T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJEN VADİSİ TASARIM SÜRECİNDE RİSK DEĞERLENDİRME İÇİN ENTEGRE BİLİŞSEL GÜVENİLİRLİK VE HATA ANALİZİ METODU ÖNERİSİ

Elifnaz OLGAÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. İhsan KAYA

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali KARAŞAN

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJEN VADİSİ TASARIM SÜRECİNDE RİSK DEĞERLENDİRME İÇİN ENTEGRE BİLİŞSEL GÜVENİLİRLİK VE HATA ANALİZİ METODU ÖNERİSİ

Elifnaz OLGAÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 24.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İhsan KAYA Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Ali KARAŞAN Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İhsan KAYA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Esra İLBAHAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Fatma KUTLU GÜNDOĞDU, Üye
Milli Savunma Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. İhsan KAYA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Hidrojen Vadisi Tasarım Sürecinde Risk Değerlendirme için Entegre Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Metodu Önerisi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Elifnaz OLGAÇ

İmza

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında engin bilgi ve tecrübelerini büyük bir cömertlikle paylaşan, bilimsel merakımı daima teşvik eden kıymetli danışmanım Prof. Dr. İhsan KAYA'ya ve kaleme aldığım her satırı titizlikle değerlendirerek bana yol gösteren değerli eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali KARAŞAN'a çalışmalarımı sabırla destekleri için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Geçmişteki tüm çabalarımda yanımda duran, gelecekteki hedeflerime de inançla destek veren başta babam ve annem olmak üzere sevgili aileme, koşulsuz sevgi ve teşvikleri için gönülden minnet duyuyor, yüksek lisans sürecimde göstermiş olduğunuz anlayış ve sabır için sizlere teşekkür ediyorum.

Elifnaz OLGAÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xiii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amaç ve Hedefleri 6
1.3 Tezin Özgün Katkısı 8
2 LİTERATÜR ANALİZİ 10
2.1 Hidrojen Vadisi 10
2.2 Risk Değerlendirme 19
2.3 CREAM 24
2.4 Araştırmanın Katkısı 31
2.5 Araştırma Soruları 32
3 ÖNERİLEN METODOLOJİ 34
3.1 CREAM 34
3.1.1 Bağlamsal Kontrol Modeli 34
3.1.2 CREAM Uygulama Adımları 43
3.2 Bulanık Küme Teorisi 48
3.3 Bulanık DEMATEL Yaklaşımı 49
3.4 Bulanık Bilişsel Haritalama 53
3.5 Yapay Sinir Ağları 56
3.6 Bulanık Çıkarım Sistemi 61
3.7 Önerilen Yaklaşım 62
4 UYGULAMA 68
4.1 Problemin Yapısı 68
4.2 Veri Toplama Süreci 69

4.3 Önerilen Metodolojinin Uygulanması 85
5 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA 100
5.1 Uygulama Sonuçlarının Anlamlandırılması 100
5.2 Önerilen Yöntem İçin Duyarlılık Analizi 103
5.2.1 Yapısal Modelin Boyutsal Risk Değerlendirmelerine Etkisi 103
5.2.2 Boyutsal Risk Değerlendirmelerinin Nihai Sonuca Etkisi 110
5.3 Önerilen Yöntem ile İlgili Çıkarımlar 113
5.3.1 Teorik Çıkarım 113
5.3.2 Yönetimsel Çıkarım 116
5.3.3 Mevzuata Yönelik Çıkarım 117
6 SONUÇ 120
KAYNAKÇA 122
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 133

SİMGE LİSTESİ

L	Ağın çıktı katmanı indeksi
w	Ağırlık vektörü
$\varphi(.)$	Aktivasyon fonksiyonu
F	Başlangıç doğrudan ilişki matrisi
s_j^0	Başlangıç vektörü
t	Bulanık bilişsel haritalama için yineleme sayısı
$\theta_j^{(h)}$	h katmanının bias değeri
E	İlişki Matrisi
h	Katman sayısı
η_k	k'ıncı sınıf için girdi değerleri
n	Kriter sayısı
D	Normalleştirilmiş İlk Doğrudan İlişki Matrisi
K	Normalizasyon Faktörü
η	Öğrenme hızı
k	Sınıflandırma problemindeki sınıf sayısı
M	Toplam İlişki Matrisi
θ	Toplam ilişki matrisinin sadeleştirilmesi için kullanılan eşik değer
τ	Yapay sinir ağları modelinde yineleme adım sayısı

