemini göstermektedir. Bu bileşenlerin ayrı ayrı ele alınması, sistem performansının eksik değerlendirilmesine neden olabilir. Çalışmada kullanılan bütünleşik yaklaşımın, farklı coğrafya ve teknoloji koşullarında yürütülecek benzer planlama çalışmalarına katkı sunabileceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abdelghafar, Aasim Ahmed, Olabi, Valentina, Mahmoud, Montaser, and Jouhara, Hussam**, 2025, Green Hydrogen Storage Technologies, 376–388, *Comprehensive Green Materials*, Elsevier.
- Abubakar, Ali, Borkor, Reindorf N., and Amoako-Yirenkyi, Peter**, 2022, Stochastic Optimal Design of Household-Based Hybrid Energy Supply Systems Using Sample Average Approximation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, :1–19, <https://doi.org/10.1155/2022/9021413>.
- Akarsu, B. and Serdar Genç, M.**, 2022, Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems, *Fuel*, 324, :124465, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124465>.
- Al Garni, H.Z. and Awasthi, A.**, 2017, Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied Energy*, 206, :1225–1240, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>.
- Algburi, Sameer, Al-Dulaimi, Omer, Fakhrudeen, Hassan Falah, Khalaf, D.H., Hanoon, R.N., Jabbar, F.I., Hassan, Q., Al-Jiboory, A.K., and Kiconco, S.**, 2025, The green hydrogen role in the global energy transformations, *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 8, :100118, <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100118>.
- Al-Ghaithi, A.A.**, 2025, Techno-Economic Analysis of Hydrogen Heavy Mobility: A Lighthouse Project for Low Carbon Transportation in the Sultanate of Oman, <https://doi.org/10.2118/229053-ms>.
- Ali Mohammed Elaibi**, 2026, Economic Analysis of Hydrogen Production and Storage Systems Utilizing Renewable Energy Sources, *Journal of Mechanical Engineering*, 3(1), :11, <https://doi.org/10.47134/jme.v3i1.5485>.
- Al-Mahmodi, M., Ayadi, O., Wang, Y., and Al-Halhouli, A.**, 2025, Sensitivity-based techno-economic assessment approach for electrolyzer integration with hybrid photovoltaic-wind plants for green hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 97, :904–919, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.002>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Al-Owaidhani, A., Al-Sharafi, A., Al-Buraiki, A.S., Khalifa, A.E., and Yilbas, B.S.,** 2026, Techno-economic perspectives on hydrogen production systems via using renewable energy resources: A comprehensive review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 219, :153984, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153984>.
- Alrahim Shannan, N.M.A., Yahaya, N.Z., and Singh, B.,** 2013, Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison, 210–214, *2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, IEEE, Penang, Malaysia.
- Angelico, R., Giametta, F., Bianchi, B., and Catalano, P.,** 2025, Green Hydrogen for Energy Transition: A Critical Perspective, *Energies*, 18(2), :404, <https://doi.org/10.3390/en18020404>.
- ANIETO, S.,** 2025, Probabilistic Techno-Economic Assessment of Renewable-Powered Pem Electrolyzers Under Policy and Market Uncertainty, *International Journal of Engineering Processing and Safety Research*, <https://doi.org/10.70382/caijepsr.v10i5.007>.
- Anjum, M., Šimić, V., Alrasheedi, M., and Shahab, S.,** 2024, T-Spherical Fuzzy-Critic-Waspas Model for the Evaluation of Cooperative Intelligent Transportation System Scenarios, *Ieee Access*, 12, :61137–61151, <https://doi.org/10.1109/access.2024.3392019>.
- Anosike, N., Dara, J.E., Ngwaka, U., and Enemuoh, F.O.,** 2017, Analysis of Nigerian Electricity Generation Multi Year Tariff Order Pricing Model, *Energy and Power Engineering*, 09(10), :541–554, <https://doi.org/10.4236/epe.2017.910038>.
- Aziz, A.S.,** 2017, Techno-Economic Analysis Using Different Types of Hybrid Energy Generation for Desert Safari Camps in UAE, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, :2122–2135, <https://doi.org/10.3906/elk-1602-159>.
- Babatunde, D.E., Babatunde, O.M., Emezirinwune, M.U., Denwigwe, I.H., Okharedia, T., and Omodara, O.J.,** 2020, Feasibility Analysis of an Off-Grid Photovoltaic-Battery Energy System for a Farm Facility, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (Ijece)*, 10(3),2874, <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2874-2883>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Babich, A., Bashkatov, A., Yang, X., Mutschke, G., and Eckert, K.,** 2023, In-situ measurements of temperature field and Marangoni convection at hydrogen bubbles using schlieren and PTV techniques, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 215, :124466, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124466>.
- Bachorz, C., Verpoort, P.C., Ueckerdt, F., and Luderer, G.,** 2024, Exploring Techno-Economic Landscapes of Abatement Options for Hard-to-Electrify Sectors, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4241841/v1>.
- Bailey, D., Goonetilleke, A., and Campbell, D.,** 2003, A New Fuzzy Multicriteria Evaluation Method for Group Site Selection in GIS, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12(6), :337–347, <https://doi.org/10.1002/mcda.365>.
- Balaji, R. and You, F.,** 2024, Sailing Towards Sustainability: Offshore Wind's Green Hydrogen Potential for Decarbonization in Coastal USA, *Energy & Environmental Science*, 17(17), :6138–6156, <https://doi.org/10.1039/d4ee01460j>.
- Bansal, A.N. and Kumar, M.G.,** 2023, Integration of Sub-Surface Uncertainty With Project Economics Using Probabilistic Risk Modelling and Global Benchmarking of Oil and Gas Projects, <https://doi.org/10.4043/32804-ms>.
- Barbir, F.,** 2005a, PEM Electrolysis for Hydrogen Production, Springer.
- Barbir, F.,** 2005b, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar Energy*, 78(5), :661–669, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003>.
- Bard, A.J. and Faulkner, L.R.,** 2001, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, Wiley.
- Barrett, P.,** 2021, Can International Technological Diffusion Substitute for Coordinated Global Policies to Mitigate Climate Change?, *Imf Working Paper*, 2021(173), :1, <https://doi.org/10.5089/9781513585765.001>.
- Baseer, M.A., Rehman, S., Meyer, J.P., and Alam, Md.M.,** 2017, GIS-based Site Suitability Analysis for Wind Farm Development in Saudi Arabia, *Energy*, 141, :1166–1176, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.016>.
- Batista, L.S., Campelo, F., Guimarães, F.G., and Ramírez, J.A.,** 2011, Pareto Cone E-Dominance: Improving Convergence and Diversity in Multiobjective Evolutionary Algorithms, :76–90, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19893-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19893-9_6).

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., and Ignatius, J.,** 2012, A state-of-the-art survey of TOPSIS applications, *Expert Systems with Applications*, 39(17), :13051–13069, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>.
- Bekele, E., Ciancio, A., Massulli, A.R., and Santoli, L. d.,** 2024, Hydrogen Valleys for Local Energy System Decarbonization: An Assessment of the Environmental and Economic Aspects, *Journal of Physics Conference Series*, 2893(1), :012085, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012085>.
- Bekhti, M.A.,** 2025, Techno-Economic and Environmental Optimization of Standalone Hybrid Energy Systems Using Advanced Energy Storage for Remote Electrification in Southern Algeria, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 17(5), <https://doi.org/10.1063/5.0297401>.
- Bellotti, D., Rivarolo, M., and Magistri, L.,** 2022, A comparative techno-economic and sensitivity analysis of Power-to-X processes from different energy sources, *Energy Conversion and Management*, 260, :115565, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115565>.
- Betti, G.,** 2025, Gas Turbines for Electric Power Generation Coupled With Battery Energy Storage Systems and Renewable Energy Sources to Decarbonize LNG Applications, <https://doi.org/10.2118/229181-ms>.
- Bhandari, R., Trudewind, C.A., and Zapp, P.,** 2014, Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review, *Journal of Cleaner Production*, 85, :151–163, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>.
- Bhattacharya, S., Braun, C., and Leopold, U.,** 2019, A Tensor Based Framework for Large Scale Spatio-Temporal Raster Data Processing, *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W14, :3–9, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w14-3-2019>.
- Bocianowski, J., Wrońska–Pilarek, D., Krysztofiak-Kaniewska, A., Matusiak, K., and Wiatrowska, B.,** 2024, Comparison of Pearson’s and Spearman’s Correlation Coefficients Values for Selected Traits of *Pinus Sylvestris* L., <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4380975/v1>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bonanno, M., Müller, K., Bensmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., Aili, D., Franken, T., Chromik, A., Peach, R., Freiberg, A.T.S., and Thiele, S.,** 2024, Review and Prospects of PEM Water Electrolysis at Elevated Temperature Operation, *Advanced Materials Technologies*, 9(2), :2300281, <https://doi.org/10.1002/admt.202300281>.
- Bösch, S. and Rathmann, J.,** 2018, Deployment of Renewable Energies in Germany: Spatial Principles and Their Practical Implications Based on a GIS-Tool, *Advances in Geosciences*, 45, :115–123, <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-115-2018>.
- Bosetti, V. and Tavoni, M.,** 2009, Uncertain R&D, Backstop Technology and GHGs Stabilization, *Energy Economics*, 31, :S18–S26, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.03.002>.
- Bouwman, P.J.,** 2024, (Invited) Industrialization of PEM Electrolyzer Stack Platforms: Driving Lab-Scale Innovation to Multi-Mw Implementation, *Ecs Meeting Abstracts*, MA2024-01(34), :1866–1866, <https://doi.org/10.1149/ma2024-01341866mtgabs>.
- Branke, J., Deb, K., Dierolf, H., and Osswald, M.,** 2004, Finding Knees in Multi-objective Optimization, 722–731, *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VIII*, Springer.
- Britto, A. and Pozo, A.,** 2012, Using Archiving Methods to Control Convergence and Diversity for Many-Objective Problems in Particle Swarm Optimization, :1–8, <https://doi.org/10.1109/cec.2012.6256149>.
- Buonanno, P., Carraro, C., and Galeotti, M.,** 2003, Endogenous Induced Technical Change and the Costs of Kyoto, *Resource and Energy Economics*, 25(1), :11–34, [https://doi.org/10.1016/s0928-7655\(02\)00015-5](https://doi.org/10.1016/s0928-7655(02)00015-5).
- Caldeira, R. and Infante-Moro, A.,** 2025, Strategic hydrogen management: driving a sustainable energy future, *Frontiers in Energy Research*, 13, :1540396, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1540396>.
- Carapellese, F., Clerck, V.D., Sirigu, S.A., Giorgi, G., Bonfanti, M., Faedo, N., and Giorcelli, E.,** 2024, Multi-Objective Optimization of an Inertial Wave Energy Converter for Multi-Directional Wave Scatter, *Machines*, 12(10), :736, <https://doi.org/10.3390/machines12100736>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., and Stolten, D.,** 2013a, A comprehensive review on PEM water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), :4901–4934, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>.
- Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., and Stolten, D.,** 2013b, A comprehensive review on PEM water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), :4901–4934, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>.
- Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., and Stolten, D.,** 2013c, A comprehensive review on PEM water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, :4901–4934.