KISALTMA LİSTESİ

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
BBH	Bulanık Bilişsel Haritalama
BÇS	Bulanık Çıkarım Sistemi
BKM	Bağlamsal Kontrol Modeli
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis
ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
DEMATEL	Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory
Fr	Fırsatçı
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability Analysis
HMEA	Hata Modu ve Etki Türleri Analizi
İGA	İnsan Güvenilirlik Analizi
Kr	Karmaşık
OPK	Ortak Performans Koşulları
St	Stratejik
Tk	Taktiksel
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
ÜBS	Üçgensel Bulanık Sayı
VIKOR	Çok Kriterli Optimizasyon ve Kompromis Çözümleme Yöntemi
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Kontrol modu-güvenilirlik ilişkisi (Hollnagel, 1998) **36**
Şekil 3.2 Genotiplerin sınıflandırılması (Hollnagel, 1998) **37**
Şekil 3.3 OPK'lar arasındaki bağımlılık ilişkisi **40**
Şekil 3.4 Temel CREAM ile kontrol modunun belirlenmesi (Hollnagel, 1998)... **45**
Şekil 3.5 Bulanık çıkarım sistemi (Konstandinidou vd., 2006)..... **61**
Şekil 3.6 Önerilen bütünleşik metodoloji **64**
Şekil 4.1 Önerilen yöntem kapsamında belirlenen OPK'lar **74**
Şekil 4.2 Önerilen yöntem kapsamında oluşturulan kural tabanı **84**
Şekil 5.1 RDİ değerlerinin karşılaştırması **112**
Şekil 5.2 Finansal (a) ve altyapısal (b) test setleri için karmaşıklık matrisi **115**

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Hidrojen vadisi risk analizi kapsamındaki çalışmalar **17**
Tablo 2.2 Literatürde CREAM entegrasyonları **30**
Tablo 3.1 Ortak performans koşulları (Hollnagel, 1998) **38**
Tablo 3.2 OPK ve performans güvenilirliği ilişkisi (Hollnagel, 1998) **39**
Tablo 3.3 OPK'ların genotipler ile ilişkisi **41**
Tablo 3.4 Kritik bilişsel faaliyetlerin listesi (Hollnagel, 1998) **41**
Tablo 3.5 BKM fonksiyonları (Hollnagel, 1998) **42**
Tablo 3.6 Bilişsel fonksiyonlarla ilişkili olası hatalar (Hollnagel, 1998) **43**
Tablo 3.7 CREAM aşamalarının karşılaştırması **43**
Tablo 3.8 Kontrol moduna bağlı hata olasılık aralığı **45**
Tablo 3.9 OPK'lara göre Ağırlıklandırma Faktörleri (Hollnagel, 1998) **47**
Tablo 3.10 Risklerin önceliklendirilmesi **66**
Tablo 4.1 Hidrojen vadisi tasarımına ilişkin riskler **69**
Tablo 4.2 Finansal OPK'lar **75**
Tablo 4.3 Çevresel OPK'lar **76**
Tablo 4.4 Altyapısal OPK'lar **77**
Tablo 4.5 Yönetimsel OPK'lar **78**
Tablo 4.6 Teknik OPK'lar **79**
Tablo 4.7 OPK'ların ikili karşılaştırması için kullanılan dilsel ölçek **80**
Tablo 4.8 OPK'ların ikili karşılaştırması **81**
Tablo 4.9 Anket katılımcıları **82**
Tablo 4.10 Risklerin OPK'lara göre değerlendirilmesi **83**
Tablo 4.11 Bulanık başlangıç-doğrudan ilişki matrisi (***F***) **85**
Tablo 4.12 Normalleştirilmiş doğrudan başlangıç ilişki matrisi (***D***) **86**
Tablo 4.13 Toplam ilişki matrisi (***M***) **87**
Tablo 4.14 İlişki ve belirginlik değerleri **88**
Tablo 4.15 Sadeleştirilmiş ilişki matrisi **88**
Tablo 4.16 BBH ilişki matrisi **89**
Tablo 4.17 Güncellenen etki hesabı **91**
Tablo 4.18 Güncellenen ağırlık vektörü **92**

Tablo 4.19 Normalize edilmiş ağırlıklar **93**
Tablo 4.20 ÇKA modellerine ait metrikler **94**
Tablo 4.21 ÇKA modellerine ait parametreler **95**
Tablo 4.22 Risklerin bağlamsal kontrol modeline göre olasılık dağılımları **96**
Tablo 4.23 Risklerin bağlamsal kontrol modeline göre sınıflandırılması **97**
Tablo 4.24 BÇS çıktı değerleri **98**
Tablo 5.1 En yüksek RDİ değerlerine sahip riskler **100**
Tablo 5.2 Yıllık enflasyon beklentileri (T.C. Merkez Bankası, 2025) **101**
Tablo 5.3 En düşük RDİ değerlerine sahip riskler **102**
Tablo 5.4 Duyarlılık analizi için belirlenen parametreler **104**
Tablo 5.5 Finansal boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması **105**
Tablo 5.6 Çevresel boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması **106**
Tablo 5.7 Altyapısal boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması **107**
Tablo 5.8 Yönetimsel boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması **108**
Tablo 5.9 Teknik boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması **109**
Tablo 5.10 Duyarlılık analizi için oluşturulan ağırlık vektörleri **110**
Tablo 5.11 Duyarlılık analizi kapsamında BÇS sonuçları **111**
Tablo 5.12 Risk önceliklendirmelerinin karşılaştırılması **113**

ÖZET

Hidrojen Vadisi Tasarım Sürecinde Risk Değerlendirme için Entegre Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Metodu Önerisi

Elifnaz OLGAÇ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İhsan KAYA

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali KARAŞAN

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin yol açtığı çevresel ve ekonomik riskler, fosil yakıtların yerine yenilenebilir ve düşük karbonlu enerji kaynaklarına geçişi zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda ulusal ve uluslararası düzeyde birtakım girişimler yürütülmektedir. Türkiye'de sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek ve enerji güvenliğini sağlamak amacıyla temiz enerji alanında teknoloji geliştirme ve teknoloji transferi için kapsamlı çalışmalar başlatmıştır. Hidrojen, tüketimi sonucu yalnızca su buharı üretmesi ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıyla temiz bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen enerjisi ile ilgili tüm faaliyetlerin bir arada gerçekleştirildiği sürdürülebilir ekosistem "Hidrojen Vadisi" olarak isimlendirilmektedir. Hidrojen vadisi faaliyetlerinin güvenli olarak gerçekleştirilebilmesi için proaktif ve çok boyutlu risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, hidrojen vadisinin tasarım aşamasında karşılaşılabilecek risklerin yapay zekâ ve Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi (Cognitive Reliability and Error Analysis Method - CREAM) yöntemleri

başta olmak üzere bulanık mantık ile genişletilmiş entegre bir metodoloji ile değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması ile tanımlanan riskler finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik açıdan ele alınarak çok boyutlu bir analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodoloji, risk değerlendirme boyutlarındaki yapısal modeli incelemek ve ortak performans koşullarının (OPK) ağırlıklarını hesaplamak amacıyla entegre bulanık Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) ve bulanık bilişsel haritalama yöntemlerini (BBH) kullanmaktadır. Belirlenen risklerin risk boyutları temelinde CREAM kapsamında yer alan bağlamsal kontrol moduna göre sınıflandırılabilmesi için OPK'ların belirlenen göreli ağırlıkları başlangıç ağırlık vektörü olarak kullanan yapay sinir ağları modelleri oluşturulmuştur. Farklı boyutlarda gerçekleştirilen değerlendirmeler bulanık çıkarım sistemi ile birleştirilerek nihai bir risk değerlendirme skoru elde edilmiştir.