- Carraro, C. and Büchner, B.,** 2004, Economic and Environmental Effectiveness of a Technology-Based Climate Protocol, *SSRN Electronic Journal*, <https://doi.org/10.2139/ssrn.544883>.
- Casimir, J. and Gunnarsson, C.,** 2020, Farmers current practices, and their opinion on supplying straw for production of second-generation biofuels in Sweden, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20047.10408>.
- Çengel, Y.A. and Boles, M.A.,** 2019, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill Education, New York.
- Cervi, W.R., Lamparelli, R.A.C., Seabra, J.E.A., Junginger, M., Jong, S. d., and Hilst, F. v. d.,** 2019, Spatial Modeling of Techno-economic Potential of Biojet Fuel Production in Brazil, *GCB Bioenergy*, 12(2), :136–157, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12659>.
- Chang, D.-Y.,** 1996, Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95(3), :649–655, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2).
- Chen, C. and Huang, J.,** 2022, Deriving Fuzzy Weights From the Consistent Fuzzy Analytic Hierarchy Process, *Mathematics*, 10(19), :3499, <https://doi.org/10.3390/math10193499>.
- Chen, T., Zhou, Y., Liu, M., Yuan, C., Ye, X., Zhan, Z., and Wang, S.,** 2015, High Performance Solid Oxide Electrolysis Cell With Impregnated Electrodes, *Electrochemistry Communications*, 54, :23–27, <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.02.015>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Choi, H., Lee, H., Han, J., and Roh, K.**, 2024, Revisiting the cost analysis of importing liquefied green hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 82, :817–827, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.418>.
- Cian, E.D., Bosetti, V., and Tavoni, M.**, 2011, Technology Innovation and Diffusion in “Less Than Ideal” Climate Policies: An Assessment With the WITCH Model, *Climatic Change*, 114(1), :121–143, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0320-5>.
- Cian, E.D. and Tavoni, M.**, 2012, Do Technology Externalities Justify Restrictions on Emission Permit Trading?, *Resource and Energy Economics*, 34(4), :624–646, <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2012.05.009>.
- Coelho, L. d. S., Ayala, H.V.H., and Alotto, P.**, 2010, A Multiobjective Gaussian Particle Swarm Approach Applied to Electromagnetic Optimization, *Ieee Transactions on Magnetics*, 46(8), :3289–3292, <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2047250>.
- Coello, C.A.C., Pulido, G.T., and Lechuga, M.S.**, 2004, Handling multiple objectives with particle swarm optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), :256–279, <https://doi.org/10.1109/TEVC.2004.826067>.
- Colangelo, G., Spirito, G., Milanese, M., and De Risi, A.**, 2024, Hydrogen production from renewable energy resources: A case study, *Energy Conversion and Management*, 311, :118532, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118532>.
- Concawe**, 2003, Hydrogen: A CO<sub>2</sub>-free fuel?, Concawe.
- Connelly, E., Penev, M., Elgowainy, A., and Hunter, C.**, 2019, Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs, U.S. Department of Energy.
- Cromley, R.G. and Huffman, F.T.**, 2006, Modeling Situation Factors Used in MCE Procedures for Raster GIS, *Transactions in Gis*, 10(2), :239–251, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.00255.x>.
- Croux, C. and Oellerer, V.**, 2015, Robust and Sparse Estimation of the Inverse Covariance Matrix Using Rank Correlation Measures, *SSRN Electronic Journal*, <https://doi.org/10.2139/ssrn.2619054>.
- Cui, L., Xu, Y., Xu, L., and Huang, G.**, 2021, Wind Farm Location Special Optimization Based on Grid CBS and Choquet Fuzzy Integral Method in Dalian City, China, *Energies*, 14(9), :2454, <https://doi.org/10.3390/en14092454>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Curcio, E.**, 2025, Techno-economic analysis of hydrogen production: Costs, policies, and scalability in the transition to net-zero, *International Journal of Hydrogen Energy*, 128, :473–487, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.013>.
- Damodaran, A.**, 2016, *Applied Corporate Finance*, Wiley, New York.
- Darwisman, S.**, 2025, Green Port Strategies for Indonesian Maritime Logistics: A Systematic Review of Mining Barging and General Cargo, *Dinasti International Journal of Education Management and Social Science*, 7(2), :1287–1303, <https://doi.org/10.38035/dijemss.v7i2.5796>.
- Deb, K.**, 2001, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons.
- Deb, K. and Jain, H.**, 2014, An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), :577–601, <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.**, 2002, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), :182–197, <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- Delamater, P.L., Messina, J.P., Shortridge, A., and Grady, S.C.**, 2012, Measuring Geographic Access to Health Care: Raster and Network-Based Methods, *International Journal of Health Geographics*, 11(1), :15, <https://doi.org/10.1186/1476-072x-11-15>.
- Deng, T., Tang, P., Lin, CH.S., and Li, X.**, 2018, Multi-Objective Trade-Off Optimal Control of Energy Management for Hybrid System, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(4), <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1146-0>.
- Dinčić, I., Antonijević, V., and Vlaisavljević, D.**, 2025, Analysis of Operational and Financial Performance Indicators of a Green Hydrogen Production Plant and a Gas-Fired Turbine With Hydrogen Blending, :1047–1059, <https://doi.org/10.46793/cigre37.c1.06>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dominic, P.D.D., Jati, H., Sellappan, P., and Nee, G.K.**, 2011, A Comparison of Asian E-Government Websites Quality: Using a Non-Parametric Test, *International Journal of Business Information Systems*, 7(2), :220, <https://doi.org/10.1504/ijbis.2011.038513>.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A.**, 2013, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley.
- El-hosiny, A.M., El-Ghareeb, H.A., Shabana, B.T., and AbouElfetouh, A.**, 2021, A Hybrid Neutrosophic GIS-MCDM Method Using a Weighted Combination Approach for Selecting Wind Energy Power Plant Locations: A Case Study of Sinai Peninsula, Egypt, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 21(1), :12–28, <https://doi.org/10.5391/ijfis.2021.21.1.12>.
- Eljack, F. and Kazi, M.-K.**, 2021, Prospects and Challenges of Green Hydrogen Economy via Multi-Sector Global Symbiosis in Qatar, *Frontiers in Sustainability*, 1, :612762, <https://doi.org/10.3389/frsus.2020.612762>.
- Elmansour, J., Hajjaji, A., Belhora, F., and Hendrick, P.**, 2022, Location of seawater pumped storage hydropower plants: Case of Morocco, *Materials Today: Proceedings*, 66, :45–57, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.145>.
- Erbey, A., Fidan, Ü., and Gündüz, C.**, 2025, A Robust Hybrid Weighting Scheme Based on IQRBOW and Entropy for McDm: Stability and Advantage Criteria in the VIKOR Framework, *Entropy*, 27(8), :867, <https://doi.org/10.3390/e27080867>.
- Erdin, C. and Akbaş, H.**, 2019, A Comparative Analysis of Fuzzy TOPSIS and Geographic Information Systems (GIS) for the Location Selection of Shopping Malls: A Case Study From Turkey, *Sustainability*, 11(14), :3837, <https://doi.org/10.3390/su11143837>.
- European Commission**, 2014, *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*, European Commission, Brussels.
- European Commission Joint Research Centre**, 2025, PVCBS(Photovoltaic Geographical Information System), [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/).
- EEA**, 2020, CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 2020\_20u1, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Evangelopoulou, S., De Vita, A., Zazias, G., and Capros, P.,** 2019, Energy System Modelling of Carbon-Neutral Hydrogen as an Enabler of Sectoral Integration within a Decarbonization Pathway, *Energies*, 12(13), :2551, <https://doi.org/10.3390/en12132551>.
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O., and Mariño, M.A.,** 2010, MOPSO Algorithm and Its Application in Multipurpose Multireservoir Operations, *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), :794–811, <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.105>.
- Fathi, M.R., Safari, H., and Faghhi, A.,** 2013, Integration of Graph Theory and Matrix Approach With Fuzzy AHP for Equipment Selection, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(2), <https://doi.org/10.3926/jiem.403>.
- Ferrete, F., Molina, A., Cabello González, G.M., Moreno-Racero, Á., Olmedo, H., and Iranzo, A.,** 2025, Solid Oxide Electrolyzers Process Integration: A Comprehensive Review, *Processes*, 13(8), :2656, <https://doi.org/10.3390/pr13082656>.
- Feu, R.J. d., Funke, S.W., Kramer, S.C., Culley, D.M., Hill, J., Halpern, B.S., and Piggott, M.D.,** 2017, The Trade-Off Between Tidal-Turbine Array Yield and Impact on Flow: A Multi-Objective Optimisation Problem, *Renewable Energy*, 114, :1247–1257, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.081>.
- Filipič, B. and Lorencin, I.,** 2012, Evolutionary Multiobjective Design of an Alternative Energy Supply System, <https://doi.org/10.1109/cec.2012.6256159>.
- Findawati, Y., Qomariyah, N., Fitroni, A.S., and Abdullah, D.,** 2018, Decision Support System for Islamic Couple Selection Using Fuzzy-Ahp and WSM Method Based Web, *Matec Web of Conferences*, 197, :15009, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819715009>.
- Flora, F.M.I.,** 2025, A GIS-based on application of Monte Carlo and multi-criteria decision-making approach for site suitability analysis of solar-hydrogen production: Case of Cameroon, *Heliyon*, 11(1), :e41541, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41541>.
- Forrester, A.I.J. and Keane, A.J.,** 2009, Recent advances in surrogate-based optimization, *Progress in Aerospace Sciences*, 45(1–3), :50–79, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.11.001>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Foutsitzi, G., Gogos, C., Antoniadis, N., and Magklaras, A.,** 2022, Multicriteria Approach for Design Optimization of Lightweight Piezoelectric Energy Harvesters Subjected to Stress Constraints, *Information*, 13(4), :182, <https://doi.org/10.3390/info13040182>.
- Franco, A. and Giovannini, C.,** 2023a, Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives, *Sustainability*, 15(24), :16917, <https://doi.org/10.3390/su152416917>.
- Franco, A. and Giovannini, C.,** 2023b, Routes for Hydrogen Introduction in the Industrial Hard-to-Abate Sectors for Promoting Energy Transition, *Energies*, 16(16), :6098, <https://doi.org/10.3390/en16166098>.
- Franco, A. and Giovannini, C.,** 2024, Integration of Hydrogen for Decarbonisation: The Possible Contribution in “Hard-to-Abate” Sectors, *Journal of Physics Conference Series*, 2893(1), :012069, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012069>.
- Franco, A. and Giovannini, C.,** 2023c, Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives, *Sustainability*, 15(24), :16917, <https://doi.org/10.3390/su152416917>.
- Franco, A. and Rocca, M.,** 2024a, Industrial Decarbonization Through Blended Combustion of Natural Gas and Hydrogen, <https://doi.org/10.20944/preprints202407.0708.v1>.
- Franco, A. and Rocca, M.,** 2024b, Renewable Electricity and Green Hydrogen Integration for Decarbonization of “Hard-to-Abate” Industrial Sectors, *Electricity*, 5(3), :471–490, <https://doi.org/10.3390/electricity5030024>.
- Freire Ordóñez, D., Ganzer, C., Halfdanarson, T., González Garay, A., Patrizio, P., Bardow, A., Guillén-Gosálbez, G., Shah, N., and Mac Dowell, N.,** 2023, Quantifying global costs of reliable green hydrogen, *Energy Advances*, 2(12), :2042–2054, <https://doi.org/10.1039/D3YA00318C>.
- Fu, C., Lu, J., Ge, W., Tan, C., and Li, B.,** 2023, A Review of Electromagnetic Energy Regenerative Suspension System & Key Technologies, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 135(3), :1779–1824, <https://doi.org/10.32604/cmcs.2022.023092>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gaikwad, P.S., Mondal, K., Shin, Y.K., Van Duin, A.C.T., and Pawar, G., 2023,** Enhancing the Faradaic efficiency of solid oxide electrolysis cells: progress and perspective, *npj Computational Materials*, 9(1), :149, <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01044-1>.
- Galletti, A., Pasimeni, F., Melideo, D., Desideri, U., and Alkemade, F., 2025,** Learning in green hydrogen production: Insights from a novel European dataset, *International Journal of Hydrogen Energy*, 148, :149812, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.002>.
- Garbe, S., Schmidt, T.J., and Gubler, L., 2020,** Elevated Temperature Proton Exchange Membrane Water Electrolysis for Reduced Cost of Green Hydrogen Production, *Ecs Meeting Abstracts*, MA2020-02(38), :2452–2452, <https://doi.org/10.1149/ma2020-02382452mtgabs>.
- Genovese, M., Schlüter, A., Scionti, E., Piraino, F., Corigliano, O., and Fragiaco, P., 2023,** Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(44), :16545–16568, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.194>.
- Giannakis, A., Karlis, A., and Karnavas, Y.L., 2018,** A combined control strategy of a DFIG based on a sensorless power control through modified phase-locked loop and fuzzy logic controllers, *Renewable Energy*, 121, :489–501, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.052>.
- Glenk, G. and Reichelstein, S., 2019,** Economics of converting renewable power to hydrogen, *Nature Energy*, 4(3), :216–222, <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>.
- Global Green Growth Institute (GGGI), 2023,** Hydropower to Hydrogen: Green Hydrogen Production Using Hydropower, Global Green Growth Institute, Seoul, South Korea.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A., 2016,** Deep Learning, MIT Press.
- Google, 2025,** Google Earth (Version 7.3).

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Goswami, S.S., Behera, D.K., Afzal, A., Kaladgi, A.R., Khan, S.A., Rajendran, P., Subbiah, R., and Asif, M.**, 2021, Analysis of a Robot Selection Problem Using Two Newly Developed Hybrid McDM Models of TOPSIS-ARAS and COPRAS-ARAS, *Symmetry*, 13(8), :1331, <https://doi.org/10.3390/sym13081331>.
- Grant, E.J., Brunik, K., King, J.S., and Clark, C.E.**, 2024, Hybrid Power Plant Design for Low-Carbon Hydrogen in the United States, *Journal of Physics Conference Series*, 2767(8), :082019, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/8/082019>.
- Greaker, M. and Pade, L.-L.**, 2009, Optimal Carbon Dioxide Abatement and Technological Change: Should Emission Taxes Start High in Order to Spur R&D?, *Climatic Change*, 96(3), :335–355, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9643-x>.
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA)**, 2023, Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu Güdümlü Projesi'nde İmzalar Atıldı, <https://www.gmka.gov.tr/haber/guney-marmara-hidrojen-kiyisi-platformu-gudumlu-projesinde-imzalar-atildi>.
- Güven, A.F. and Mete, M.K.**, 2021, Balıkesir'in Erdek İlçesi için Şebeke Bağlantılı Hibrit Enerji Sistemi Fizibilite Çalışması ve Ekonomik Analizi, *Mühendis ve Makina*, 63(706), :138–158, <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1085748>.
- Habermeyer, F., Weyand, J., Maier, S., Kurkela, E., and Dietrich, R.-U.**, 2024, Power Biomass to Liquid — an option for Europe's sustainable and independent aviation fuel production, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(14), :16199–16217, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03671-y>.
- Hagan, M.T. and Menhaj, M.B.**, 1994, Training feedforward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), :989–993, <https://doi.org/10.1109/72.329697>.
- Hasan, M.M. and Genç, G.**, 2022, Techno-economic analysis of solar/wind power based hydrogen production, *Fuel*, 324, :124564, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124564>.
- Hashmi, S.M., Noor, S., and Parveen, W.**, 2025, Advances in water splitting and lithium-ion batteries: pioneering sustainable energy storage and conversion technologies, *Frontiers in Energy Research*, 12, :1465349, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1465349>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J.,** 2009, *The Elements of Statistical Learning*, Springer.
- He, H., Lu, Z., Guo, X., Shi, C., Jia, D., Chen, C., and Guerrero, J.M.,** 2022, Optimized Control Strategy for Photovoltaic Hydrogen Generation System With Particle Swarm Algorithm, *Energies*, 15(4), :1472, <https://doi.org/10.3390/en15041472>.
- Heaton, J.,** 2017, Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning: The MIT Press, 2016, 800 pp, ISBN: 0262035618, *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 19, <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>.
- Heier, S.,** 2014, *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Herdem, M.S. and Nathwani, J.,** 2024, A Beginner's Guide for Policymakers and Governance for a Green Hydrogen Ecosystem, *Balsillie Papers*, 6(4), <https://doi.org/10.51644/bap64>.
- Herrmannsdörfer, T., Linhardt, C., Welzl, M., Jess, A., and Brüggemann, D.,** 2025, Multi-criteria analysis framework for the optimal localization of power-to-gas plants: A case study for Germany, *International Journal of Hydrogen Energy*, 194, :152469, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152469>.
- High-Level Commission on Carbon Prices,** 2017, Report of the High-Level Commission on Carbon Prices, World Bank, Washington, DC.
- Hilawie, A. and Shewarega, F.,** 2023, Improved Multi Objective Particle Swarm Optimization Based Reactive Power Optimization for Ensuring Voltage Security of Power Systems, *Engineering Research Express*, 5(4), :045062, <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad0afc>.
- Hojjati, A., Monadi, M., Faridhosseini, A., and Mohammadi, M.,** 2018, Application and Comparison of NSGA-II and MOPSO in Multi-Objective Optimization of Water Resources Systems, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(3), :323–329, <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0006>.
- Hong, Y. and Apolinario, G.F.D.,** 2021, Uncertainty in Unit Commitment in Power Systems: A Review of Models, Methods, and Applications, *Energies*, 14(20), :6658, <https://doi.org/10.3390/en14206658>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hornik, K., Stinchcombe, M., and White, H.**, 1989, Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, 2(5), :359–366, [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).
- Hsieh, T.-Y., Lu, S.-T., and Tzeng, G.-H.**, 2004, Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings, *International Journal of Project Management*, 22(7), :573–584, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.01.002>.
- Hu, Z., Yang, J., Cui, H., Sun, H., and Wei, L.**, 2017, Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Leader Combination of Decomposition and Dominance, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(3), :1577–1588, <https://doi.org/10.3233/jifs-17336>.
- Hughes, J.P., Clipsham, J., Chavushoglu, H., Rowley-Neale, S.J., and Banks, C.E.**, 2021, Polymer electrolyte electrolysis: A review of the activity and stability of non-precious metal hydrogen evolution reaction and oxygen evolution reaction catalysts, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, :110709, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110709>.
- Hwang, C.-L. and Yoon, K.**, 1981, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Hydrogen Energy Engineering Sources**, 2021, Hydrogen Production Process: Electrolyzer Design.
- Ibrahim, M.D., Binofai, F.A.S., and Mohamad, M.O.A.**, 2022, Transition to Low-Carbon Hydrogen Energy System in the UAE: Sector Efficiency and Hydrogen Energy Production Efficiency Analysis, *Energies*, 15(18), :6663, <https://doi.org/10.3390/en15186663>.
- Igalavithana, A.D., You, S., Zhang, L., Shang, J., Lehmann, J., Wang, X., Zhu, Y.-G., Tsang, D.C.W., Park, Y.-K., Hou, D., and Ok, Y.S.**, 2022, Progress, Barriers, and Prospects for Achieving a “Hydrogen Society” and Opportunities for Biochar Technology, *ACS ES&T Engineering*, 2(11), :1987–2001, <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00510>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ilangkumaran, M., Sasirekha, V., Anojkumar, L., Sakthivel, G., Raja, M.B., Raj, T.R.S., Siddhartha, CNS., Nizamuddin, P., and Kumar, S.P.,** 2013, Optimization of Wastewater Treatment Technology Selection Using Hybrid McDm, *Management of Environmental Quality an International Journal*, 24(5), :619–641, <https://doi.org/10.1108/meq-07-2012-0053>.
- Ilić, Z., Marinković, G., Bulatović, V., Matić, A., and Petrović, V.M.,** 2025, Comprehensive MCDM Approach in the Process of Land Consolidation Project Choice, *Land*, 14(9), :1798, <https://doi.org/10.3390/land14091798>.
- Imam, A.A., Abusorrah, A., and Marzband, M.,** 2024, Potential of Concentrated Solar Power in the Western Region of Saudi Arabia: A GIS-Based Land Suitability Analysis and Techno-Economic Feasibility Assessment, *Ieee Access*, 12, :1570–1598, <https://doi.org/10.1109/access.2023.3344752>.
- IEA,** 2019, The Future of Hydrogen: Seizing Today’s Opportunities, IEA, Paris.
- IEA,** 2024, Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris.
- IRENA,** 2020, Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, UAE.
- Jayachandran, M., Gatla, R.K., Flah, A., Milyani, A.H., Milyani, H.M., Blažek, V., Prokop, L., and Kraiem, H.,** 2024, Challenges and Opportunities in Green Hydrogen Adoption for Decarbonizing Hard-to-Abate Industries: A Comprehensive Review, *Ieee Access*, 12, :23363–23388, <https://doi.org/10.1109/access.2024.3363869>.
- Jena, C., Guerrero, J.M., Abusorrah, A., Al-Turki, Y., and Khan, B.,** 2022, Multi-Objective Generation Scheduling of Hydro-Thermal System Incorporating Energy Storage With Demand Side Management Considering Renewable Energy Uncertainties, *Ieee Access*, 10, :52343–52357, <https://doi.org/10.1109/access.2022.3172500>.
- Jeon, S.S., Kang, P.W., Klingenhof, M., Lee, H., Dionigi, F., and Strasser, P.,** 2023, Active Surface Area and Intrinsic Catalytic Oxygen Evolution Reactivity of NiFe LDH at Reactive Electrode Potentials Using Capacitances, *Acs Catalysis*, 13(2), :1186–1196, <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c04452>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ji, Y., Zhang, Y., Chen, L., Zuo, J., Wang, W., and Xu, C.,** 2025, The Optimal Dispatch for a Flexible Distribution Network Equipped With Mobile Energy Storage Systems and Soft Open Points, *Energies*, 18(11), :2701, <https://doi.org/10.3390/en18112701>.