Türkiye'de kurulacak bir hidrojen vadisinin tasarım süreci ele alınarak gerçekleştirilen uygulama sonucu finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutları en çok etkileyen faktörler sırasıyla Yatırımcıların Tutumu, Kaynakların Yeterliliği, Organizasyonun Yeterliliği, İş Birliği Kalitesi ve Tasarım olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen risk değerlendirmesi sonucunda en öncelikli riskin ise Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen vadisi, CREAM, risk değerlendirme, yapay sinir ağları, bulanık mantık

ABSTRACT

A Methodology Proposal for an Integrated Cognitive Reliability and Error Analysis Method for Risk Assessment of Hydrogen Valley Design Process

Elifnaz OLGAÇ

Department of Industrial Engineering
Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. İhsan KAYA
Co-supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali KARAŞAN

Transitioning from fossil fuels to renewable and low-carbon energy sources has become imperative due to environmental and economic risks arising from global warming and climate change. For this reason, both national and international initiatives are currently being implemented. In this context, Türkiye has launched comprehensive efforts to develop and transfer clean energy technologies, with the aim of building a sustainable future and ensuring energy security. Hydrogen stands out as a clean energy source due to its high energy density and the fact that its consumption produces only water vapor. The sustainable ecosystem in which all hydrogen-related activities are carried out collectively is referred to as a "Hydrogen Valley." Ensuring the safe operations of hydrogen valleys, a proactive and multidimensional risk assessment must be conducted.

This study has been conducted to evaluate the risks that may occur during the design phase of hydrogen valley operations through an integrated CREAM methodology, enhanced with fuzzy logic and Artificial Intelligence. Risks identified through a literature review were examined from financial, environmental, infrastructural, managerial, and technical perspectives, enabling a multidimensional analysis. The

proposed methodology evaluates the structural model of each risk dimension and calculates the relative weights of the Common Performance Conditions (CPCs) through integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy cognitive mapping approach. Artificial neural network (ANN) models were then developed, using the determined relative weights of the CPCs as the initial weight vector, to classify the identified risks according to the contextual control mode defined within the CREAM framework. The evaluations performed across different dimensions are then aggregated using a fuzzy inference system to obtain a final risk assessment score.

The proposed study is illustrated with an application for the design of a prospective hydrogen valley in Türkiye. The analysis identifies the key risk factors in the financial, environmental, infrastructural, managerial, and technical dimensions as Investors' Attitude, Resource Adequacy, Organizational Capability, Quality of Collaboration, and Design respectively. Furthermore, the results reveal that Inflation and Interest-Rate Volatility constitutes the highest priority for the design process of the hydrogen valley project.

Keywords: Hydrogen valley, CREAM, risk assessment, artificial neural networks, fuzzy logic

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Enerji sektörü ihtiyaçları büyük ölçüde kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Her geçen gün artan enerji ihtiyacının fosil yakıtlar ile karşılanması, küresel ısınma ve iklim krizinin etkilerini arttırmaktadır. Bu sebeple uluslararası örgütler ve devlet politikalarının fosil yakıtlara alternatif olarak temiz enerji alternatiflerine yönelik arayışlarını arttırdığı görülmektedir (Aditiya & Aziz, 2021). Bu yöneliş ve araştırmalar kapsamında gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar hem büyük önem arz etmekte hem de öncülük etmektedir. Özellikle Birleşmiş Milletler' in öncülüğünde 2015'te imzalanan Paris İklim Anlaşması, katılımcıları sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik uzun vadeli stratejilere bağlamakta ve sürdürülebilir kalkınma planları için uluslararası bir rehber oluşturmaktadır (Birleşmiş Milletler, 2015). Paris İklim Anlaşması, günümüzde Türkiye'de dahil olmak üzere 195 ülke tarafından imzalanmış olup, iklim kriziyle mücadelede en kapsamlı ve kapsayıcı girişimlerden biridir ve tarafları küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutma hedefi altında bir araya getirmiştir. Türkiye, 2016 yılında Paris İklim Antlaşması'nı imzalayarak 2053 yılında karbon nötr bir ülke olmak konusunda taahhütte bulunmuştur (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023a). Bu antlaşma kapsamında ve Türkiye'nin enerji güvenliğini artırma adına sera gazı emisyonlarını düşürmek için fosil yakıt tüketimini azaltmak, düşük karbonlu teknolojilere ve yenilenebilir enerjiye geçiş sağlamak adına büyük yatırımlar gerçekleştirilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023b). Yine benzer şekilde özellikle Avrupa Birliği'nin getirdiği ve devam edecek olan ihracat yükümlülükleri kapsamında sürdürülebilir raporlama hazırlanması adına gerekli altyapının oluşturulmasında enerji sektörünün rolü büyüktür (Önce vd., 2015). Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ile güneş ve rüzgâr enerjisi