- Jiang, S., Ong, Y.-S., Zhang, J., and Feng, L.,** 2014, Consistencies and Contradictions of Performance Metrics in Multiobjective Optimization, *Ieee Transactions on Cybernetics*, 44(12), :2391–2404, <https://doi.org/10.1109/tcyb.2014.2307319>.
- Johanning, S., Bruggemans, P., Edelenbosch, O., and Brückner, T.,** 2024, Integrative Review-Based Conceptual Modeling: An Agent-Based Modeling Synthesis of Dynamic Energy Tariff Research and Models, *Energies*, 17(22), :5715, <https://doi.org/10.3390/en17225715>.
- Jordan, D.C. and Kurtz, S.R.,** 2013, Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), :12–29, <https://doi.org/10.1002/pip.1182>.
- Jun, A., Kim, J., Shin, J., and Kim, G.,** 2016, Achieving High Efficiency and Eliminating Degradation in Solid Oxide Electrochemical Cells Using High Oxygen-Capacity Perovskite, *Angewandte Chemie*, 128(40), :12700–12703, <https://doi.org/10.1002/ange.201606972>.
- Kakavand, A., Sayadi, S., Tsatsaronis, G., and Behbahaninia, A.,** 2023, Techno-economic assessment of green hydrogen and ammonia production from wind and solar energy in Iran, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(38), :14170–14191, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.285>.
- Kalogirou, S.,** 2009, Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition*.
- Karel, W., Brauers, W., and Zavadskas, E.,** 2006, The MOORA method and its application to privatization in a transition economy, *Control and Cybernetics*, 35.
- Karras, T., Brosowski, A., and Thrän, D.,** 2022, A Review on Supply Costs and Prices of Residual Biomass in Techno-Economic Models for Europe, *Sustainability*, 14(12), :7473, <https://doi.org/10.3390/su14127473>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kehagias, D., Janković, M., Siavvas, M., and Gelenbe, E.,** 2021, Investigating the Interaction Between Energy Consumption, Quality of Service, Reliability, Security, and Maintainability of Computer Systems and Networks, *Sn Computer Science*, 2(1), <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00404-8>.
- Kendall, M.G. and Smith, B.B.,** 1939, The Problem of USDmUSD Rankings, *The Annals of Mathematical Statistics*, 10(3), :275–287, <https://doi.org/10.1214/aoms/1177732186>.
- Kennedy, J. and Eberhart, R.,** 1995, Particle swarm optimization, 1942–1948, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, Perth, WA, Australia.
- Khaleel, M., Yusupov, Z., Gunaser, M., El-Khozondar, H., Ahmed, A., and Alsharif, A.A.,** 2024, Towards Hydrogen Sector Investments for Achieving Sustainable Electricity Generation., *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 13(1), :71–96, <https://doi.org/10.51646/jsesd.v13i1.173>.
- Khan, H.R., Ahmed, M.A., and Dutta, M.,** 2024, Developing a Methodology to Assess Pedestrian Walkability in the City Markets Using Multi-Attribute Decision-Making Techniques, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2679(1), :1814–1831, <https://doi.org/10.1177/03611981241257506>.
- Khan, M.H.A., Heywood, P., Kuswara, A., Daiyan, R., MacGill, I., and Amal, R.,** 2022, An Integrated Framework of Open-Source Tools for Designing and Evaluating Green Hydrogen Production Opportunities, *Communications Earth & Environment*, 3(1), <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00640-1>.
- Kim, Y.R.,** 2026, Simulation Study, Techno-Economic, and Environmental Assessment of Hydrogen-Based DRI Production for Sustainable Steel Industry, *Processes*, 14(4), :651, <https://doi.org/10.3390/pr14040651>.
- Kınay, A.Ö. and Tezel, B.T.,** 2021, Modification of the Fuzzy Analytic Hierarchy Process via Different Ranking Methods, *International Journal of Intelligent Systems*, 37(1), :336–364, <https://doi.org/10.1002/int.22628>.
- Kohavi, R.,** 2001, A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection, 14.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ku, A.Y., Kocs, E.A., Afzal, S., Ewan, M., Glenn, J.R., Toma, F., Vickers, J., Weeks, B., and White, A.A.**, 2023, Opportunities for the materials research community to support the development of the H2 economy, *MRS Energy & Sustainability*, 10(2), :158–173, <https://doi.org/10.1557/s43581-023-00061-3>.
- Kumar, R., Joshi, A.H., Banka, K.K., and Rockett, P.**, 2008, Evolution of Hyperheuristics for the Biobjective 0/1 Knapsack Problem by Multiobjective Genetic Programming, :1227–1234, <https://doi.org/10.1145/1389095.1389335>.
- Kyocera Corporation**, 2008, KC200GHT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet.
- Lahijanian, M., Svoreňová, M., Morye, A.A., Yeomans, B., Rao, D., Posner, I., Newman, P., Kress-Gazit, H., and Kwiatkowska, M.**, 2016, Resource-Performance Trade-Off Analysis for Mobile Robot Design, <https://doi.org/10.48550/arxiv.1609.04888>.
- Lantz, E., Sigrin, B., Gleason, M., Preus, R., and Baring-Gould, I.**, 2016, Assessing the Future of Distributed Wind: Opportunities for Behind-the-Meter Projects, <https://doi.org/10.2172/1333625>.
- Larminie, J. and Dicks, A.**, 2003, Fuel Cell Systems Explained, Wiley.
- Lebrouhi, B.E., Djoupo, J.J., Lamrani, B., Benabdelaziz, K., and Kousksou, T.**, 2022, Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), :7016–7048, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.076>.
- Lee, J.-S., Cherif, A., Yoon, H.-J., Seo, S.-K., Bae, J.-E., Shin, H.-J., Lee, C., Kwon, H., and Lee, C.-J.**, 2022, Large-scale overseas transportation of hydrogen: Comparative techno-economic and environmental investigation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, :112556, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112556>.
- Leng, S., Ng, D.W.K., Zlatanov, N., and Schober, R.**, 2016, Multi-Objective Beamforming for Energy-Efficient SWIPT Systems, :1–7, <https://doi.org/10.1109/iccnc.2016.7440679>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, L.X. and Pavlak, G.S.**, 2023, Analyzing Harmony and Discord Among Optimal Building Controllers Responding to Energy, Cost, and Carbon Reduction Objectives, *Asme Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*, 4(1), <https://doi.org/10.1115/1.4056962>.
- Li, Y., Shao, S., and Zhang, F.**, 2018, An Analysis of the Multi-Criteria Decision-Making Problem for Distributed Energy Systems, *Energies*, 11(9), :2453, <https://doi.org/10.3390/en11092453>.
- Li, Y., Li, Z., Chen, Y., Li, X., and Lin, Y.**, 2003, Raster Space With Relativity, *Kybernetes*, 32(5/6), :629–639, <https://doi.org/10.1108/03684920210443716>.
- Li, Z., Ngambusabongsopa, R., Mohammed, E., and -, N.E.**, 2011a, A Novel Diversity Guided Particle Swarm Multi-Objective Optimization Algorithm, *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 5(1), :269–278, <https://doi.org/10.4156/jdcta.vol5.issue1.29>.
- Li, Z.**, 2014, Watershed Modeling Using Arc Hydro Based on DEMs: A Case Study in Jackpine Watershed, *Environmental Systems Research*, 3(1), :11, <https://doi.org/10.1186/2193-2697-3-11>.
- Li, Z., Zhu, Z., and Huiqin, Z.**, 2010, DSMOPSO: A Distance Sorting Based Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm, :2749–2753, <https://doi.org/10.1109/icnc.2010.5582682>.
- Li, Z., Zhu, Z., Song, Y., and Wei, Z.**, 2011b, A Multi-Objective Particle Swarm Optimizer With Distance Ranking and Its Applications to Air Compressor Design Optimization, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(5), :546–556, <https://doi.org/10.1177/0142331211406603>.
- Lima, G.A.C., Suslick, S.B., and Bordieri, C.A.**, 2005, A Quantitative Method for Estimation of Volatility of Oil Production Projects, <https://doi.org/10.2118/94661-ms>.
- Liu, C., Wang, H., Tang, Y., and Wang, Z.**, 2021, Optimization of a Multi-Energy Complementary Distributed Energy System Based on Comparisons of Two Genetic Optimization Algorithms, *Processes*, 9(8), :1388, <https://doi.org/10.3390/pr9081388>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liu, J., Liu, Y., Han, H., Zhang, X., Shu, X., and Chen, F.,** 2023a, A Two-Stage Maintenance and Multi-Strategy Selection for Multi-Objective Particle Swarm Optimization, *Complex & Intelligent Systems*, 9(6), :7523–7548, <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01128-x>.
- Liu, M., Zhu, X., Chen, Y., and Kong, Q.,** 2023b, Evaluation and Design of Dining Room Chair Based on Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP, *Bioresources*, 18(2), :2574–2588, <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.2574-2588>.
- Liu, Z., Lilin, Z., Zheng, C., Zhang, Y., Chen, B., Shao, Z., and Ge, J.,** 2025, Advanced Electrode Materials for Efficient Hydrogen Production in Protonic Ceramic Electrolysis Cells, *Advanced Materials*, 37(48), <https://doi.org/10.1002/adma.202503609>.
- Loron, A.S., Loron, M.S., and Peyvandi, G.,** 2015, An Integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process-Fuzzy Data Envelopment Analysis (FAHP-FDEA) Method for Intelligent Building Assessment, *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 22(2), :383–389, <https://doi.org/10.17559/tv-20140428223907>.
- Łosiewicz, B.,** 2024, Technology for Green Hydrogen Production: Desk Analysis, *Energies*, 17(17), :4514, <https://doi.org/10.3390/en17174514>.
- Love, J.G., O’Mullane, A.P., Boulaire, F.A., and Mackinnon, I.D.R.,** 2022, Impact of fuel cells on hydrogen energy pathways in a sustainable energy economy, *Sustainable Energy & Fuels*, 6(17), :4008–4023, <https://doi.org/10.1039/D2SE00923D>.
- Ma, X., Liu, S., Liu, H., and Zhao, S.,** 2022, The Selection of Optimal Structure for Stand-Alone Micro-Grid Based on Modeling and Optimization of Distributed Generators, *Ieee Access*, 10, :40642–40660, <https://doi.org/10.1109/access.2022.3164514>.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA),** 2025, Yer Bilimleri Veri Portalı, <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>.
- Mallapragada, D.S., Gençer, E., Insinger, P., Keith, D.W., and O’Sullivan, F.M.,** 2020, Can Industrial-Scale Solar Hydrogen Supplied from Commodity Technologies Be Cost Competitive by 2030?, *Cell Reports Physical Science*, 1(9), :100174, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100174>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Malczewski, J.**, 2006, GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), :703–726, <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
- Mansir, I.B., Okonkwo, P.C., and Farouk, N.**, 2024, Techno-Economic Optimization of a Photovoltaic-Wind Energy-Based Hydrogen Production System: A Case Study of Different Cities of Saudi Arabia, *Energy & Environment*, <https://doi.org/10.1177/0958305x241248373>.
- Mao, J. and Wang, C.**, 2016, Tax Incentives and Environmental Protection: Evidence From China's Taxpayer-Level Data, *China Finance and Economic Review*, 4(1), <https://doi.org/10.1186/s40589-016-0040-0>.
- Marinao-Rivas, R. and Zambrano-Bigiarini, M.**, 2022, hydroMOPSO: A Versatile Particle Swarm Optimization R Package for Multi-Objective Calibration of Environmental and Hydrological Models, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9902>.
- Marler, R.T. and Arora, J.S.**, 2004, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), :369–395, <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>.
- Massulli, A.R., Mojtahed, A., Ciancio, A., Vespasiano, D., and Santoli, L. d.**, 2024, Supercritical CO<sub>2</sub> Heat Pumps for Industrial Decarbonization: A Techno-Economic Analysis, *Journal of Physics Conference Series*, 2893(1), :012037, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012037>.
- MathWorks**, 2024, Simulink: Simulation and Model-Based Design, Natick, MA, USA.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., and Conover, W.J.**, 1979, A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, 21(2), :239, <https://doi.org/10.2307/1268522>.
- Mekonnin, A.S., Waclawiak, K., Humayun, M., Zhang, S., and Ullah, H.**, 2025, Hydrogen Storage Technology, and Its Challenges: A Review, *Catalysts*, 15(3), :260, <https://doi.org/10.3390/catal15030260>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mendler, F., Voglstätter, C., Müller, N., Smolinka, T., Holst, M., Hebling, C., and Koch, B.,** 2025, A newly developed spatially resolved modelling framework for hydrogen valleys: Methodology and functionality, *Advances in Applied Energy*, 17, :100207, <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100207>.
- Mert, S.O. and Özçelik, Z.,** 2012, Multi-Objective Optimization of a Direct Methanol Fuel Cell System Using a Genetic-Based Algorithm, *International Journal of Energy Research*, 37(10), :1256–1264, <https://doi.org/10.1002/er.2963>.
- Messaoudi, D., Settou, N., Negrou, B., and Settou, B.,** 2019, CBSbased multi-criteria decision making for solar hydrogen production sites selection in Algeria, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(60), :31808–31831, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.099>.
- Metegam, I.F.F., Bomeni, I.Y., Chara-Dackou, V.S., Njomo, D., and Tchinda, R.,** 2024, Assessment of the Geographic and Technical Potential for Large-Scale Wind Energy Production Using a GIS-Based McDm-Ahp Multi-Criteria Analysis Method and Sensitivity Analysis: Case of Cameroon, <https://doi.org/10.20944/preprints202402.0122.v1>.
- Miao, L., Li, D., Zhao, J., Liu, H., Hu, Y., and Wei, X.,** 2025, Optimal Scheduling of Active Distribution Networks With Hybrid Energy Storage Systems Under Real Road Network Topology, *Processes*, 13(5), :1492, <https://doi.org/10.3390/pr13051492>.
- Miettinen, K.,** 1998, Nonlinear Multiobjective Optimization, Springer US, Boston, MA.
- Millet, P. and Grigoriev, S.A.,** 2019, Water electrolysis technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, :287–305, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.030>.
- Ming, M., Wang, R., Zha, Y., and Zhang, T.,** 2017, Multi-Objective Optimization of Hybrid Renewable Energy System Using an Enhanced Multi-Objective Evolutionary Algorithm, *Energies*, 10(5), :674, <https://doi.org/10.3390/en10050674>.
- Mintz, M., Gillette, J., Elgowainy, A., Paster, M., Ringer, M., Brown, D., and Li, J.,** 2006, Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model for Hydrogen Distribution Options, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1983(1), :114–120, <https://doi.org/10.1177/0361198106198300116>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Minutillo, M., Perna, A., Forcina, A., Di Micco, S., and Jannelli, E.,** 2021, Analyzing the levelized cost of hydrogen in refueling stations with on-site hydrogen production via water electrolysis in the Italian scenario, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), :13667–13677, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.110>.
- Mirshokraee, S.A., Bedogni, S., Bindi, M., and Santoro, C.,** 2025, Substituting Natural Gas With Hydrogen for Thermal Application in a Hard-to-Abate Industry: A Real Case Study, *Hydrogen*, 6(2), :37, <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020037>.
- Mitra, S., Pinto, J.M., and Grossmann, I.E.,** 2014a, Optimal Multi-Scale Capacity Planning for Power-Intensive Continuous Processes Under Time-Sensitive Electricity Prices and Demand Uncertainty. Part I: Modeling, *Computers & Chemical Engineering*, 65, :89–101, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.01.016>.
- Mitra, S., Pinto, J.M., and Grossmann, I.E.,** 2014b, Optimal Multi-Scale Capacity Planning for Power-Intensive Continuous Processes Under Time-Sensitive Electricity Prices and Demand Uncertainty. Part II: Enhanced Hybrid Bi-Level Decomposition, *Computers & Chemical Engineering*, 65, :102–111, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.012>.
- Mohamed, A.-A.A., Ali, S.M., Alkhalaf, S., Senjyu, T., and Hemeida, A.M.,** 2019, Optimal Allocation of Hybrid Renewable Energy System by Multi-Objective Water Cycle Algorithm, *Sustainability*, 11(23), :6550, <https://doi.org/10.3390/su11236550>.
- Mohamed, I. and Otero, F.E.B.,** 2022, A Performance Study of Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithms for Market Timing, :1–10, <https://doi.org/10.1109/cifer52523.2022.9776019>.
- Mohammadi, S.D. and Saedi, B.,** 2024, Cemetery Site Selection Using GIS-based Extended Fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis in Hamedan City, Western Iran, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4862943/v1>.
- Msweli, N., Nnachi, G.U., and Richards, C.G.,** 2025, A Review of Green Hydrogen Technologies and Their Role in Enabling Sustainable Energy Access in Remote and Off-Grid Areas Within Sub-Saharan Africa, *Energies*, 18(18), :5035, <https://doi.org/10.3390/en18185035>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mukhametzyanov, I.Z. and Pamučar, D.**, 2024, “Thin” Structure of Relations in McDm Models. Equivalence of the MABAC, TOPSIS(L1) and RS Methods to the Weighted Sum Method, *Decision Making Applications in Management and Engineering*, 7(2), :418–442, <https://doi.org/10.31181/dmame7220241088>.
- Mukoni, E. and Garner, K.S.**, 2022, Multi-Objective Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Optimization for Optimal Hybrid (Wind and Grid)-Hydrogen Energy System Modelling, *Energies*, 15(19), :7079, <https://doi.org/10.3390/en15197079>.
- NASA POWER Project**, 2025, Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer and API.
- Nash, D., Aklil, D., Johnson, E., Gazey, R., and Ortisi, V.**, 2012, Hydrogen Storage, 131–155, *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, 2024, Land-Based Wind: Annual Technology Baseline 2024.
- Nebro, A.J., Durillo, J.J., García-Nieto, J., Coello, C.A.C., Luna, F., and Alba, E.**, 2009, SMPSO: A New PSO-based Metaheuristic for Multi-Objective Optimization, :66–73, <https://doi.org/10.1109/mcdm.2009.4938830>.
- Newell, R.G.**, 2010, The Role of Markets and Policies in Delivering Innovation for Climate Change Mitigation, *Oxford Review of Economic Policy*, 26(2), :253–269, <https://doi.org/10.1093/oxrep/grq009>.
- Newman, J. and Thomas-Alyea, K.**, 2012, *Electrochemical Systems*, Wiley.
- Niu, M., Li, X., Sun, C., Xiu, X., Wang, Y., Hu, M., and Dong, H.**, 2023, Operation Optimization of Wind/Battery Storage/Alkaline Electrolyzer System Considering Dynamic Hydrogen Production Efficiency, *Energies*, 16(17), :6132, <https://doi.org/10.3390/en16176132>.
- Nogueira, L.P., Longa, F.D., Reis, L.A., Drouet, L., Vrontisi, Z., Fragkiadakis, K., Panos, E., and Zwaan, B. v. d.**, 2023, A Multi-Model Framework to Assess the Role of R&D Towards a Decarbonized Energy System, *Climatic Change*, 176(7), <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03553-w>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nourian, P., Azadi, S., Bai, N., Andrade, B. d., Zaid, N.A., Rezvani, S., and Roders, A.P.**, 2024, EquiCity Game: A Mathematical Serious Game for Participatory Design of Spatial Configurations, *Scientific Reports*, 14(1), <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61093-4>.
- O’Connell, R., Murphy, J., McAuliffe, F.D., and Dalton, G.**, 2023, A Review of Geographic Information System (GIS) and Techno Economic (TE) Software Tools for Renewable Energy and Methodology to Develop a Coupled GIS-TE Software Tool for Marine Renewable Energy (MRE), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 237(3), :547–564, <https://doi.org/10.1177/14750902221150050>.
- Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., Mahmoud, M.S., Elsaid, K., Obaideen, K., Rezk, H., Wilberforce, T., Eisa, T., Chae, K.-J., and Sayed, E.T.**, 2023, Green hydrogen: Pathways, roadmap, and role in achieving sustainable development goals, *Process Safety and Environmental Protection*, 177, :664–687, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.069>.
- Olgun, M., Türkarlan, E., Ye, J., and Ünver, M.**, 2022, Single and Interval-Valued Hybrid Enthalpy Fuzzy Sets and a TOPSIS Approach for Multicriteria Group Decision Making, *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, :1–8, <https://doi.org/10.1155/2022/2501321>.
- OpenStreetMap contributors**, 2025, OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>.
- Opricovic, S. and Tzeng, G.-H.**, 2007, Extended VIKOR method in comparison with outranking methods, *European Journal of Operational Research*, 178(2), :514–529, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>.
- Osman, A.I., Mehta, N., Elgarahy, A.M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A.H., and Rooney, D.W.**, 2022, Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), :153–188, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>.
- Ozim, C.E., Nweke, A.O., Salamatu, E.A., Oladeinde, O.S., Ayuba, H.K., and Mbanaso, U.M.**, 2021, Spatial Analysis and Modelling of Wind Farm Site Suitability in Nasarawa State, North-Central Nigeria, *Journal of Geographic Information System*, 13(05), :603–630, <https://doi.org/10.4236/jgis.2021.135033>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pantoja-García, J.S., Villarreal-Cervantes, M.G., García-Mendoza, C.-V., and Silva-García, V.M.**, 2019, Synergistic Design of the Bipedal Lower-Limb Through Multiobjective Differential Evolution Algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(1), <https://doi.org/10.1155/2019/2301714>.
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepu, V., and Borse, P.H.**, 2020, Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects, *Materials Science for Energy Technologies*, 3, :319–327, <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>.
- Partnership for Market Readiness**, 2017, Carbon Tax Guide: A Handbook for Policy Makers, World Bank, Washington, DC.
- Phonrattanasak, P. and Leeprechanon, N.**, 2016, Multiobjective Optimal Placement of Public Fast Charging Station on Power Distribution Network Using Hybrid Ant Colony Optimization and Bees Algorithm, *International Journal of Engineering and Technology*, 8(6), :2431–2442, <https://doi.org/10.21817/ijet/2016/v8i6/160806405>.