santrallerinin kurulması teşvik edilmiş (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024c), Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) sayesinde güneş enerjisi girişimleri planlanmış (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024b), Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) yatırımları ile rüzgâr enerjisinin yaygınlaştırılması sağlanmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023b). Bu kapsamda ilgili çalışma ile Türkiye kalkınma planları kapsamında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından oluşturulan stratejik planlarda ve uluslararası antlaşmalar kapsamında amaçlanan enerji güvenliğinin yanı sıra temiz enerji ile sera gazı emisyonlarının azaltılması adına teknoloji geliştirme ve teknoloji transferini desteklemek maddeleri çerçevesinde Türkiye'de yenilenebilir hidrojen enerjisi faaliyetlerinin güvenli ve sürdürülebilir bir biçimde uygulanmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Önemli enerji kaynaklarımızdan hidrojen enerjisi yapısının bir süreç kapsamında bilimsel olarak ele alınmasının katkı ve değer sağlayacağı değerlendirilmektedir.

İklim değişikliği ile mücadele, temiz enerji konusunda farkındalığın artmasına sebep olmuştur. Temiz enerji, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, çevre kirliliğine neden olmayan ve sürdürülebilir enerji türüdür. Temiz enerji alternatiflerinden biri olan hidrojen de yenilenebilir kaynaklar kullanılarak uygun maliyetli enerji üretimini mümkün kılan bir temiz enerji kaynağı türüdür (Hossain Bhuiyan & Siddique, 2025). Bu durum, hidrojen enerjisi ve ilgili teknolojilerinin son yıllarda hızla önem kazanmasına katkıda bulunmuştur. Ancak hidrojen enerjisinin tüketimi tek başına çevre dostu olarak sınıflandırılamaz. Hidrojenin sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji türü olarak sınıflandırılabilmesi için üretim kaynağı olarak fosil yakıtların değil yenilenebilir enerjiye dayalı sürdürülebilir yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Fosil yakıt kullanmadan, yalnızca yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla üretilen hidrojen enerjisi yeşil hidrojen olarak isimlendirilmektedir. Hidrojenin düşük karbon ayak izi ve çevresel etkiye sahip, temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilebilmesi için üretiminin elektroliz yöntemi ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektroliz yöntemi ile su molekülleri hidrojen ve oksijen atomlarına ayrıştırılır (Perelli & Genna, 2022). Böylece hidrojen enerjisi üretimi sonucu yan ürün olarak oksijen ortaya çıkarken, hidrojen enerjisinin tüketimi sonucu su molekülleri ortaya çıkmaktadır. Üretimin ardından kullanım alanına göre hidrojen gaz ya da sıvı yakıt olarak depolanabilir. Düşük