- Pires, E.J.S., Machado, J.A.T., and P. B. de Moura Oliveira**, 2013, Entropy Diversity in Multi-Objective Particle Swarm Optimization, *Entropy*, 15(12), :5475–5491, <https://doi.org/10.3390/e15125475>.
- Plank, F., Muntschick, J., Niemann, A., and Knodt, M.**, 2023, External Hydrogen Relations of the European Union: Framing Processes in the Public Discourse Towards and Within Partner Countries, *Sustainability*, 15(20), :14757, <https://doi.org/10.3390/su152014757>.
- Pompodakis, E., Orfanoudakis, G.I., Katsigiannis, Y.A., and Karapidakis, E.**, 2024, Techno-Economic Feasibility Analysis of an Offshore Wave Power Facility in the Aegean Sea, Greece, *Energies*, 17(18), :4588, <https://doi.org/10.3390/en17184588>.
- Popp, D.**, 2004, ENTICE: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming, *Journal of Environmental Economics and Management*, 48(1), :742–768, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2003.09.002>.
- Popp, D.**, 2006a, Comparison of Climate Policies in the ENTICE-BR Model, *The Energy Journal*, 27(1\_suppl), :163–174, <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-volsi2006-nosi1-7>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Popp, D.**, 2006b, ENTICE-BR: The Effects of Backstop Technology R&D on Climate Policy Models, *Energy Economics*, 28(2), :188–222, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2005.10.004>.
- Popp, D.**, 2010, Innovation and Climate Policy, *Annual Review of Resource Economics*, 2(1), :275–298, <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.012809.103929>.
- Pranckevičius, D., Marčiukaitis, M., Perednis, E., and Masaitis, S.**, 2023, An Overview of Hydrogen's Application for Energy Purposes in Lithuania, *Applied Sciences*, 13(23), :12623, <https://doi.org/10.3390/app132312623>.
- Preuster, P., Papp, C., and Wasserscheid, P.**, 2017, Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy, *Accounts of Chemical Research*, 50(1), :74–85, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00474>.
- Przewoźniak, M., Wyrwa, A., Zyśk, J., Raczyński, M., and Pluta, M.**, 2024, Conducting a Geographical Information System-Based Multi-Criteria Analysis to Assess the Potential and Location for Offshore Wind Farms in Poland, *Energies*, 17(2), :283, <https://doi.org/10.3390/en17020283>.
- Qin, H., Su, J., and Du, Y.**, 2009, Multiobjective Evolutionary Optimization Algorithm for Cognitive Radio Networks, :164–168, <https://doi.org/10.1109/ieec.2009.39>.
- Queipo, N.V., Haftka, R.T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R., and Kevin Tucker, P.**, 2005, Surrogate-based analysis and optimization, *Progress in Aerospace Sciences*, 41(1), :1–28, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.001>.
- Rabiee, A., Keane, A., and Soroudi, A.**, 2020, Technical Barriers for Harnessing the Green Hydrogen: A Power System Perspective, <https://doi.org/10.48550/arxiv.2010.06384>.
- Rahat, A., Wang, C., Everson, R., and Fieldsend, J.E.**, 2018, Data-Driven Multi-Objective Optimisation of Coal-Fired Boiler Combustion Systems, *Applied Energy*, 229, :446–458, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.101>.
- Rahman, M.A., Rusteberg, B., Gogu, C.R., Ferreira, J.P.L., and Sauter, M.**, 2012, A New Spatial Multi-Criteria Decision Support Tool for Site Selection for Implementation of Managed Aquifer Recharge, *Journal of Environmental Management*, 99, :61–75, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ramos Hernanz Ja, Campayo Martín J.J, Zamora Belver I, Larrañaga Lesaka J, Zulueta Guerrero, E, and Puelles Pérez, E,** 2024, Modelling of Photovoltaic Module, *RE&PQJ*, 8(1), <https://doi.org/10.24084/repqj08.619>.
- Ranjbar, H., Assimi, H., Islam, S.M.M., Pourmousavi, S.A., and Soong, W.L.,** 2025, Optimal Planning of Renewable-Based Mining Microgrids: A Comparative Study of Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *Optimization Letters*, <https://doi.org/10.1007/s11590-025-02214-4>.
- Ransikarbum, K., Zadek, H., and Janmontree, J.,** 2024, Evaluating Renewable Energy Sites in the Green Hydrogen Supply Chain with Integrated Multi-Criteria Decision Analysis, *Energies*, 17(16), :4073, <https://doi.org/10.3390/en17164073>.
- Reis, J. and Shortridge, J.,** 2019, Impact of Uncertainty Parameter Distribution on Robust Decision Making Outcomes for Climate Change Adaptation Under Deep Uncertainty, *Risk Analysis*, 40(3), :494–511, <https://doi.org/10.1111/risa.13405>.
- Reis, J. and Shortridge, J.,** 2021, Robust Decision Outcomes With Induced Correlations in Climatic and Economic Parameters, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27(1), <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09970-5>.
- Rinner, C.,** 2024, Spatial Dimensions of Multi-Criteria Analysis, <https://doi.org/10.32920/27174942.v1>.
- Roberts, W.L.,** 2025, Techno-Economic Assessment of Ammonia-Fueled Combined Cycle Gas Turbines for Power Generation in Saudi Arabia, <https://doi.org/10.2118/226840-ms>.
- Roh, K., Kim, Y., Jeon, H., Kim, W., Ko, H., Kang, K.S., and Jeong, S.U.,** 2023, Analyses on Techno-economic Aspects and Green Hydrogen Production Capability of MW-scale Low-temperature Water Electrolyzers in Jeju Island, South Korea, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 34(3), :235–245, <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.3.235>.
- Rosen, M.A. and Koohi-Fayegh, S.,** 2016, The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems, *Energy, Ecology and Environment*, 1(1), :10–29, <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rosén, S., Göransson, L., Taljegård, M., and Lehtveer, M.,** 2024, Modeling of a “Hydrogen Valley” to investigate the impact of a regional pipeline for hydrogen supply, *Frontiers in Energy Research*, 12, :1420224, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1420224>.
- Roszkowska, E. and Filipowicz-Chomko, M.,** 2024, A Multi-Criteria Method Integrating Distances to Ideal and Anti-Ideal Points, *Symmetry*, 16(8), :1025, <https://doi.org/10.3390/sym16081025>.
- Rouzbahani, F., Vaziri Rad, M.A., and Aghajani, D.,** 2026, Mapping cost-effective hydrogen production based on renewable resource potential and techno-economic analysis: a case study, *Applied Energy*, 404, :127160, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127160>.
- Ruiz-Vélez, A., García, J., Alcalà, J., and Yepes, V.,** 2024, Enhancing Robustness in Precast Modular Frame Optimization: Integrating NSGA-II, NSGA-III, and RVEA for Sustainable Infrastructure, *Mathematics*, 12(10), :1478, <https://doi.org/10.3390/math12101478>.
- Saad, M.A., Jaafar, R., and Chellappan, K.,** 2023, Variable-Length Multiobjective Social Class Optimization for Trust-Aware Data Gathering in Wireless Sensor Networks, *Sensors*, 23(12), :5526, <https://doi.org/10.3390/s23125526>.
- Salabun, W. and Urbaniak, K.,** 2020, A New Coefficient of Rankings Similarity in Decision-Making Problems, 632–645, *Computational Science – ICCS 2020*, V.V. Krzhizhanovskaya, G. Závodszy, M.H. Lees, J.J. Dongarra, P.M.A. Sloot, S. Brissos, and J. Teixeira, eds., Springer International Publishing, Cham.
- Saleh, I. and Setyowati, N.D.,** 2020, CBSfor Planning a Sustainable and Inclusive Community: Multi-Criteria Suitability Analysis for Siting Low-Income Housing in a Sustainable Community and Suitable Neighborhood in Buffalo Metropolitan Area, New York, *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 447(1), :012005, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/447/1/012005>.
- Salinas-León, C.D. and Ochoa-Correa, D.,** 2025, Multicriteria Analysis for the Site Selection of Hydrokinetic Turbines-HKT for Renewable Energy Generation: A Case Study in Ecuador, *Renewable Energies*, 3(1), <https://doi.org/10.1177/27533735251340200>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sankarbalaji, A.R., Subrahmanian, S., Modi, K., Duraisekaran, E., and Narasimhan, B.,** 2025, Development of a Multi-Criteria Based Multi-Objective Simulation & Optimization Framework Integrated With Hydrologic Model and Evolutionary Algorithm for Planning, Design, and Analysis of SuDS at a River-Basin Scale, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-19515>.
- Sansavini, G., Ganter, A., Baumann, P.D., and Karbassi, V.,** 2024, Integrated Decarbonization of Hard-to-Abate Industry Utilizing Biomass Reliefs Burden on Power Sector, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5458903/v1>.
- Santana, L., Santos, G.D., Santos, A., Marinho, C., Bispo, A., Villardi, H., and Pessoa, F.,** 2024, Evaluating the economic influence of water sources on green hydrogen production: A cost analysis approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, 89, :353–363, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.274>.
- Santos, S.M., Gaspar, A.T., and Schiozer, D.J.,** 2017, Risk Management in Petroleum Development Projects: Technical and Economic Indicators to Define a Robust Production Strategy, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, :116–127, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.035>.
- Sardahi, Y. and Sun, J.,** 2016, Many-Objective Optimal Design of Sliding Mode Controls, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 139(1), <https://doi.org/10.1115/1.4034421>.
- Sarhan, A., Ramachandaramurthy, V.K., Kiong, T.S., and Ekanayake, J.,** 2021, Impact of Techno-economic Parameters on the Power Systems Model With High Share of Renewable Energy and Energy Storage, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11), <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13073>.
- Sarkar, B. and Biswas, A.,** 2021, A Multi-criteria Decision Making Approach for Strategy Formulation Using Pythagorean Fuzzy Logic, *Expert Systems*, 39(1), <https://doi.org/10.1111/exsy.12802>.
- Savsani, V., Patel, V., Gadhvi, B., and Tawhid, M.A.,** 2017, Pareto Optimization of a Half Car Passive Suspension Model Using a Novel Multiobjective Heat Transfer Search Algorithm, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017, :1–17, <https://doi.org/10.1155/2017/2034907>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schalenbach, M., Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., and Stolten, D.,** 2016, Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), :2264–2271, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.059>.
- Schiozer, R.F., Lima, G.A.C., and Suslick, S.B.,** 2008, The Pitfalls of Capital Budgeting When Costs Correlate to Oil Price, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 47(08), <https://doi.org/10.2118/08-08-57>.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., and Few, S.,** 2017, Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), :30470–30492, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>.
- Schott, J.,** 2005, Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization /.
- Schram, W., AlSkaif, T., Lampropoulos, I., Henein, S., and Sark, W. v.,** 2020, On the Trade-Off Between Environmental and Economic Objectives in Community Energy Storage Operational Optimization, *Ieee Transactions on Sustainable Energy*, 11(4), :2653–2661, <https://doi.org/10.1109/tste.2020.2969292>.
- Shafiee, M.,** 2022, Wind Energy Development Site Selection Using an Integrated Fuzzy ANP-TOPSIS Decision Model, *Energies*, 15(12), :4289, <https://doi.org/10.3390/en15124289>.
- Shahabuddin, M., Rhamdhani, M.A., and Brooks, G.A.,** 2023, Technoeconomic Analysis for Green Hydrogen in Terms of Production, Compression, Transportation and Storage Considering the Australian Perspective, *Processes*, 11(7), :2196, <https://doi.org/10.3390/pr11072196>.
- Shams, S.A. and Ahmadi, R.,** 2021, Dynamic Optimization of Solar-wind Hybrid System Connected to Electrical Battery or Hydrogen as an Energy Storage System, *International Journal of Energy Research*, 45(7), :10630–10654, <https://doi.org/10.1002/er.6549>.
- Shannon, C.E.,** 1948, A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, 27(3), :379–423, <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sharma, P., Ghatrha, K.S., Cepova, L., Ray, N.M., Kumar, A., Yadav, S.L., Schindlerova, V., and Phanden, R.K.,** 2025, A hybrid FAHP–entropy–TOPSIS model for selecting the facility layout in small-scale manufacturing, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, :1666571, <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1666571>.
- Sharma, H., Mandil, G., Monnier, É., Cor, E., and Zwolinski, P.,** 2023, Sizing a hybrid hydrogen production plant including life cycle assessment indicators by combining NSGA-III and principal component analysis (PCA), *Energy Conversion and Management: X*, 18, :100361, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100361>.
- Shen, X., Chen, J., Zhu, X., Liu, P.-Y., and Du, Z.,** 2015, Multi-Objective Optimization of Wind Turbine Blades Using Lifting Surface Method, *Energy*, 90, :1111–1121, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.062>.
- Shidhani, T.A., Ιωάννου, A., and Falcone, G.,** 2020, Multi-Objective Optimisation for Power System Planning Integrating Sustainability Indicators, *Energies*, 13(9), :2199, <https://doi.org/10.3390/en13092199>.
- Shrestha, R.R., Acharya, A., Karmacharya, N., Sapkota, M., Paudyal, B., Basnet, P., Timilsina, S., and Shakya, H.D.,** 2022, Application of Ahp and CBSfor Optimal Solar Site Identification in Madhesh Province, Nepal, *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 14(3), <https://doi.org/10.13033/ijahp.v14i3.986>.
- Shumaiza, Akram, M., Al-Kenani, A.N., and Alcantud, J.C.R.,** 2019, Group Decision-Making Based on the VIKOR Method With Trapezoidal Bipolar Fuzzy Information, *Symmetry*, 11(10), :1313, <https://doi.org/10.3390/sym11101313>.
- Simoës, S.G., Catarino, J., Picado, A., Lopes, T.F., Di Berardino, S., Amorim, F., Gírio, F., Rangel, C.M., and Ponce De Leão, T.,** 2021, Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production, *Journal of Cleaner Production*, 315, :128124, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>.
- Sitorus, F., Cilliers, J.J., and Brito-Parada, P.R.,** 2019, An Integrated Constrained Fuzzy Stochastic Analytic Hierarchy Process Method With Application to the Choice Problem, *Expert Systems With Applications*, 138, :112822, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112822>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Slootweg, J.G., De Haan, S.W.H., Polinder, H., and Kling, W.L.,** 2003, General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), :144–151, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.807113>.
- Sohani, A., Delfani, F., Hosseini, M., Sayyaadi, H., Karimi, N., Li, L.K.B., and Doranegard, M.H.,** 2022, Dynamic multi-objective optimization applied to a solar-geothermal multi-generation system for hydrogen production, desalination, and energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(74), :31730–31741, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.253>.
- Sooktip, T. and Wattanapongsakorn, N.,** 2017, A Decision Making Approach for Multi-Objective Optimization Considering a Trade-Off Method, *Ecti Transactions on Computer and Information Technology (Ecti-Cit)*, 11(2), :178–189, <https://doi.org/10.37936/ecti-cit.2017112.98907>.
- Spearman, C.,** 1904, The Proof and Measurement of Association between Two Things, *The American Journal of Psychology*, 15(1), :72, <https://doi.org/10.2307/1412159>.
- Staffell, I. and Green, R.,** 2014, How does wind farm performance decline with age?, *Renewable Energy*, 66, :775–786, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>.
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P.E., Ekins, P., Shah, N., and Ward, K.R.,** 2019, The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, 12(2), :463–491, <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>.
- Stanujkić, D., Đorđević, B., and Đorđević, M.,** 2013, Comparative Analysis of Some Prominent McDm Methods: A Case of Ranking Serbian Banks, *Serbian Journal of Management*, 8(2), :213–241, <https://doi.org/10.5937/sjm8-3774>.
- Stanujkić, D., Karabašević, D., Zavadskas, E.K., Smarandache, F., and Brauers, W.K.,** 2019, A Bipolar Fuzzy Extension of the MULTIMOORA Method, *Informatica*, 30(1), :135–152, <https://doi.org/10.15388/informatica.2018.201>.
- Stokes, L. and Breetz, H.L.,** 2018, Politics in the U.S. Energy Transition: Case Studies of Solar, Wind, Biofuels and Electric Vehicles Policy, *Energy Policy*, 113, :76–86, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.057>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Streimikis, J.**, 2026, Equity-Oriented Decision-Making for Renewable Energy Investments, *Energies*, 19(2), :463, <https://doi.org/10.3390/en19020463>.
- Subramanian, S., Sankaralingam, C., Elavarasan, R.M., Vijayaraghavan, R.R., Kannadasan, R., and Mihet-Popa, L.**, 2021, An Evaluation on Wind Energy Potential Using Multi-Objective Optimization Based Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III, *Sustainability*, 13(1), :410, <https://doi.org/10.3390/su13010410>.
- Sun, X., Chen, M., Liu, Y., and Hendriksen, P.V.**, 2015, Life Time Performance Characterization of Solid Oxide Electrolysis Cells for Hydrogen Production, *Ecs Transactions*, 68(1), :3359–3368, <https://doi.org/10.1149/06801.3359ecst>.
- Surovtsev, D. and Sungurov, A.**, 2017, “Vaguely Right or Precisely Wrong?”: Making Probabilistic Cost, Time, and Performance Estimates for Bluefield Appraisal, *Spe Economics & Management*, 9(03), :61–72, <https://doi.org/10.2118/181904-pa>.
- Szalaj, D., Wise, L., Rodríguez-Climent, S., Angélico, M.M., Marques, V., Chaves, C., Silva, A., and Cabral, H.N.**, 2018, A GIS-based Framework for Addressing Conflicting Objectives in the Context of an Ecosystem Approach to Fisheries Management—a Case Study of the Portuguese Sardine Fishery, *Ices Journal of Marine Science*, 75(6), :2070–2087, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy094>.
- Takagi, T., Takadama, K., and Satō, H.**, 2023, Directional Pareto Front and Its Estimation to Encourage Multi-Objective Decision-Making, *Ieee Access*, 11, :20619–20634, <https://doi.org/10.1109/access.2023.3250238>.
- Tan, P.-N., Steinbach, M., Karpatne, A., and Kumar, V.**, 2019, Introduction to data mining, Pearson Education, Harlow, 1p.
- Tang, O., Rehme, J., Cerin, P., and Huisingh, D.**, 2021, Hydrogen production in the Swedish power sector: Considering operational volatilities and long-term uncertainties, *Energy Policy*, 148, :111990, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111990>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tarife, R.P., Tahud, A.P., Gulben, E.J.G., Haroun Al Raschid Christopher P. Macalisang, and Ignacio, Ma.T.T.**, 2017, Application of Geographic Information System (GIS) in Hydropower Resource Assessment: A Case Study in Misamis Occidental, Philippines, *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(7), :507–511, <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.7.1005>.
- Tassew, F.A., Brinks, H.W., and Tvette, H.A.**, 2024, Techno-Economic Analysis of Electrofuel as a Shipping Fuel, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 147(3), <https://doi.org/10.1115/1.4066064>.
- Taylor, M.**, 2012, Innovation Under Cap-and-Trade Programs, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(13), :4804–4809, <https://doi.org/10.1073/pnas.1113462109>.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı**, 2024, Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri, <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>.
- Tebibel, H.**, 2021, Methodology for multi-objective optimization of wind turbine/battery/electrolyzer system for decentralized clean hydrogen production using an adapted power management strategy for low wind speed conditions, *Energy Conversion and Management*, 238, :114125, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114125>.
- Terlouw, T., Bauer, C., McKenna, R., and Mazzotti, M.**, 2022, Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment, *Energy & Environmental Science*, 15(9), :3583–3602, <https://doi.org/10.1039/D2EE01023B>.
- Tong, Z., Xin, J., and Ling, C.**, 2021, Many-Objective Hybrid Optimization Method for Impeller Profile Design of Low Specific Speed Centrifugal Pump in District Energy Systems, *Sustainability*, 13(19), :10537, <https://doi.org/10.3390/su131910537>.
- Tripathi, A.K., Agrawal, S., and Gupta, R.D.**, 2021, Comparison of GIS-based AHP and Fuzzy AHP Methods for Hospital Site Selection: A Case Study for Prayagraj City, India, *Geojournal*, 87(5), :3507–3528, <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10445-y>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tripathi, P.K., Bandyopadhyay, S., and Pal, S.K.**, 2007, Multi-Objective Particle Swarm Optimization With Time Variant Inertia and Acceleration Coefficients, *Information Sciences*, 177(22), :5033–5049, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.06.018>.
- Tuluhong, A. and others**, 2024, Current Status of Green Hydrogen Production Technology: A Review, *Energies*, 17(2), <https://doi.org/10.3390/en17020489>.
- Üçok, M.D.**, 2023, Prospects for hydrogen fuel cell vehicles to decarbonize road transport, *Discover Sustainability*, 4(1), :42, <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00159-1>.
- United Nations Industrial Development Organization**, 1972, Guidelines for Project Evaluation, UNIDO, New York.
- United States Geological Survey (USGS)**, 2024, Earth Explorer: Digital Elevation Model (DEM), <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Uoya, M. and Koizumi, H.**, 2015, A Calculation Method of Photovoltaic Array's Operating Point for MPPT Evaluation Based on One-Dimensional Newton–Raphson Method, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1), :567–575, <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2326083>.
- Vachhani, V.L., Dabhi, V.K., and Prajapati, H.B.**, 2016, Improving NSGA-II for Solving Multi Objective Function Optimization Problems, :1–6, <https://doi.org/10.1109/iccci.2016.7479921>.
- Vaid, S.K., Vaid, G., Kaur, S., Kumar, R., and Sidhu, M.S.**, 2022, Application of multi-criteria decision-making theory with VIKOR-WASPAS-Entropy methods: A case study of silent Genset, *Materials Today: Proceedings*, 50, :2416–2423, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.259>.
- Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S.W., and Lenaerts, S.**, 2021, Challenges in the use of hydrogen for maritime applications, *Energy & Environmental Science*, 14(2), :815–843, <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>.
- Vibhu, V., Yıldız, S.Z., Vinke, I.C., Eichel, R., Bassat, J., and Haart, L.G.J. d.**, 2019, High Performance LSC Infiltrated LSCF Oxygen Electrode for High Temperature Steam Electrolysis Application, *Journal of the Electrochemical Society*, 166(2), :F102–F108, <https://doi.org/10.1149/2.0741902jes>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., and Jijón, D., 2017, Wind Farms Suitability Location Using Geographical Information System (GIS), Based on Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods: The Case of Continental Ecuador, *Renewable Energy*, 109, :275–286, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.041>.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., and Filho, E.R., 2009a, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), :1198–1208, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., and Filho, E.R., 2009b, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), :1198–1208, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
- Vudata, S.P., Wang, Y., Fenton, J.M., and Brooker, P., 2022, Transient Modeling and Optimization of a PEM Electrolyzer for Solar Photovoltaic Power Smoothing, *Ecs Meeting Abstracts*, MA2022-01(39), :1728–1728, <https://doi.org/10.1149/ma2022-01391728mtgabs>.
- Wang, C.R., Stansberry, J.M., Mukundan, R., Chang, H.-M.J., Kulkarni, D., Park, A.M., Plymill, A.B., Firas, N.M., Liu, C.P., Lang, J.T., Lee, J.K., Tolouei, N.E., Morimoto, Y., Wang, C., Zhu, G., Brouwer, J., Atanassov, P., Capuano, C.B., Mittelsteadt, C., Peng, X., and Zenyuk, I.V., 2025, Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Considerations for Gigawatt-Scale Deployment, *Chemical Reviews*, 125(3), :1257–1302, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00904>.
- Wang, S., Ge, L., Cai, S., and Wu, L., 2018, Hybrid interval AHP-entropy method for electricity user evaluation in smart electricity utilization, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(4), :701–711, <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0355-3>.
- Wang, X., Shao, L., Hu, S., Li, Z., Guo, H., Zhang, J., Zhao, Y., Lin, X., Nie, B., Hu, Z., and Zou, J., 2024, A Techno-Economic Study of Photovoltaic-Solid Oxide Electrolysis Cell Coupled Magnesium Hydride-Based Hydrogen Storage and Transportation Toward Large-Scale Applications of Green Hydrogen, *Energy & Environmental Science*, 17(22), :8429–8456, <https://doi.org/10.1039/d4ee04224g>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Weber, J., Marquis, M., Cooperman, A., Draxl, C., Hammond, R., Jonkman, J., Lemke, A., Lopez, A., Mudafort, R., Optis, M., Roberts, O., and Shields, M.,** 2021, Airborne Wind Energy, <https://doi.org/10.2172/1813974>.
- Wei, S., Sacchi, R., Tukker, A., Suh, S., and Steubing, B.,** 2024, Future environmental impacts of global hydrogen production, *Energy & Environmental Science*, 17(6), :2157–2172, <https://doi.org/10.1039/D3EE03875K>.
- White, F.M.,** 2016, Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, New York.
- Widaningsih, I., Ma’ruf, A., Suprayogi, S., and Irianto, D.,** 2021, Multi-Objectives Optimization on Cutting Layers and Cutting Tools Selection for Sculptured-Dies Cavity Rough Machining: A State-of-the-Art Review, 177, <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.210522.007>.
- Wimhurst, J.J., Nsude, C.C., and Greene, J.S.,** 2023, Standardizing the factors used in wind farm site suitability models: A review, *Heliyon*, 9(5), :e15903, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15903>.
- World Bank Group and DTU,** 2025, Global Wind Atlas, <https://globalwindatlas.info/en/>.
- World Resources Institute,** 2015, GHG Protocol Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard, World Resources Institute, Washington, DC.
- Wu, J. and Azarm, S.,** 2000, Metrics for Quality Assessment of a Multiobjective Design Optimization Solution Set, *Journal of Mechanical Design*, 123(1), :18–25, <https://doi.org/10.1115/1.1329875>.
- Wu, X., Yu, L., Wu, S., Jia, B., Dai, J., Zhang, Y., Yang, Q., and Zhou, Z.,** 2022, Trade-Offs in the Water-Energy-Ecosystem Nexus for Cascade Hydropower Systems: A Case Study of the Yalong River, China, *Frontiers in Environmental Science*, 10, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.857340>.
- Wu, Y., Deng, Z., Tao, Y., Wang, L., Liu, F., and Zhou, J.,** 2021, Site selection decision framework for photovoltaic hydrogen production project using BWM-CRITIC-MABAC: A case study in Zhangjiakou, *Journal of Cleaner Production*, 324, :129233, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129233>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Xu, C., Ke, Y., Li, Y., Chu, H., and Wu, Y.**, 2020, Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS, *Energy Conversion and Management*, 215, :112892, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112892>.
- Xu, J., Tan, J., Liu, G., Bai, Z., and Wang, L.**, 2022, Study of Solution Diversity in Multi-Objective Optimization of Storage Ring Lattice, *Journal of Instrumentation*, 17(04), :P04019, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/p04019>.
- Yan, L.W., Gupta, M.K., Tajuddin, N.M., M Amri B M Diah, Shah, J.M., Masoudi, R., and Mokhtar, S.B.**, 2023, Integration of Petroleum Technologies for the Economic Monetization of Small Offshore Fields, <https://doi.org/10.4043/32200-ms>.
- Yang, J. and Li, L.**, 2024, Micro-Energy Grid Energy Utilization Optimization With Electricity and Heat Storage Devices Based on NSGA-III Algorithm, *Energies*, 17(22), :5563, <https://doi.org/10.3390/en17225563>.
- Yang, M., Liu, L., and Gu, S.**, 2025a, Design of Hydrogen Supply Chain Networks for Cross-Regional Distribution, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(8), :4498–4515, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03989>.
- Yang, N., Chen, Y., Hao, Y., Li, X., Zhang, L., Niu, J., Zhang, J., He, T., and Mao, J.**, 2025b, Land-use requirements and occupancy patterns of rapidly expanding wind power deployment in China, *Environmental Research Letters*, 20(7), :074011, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/add7ee>.
- Yang, X., Nielsen, C., Song, S., and McElroy, M.B.**, 2022, Breaking the Hard-to-Abate Bottleneck in China's Path to Carbon Neutrality With Clean Hydrogen, *Nature Energy*, 7(10), :955–965, <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01114-6>.
- Yates, J., Daiyan, R., Patterson, R., Egan, R., Amal, R., Ho-Baille, A., and Chang, N.L.**, 2020, Techno-economic Analysis of Hydrogen Electrolysis from Off-Grid Stand-Alone Photovoltaics Incorporating Uncertainty Analysis, *Cell Reports Physical Science*, 1(10), <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100209>.
- Ye, F. and Li, Y.**, 2014, An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment, *Knowledge-Based Systems*, 67, :263–269, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.04.046>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yildiz, S.S.**, 2021, Balıkesir İli Rüzgâr Hızı Haritalarının Hazırlanması ve Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Açısından İncelenmesi, *Geomatik*, 6(3), :198–206, <https://doi.org/10.29128/geomatik.737567>.
- Yildiz, S.S.**, 2023, Determining Wind Energy Potential Using Geographic Information System Functions: A Case Study in Balıkesir, Turkey, *Applied Sciences*, 13(16), :9183, <https://doi.org/10.3390/app13169183>.
- Yin, K., Tang, B., Li, M., and Zhao, H.**, 2023, A Multi-Objective Optimization Approach Based on an Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm With Evolutionary Game Theory, *Ieee Access*, 11, :77566–77584, <https://doi.org/10.1109/access.2023.3298058>.
- Yılmaz, T. and Uyan, M.**, 2025, Optimal site selection for green hydrogen production plants based on solar energy in Konya/Türkiye, *International Journal of Hydrogen Energy*, 115, :252–264, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.025>.
- Yousefi, H., Hafeznia, H., and Yousefi-Sahzabi, A.**, 2018a, Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran, *Energies*, 11(7), :1648, <https://doi.org/10.3390/en11071648>.
- Yousefi, H., Javadzadeh, Z., Noorollahi, Y., and Yousefi-Sahzabi, A.**, 2018b, Landfill Site Selection Using a Multi-Criteria Decision-Making Method: A Case Study of the Salafcheghan Special Economic Zone, Iran, *Sustainability*, 10(4), :1107, <https://doi.org/10.3390/su10041107>.
- Yu, D.C., Hou, K., Xu, L., Cai, G., Shan, X., and Wang, W.**, 2025, Multi-Objective Coordinated Control and Optimization for Photovoltaic Microgrid Scheduling, *Frontiers in Energy Research*, 13, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1593938>.
- Yusop, R.**, 2025, Integrated Gis-McDa Framework for Optimal Flood Retention Pond Site Selection: A Case Study in Rembau, Malaysia, *Planning Malaysia*, 23, <https://doi.org/10.21837/pm.v23i39.1955>.
- Zeleny, M.**, 1982, Multiple criteria decision making, McGraw-Hill, New York, 563p.
- Zeng, K. and Zhang, D.**, 2010a, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), :307–326, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zeng, K. and Zhang, D.**, 2010b, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), :307–326, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.
- Zhang, B., Zhang, S.-X., Yao, R., Wu, Y.-H., and Qiu, J.-S.**, 2021, Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges, *Journal of Electronic Science and Technology*, 19(2), :100080, <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>.
- Zhang, X., Liu, Y., Song, Q., Zhang, Y., Yang, J., and Wang, X.**, 2024, Density-Guided and Adaptive Update Strategy for Multi-Objective Particle Swarm Optimization, *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(5), :222–258, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae081>.
- Zhang, X., Li, H., and Wang, J.**, 2022, Energy Storage Capacity Optimization of Non-Grid-Connected Wind-Hydrogen Systems: From the Perspective of Hydrogen Production Features, *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 1(1), :48–63, <https://doi.org/10.56578/peet010106>.
- Zhang, H., Yi, W., Li, H., and Wang, S.**, 2025, Performance Metrics Evaluation of Multi-Objective Optimization for Transportation, *Electronic Research Archive*, 33(6), :3968–3988, <https://doi.org/10.3934/era.2025176>.
- Zhao, M., Hao, X., Pei, L., Li, H., and Li, W.**, 2024, Day Ahead Optimal Scheduling of Smart Community Microgrid Based on Improved NSGA-III, <https://doi.org/10.3233/atde240405>.
- Zieba Falama, R., Soulouknga, M., Dumbrava, V., Saidi, A., Kaoutoing, M., Ben Salah, C., and Doka, S.**, 2023, Renewable Energy Systems For Hydrogen Production In Sub-Saharan Africa: A Comparative Study Based On A Techno-Economic Analysis, *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 85, :351–364.
- Ziobrowski, Z. and Rotkegel, A.**, 2024, Assessment of Hydrogen Energy Industry Chain Based on Hydrogen Production Methods, Storage, and Utilization, *Energies*, 17(8), :1808, <https://doi.org/10.3390/en17081808>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

**Zitzler, E. and Thiele, L.**, 1998, Multiobjective optimization using evolutionary algorithms — A comparative case study, 292–301, *Parallel Problem Solving from Nature — PPSN V*, A.E. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer, and H.-P. Schwefel, eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

**Zun, M.T. and McLellan, B.**, 2023, Cost Projection of Global Green Hydrogen Production Scenarios, *Hydrogen*, 4(4), :932–960, <https://doi.org/10.3390/hydrogen4040055>.