moleküler ağırlığı, yüksek uçuculuk ve düşük tutuşma seviyesi sebebiyle hidrojen, depolama süreçlerinin güvenli ve verimli yönetimini gerektirmektedir (Rosén vd., 2024). Hidrojenin kullanım alanına güvenli şekilde aktarılabilmesi için ise boru hatları kullanılabilir (Li vd., 2024). Hidrojen enerjisi ile ilgili üretim, depolama ve dağıtımı fonksiyonlarının bir arada gerçekleştirildiği bütünleşmiş, sürdürülebilir ekosistem "Hidrojen Vadisi" olarak isimlendirilmektedir. Bir hidrojen vadisi temel olarak güneş, rüzgâr veya hidroelektrik gibi yenilenebilir bir enerji kaynağı ile çalışan hidrojen üretim birimi, gaz ve/veya sıvı hidrojen için depolama birimleri, ulaşım ağı, hidrojen kullanımı için yakıt ikmal istasyonlarından oluşmaktadır (Perelli & Genna, 2022). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2024-2028 Stratejik Planı Net Sıfır Karbon Odaklı Enerji Dönüşümü amacı kapsamında belirlenen "Yeşil hidrojen ve yenilenebilir gaz değer zinciri geliştirilecektir." hedefi doğrultusunda Türkiye; sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve karşılanabilir maliyetlerle enerji temini için hidrojen teknolojilerine yönelik gerekli alt yapı çalışmalarını gerçekleştirmeye karar vermiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a). Bu kapsamda hidrojen enerjisine yönelik ulusal ve uluslararası iş birliği sayınsın arttırılması, Hidrojen değer zinciri için kullanılacak yöntem ve kaynakların belirlenmesi ve önceliklendirilmesi ihtiyaçları tespit edilmiştir. Avrupa Birliği ülkelerinde hidrojen teknolojileri araştırma ve inovasyon faaliyetleri gösteren Temiz Hidrojen Ortak Girişimi kapsamında Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Projesi ile Türkiye, yeşil hidrojen enerji hareketine piyasasına dahil olmuştur (Güney Marmara Kalkınma Ajansı, 2023). 37,8 milyon Euro bütçeye sahip proje Türkiye'deki en büyük hidrojen tesisi olmanın yanı sıra yeşil hidrojen kullanarak cam, seramik, bor kimyasalları ve hidrojen peroksit üretimi gerçekleştirmeyi bu sayede sanayide kullanılan fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir.

Gerçekleştirilen yatırımların büyüklüğü ve hidrojen enerjisinin doğasında bulunan riskler göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji projelerinin her aşamada titizlikle yönetilmesi gerekmektedir. Tüm enerji kaynaklarında olduğu gibi hidrojen enerjisinin üretimi, depolanması ve taşınması da kendine özgü riskler barındırmaktadır (Li vd., 2024). İşletim halindeki bir enerji yönetim tesisi düşünüldüğünde bu risklerin proaktif risk değerlendirmesinin yapılabilmesi ve objektif sonuçlar elde edilebilmesi için ilgili tesisin tasarım aşamasından itibaren uygun değerlendirmelerinin kantitatif biçimde gerçekleştirilmesi ve standart bir

değerlendirme prosedürünün oluşturulması gerekmektedir. Bu tez kapsamında önerilen metodoloji ile hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımı fonksiyonlarının bir arada gerçekleştirildiği hidrojen vadisinin tasarımı için finansal, çevresel, altyapı, yönetimsel ve teknik boyutları bütünüyle ele alan bütünleşmiş bir risk değerlendirme metodolojisi önererek gelecekte kurulacak hidrojen vadileri için uygulanabilir ve anlamlı sonuçlar elde edilmesi için uygun bir araç geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bir tehlike kaynağından yaralanma, maddi zarar ya da herhangi başka türde istenmeyen olumsuz sonuçların ortaya çıkma potansiyeli, risk olarak isimlendirilir (Kaplan & Garrick, 1981). Süreçlerin güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlamak için tehlikelerin tespit edilmesi, ciddiyetlerinin değerlendirilmesi ve bunların etkili bir şekilde ele alınabilmesi için kaynakların doğru şekilde tahsis edilmesi kritik öneme sahiptir (Fine, 1971). Risk değerlendirme, sistemde bulunan risklerin tanımlanması ve belirlenecek kriterler altında risklerin değerlendirilmesini kapsamaktadır (İlbahar vd., 2018). Risk değerlendirmesi sonucunda riskler, potansiyel etkilerine göre sınıflandırılır ve bu sayede kritik ve acil riskler tespit edilebilir ve uygun önleyici tedbirlerin geliştirilebilmesini sağlar. Bu süreç, kaynakların etkin kullanımını ve stratejik karar alma süreçlerini destekler. Çalışanlar açısından risk değerlendirmesi güvenli bir çalışma ortamının sağlanmasına, iş veren açısından süreç ve sistemlerin sürekliliğinin sağlanması bakımından önem arz etmektedir. Risk değerlendirmesi sonucu oluşturulacak önleyici tedbirler ile risklerin oluşması durumunda ortaya çıkacak görünür ve gizli maliyetlerden kaçınılması açısından önemlidir (Kaplan & Garrick, 1981). Bu bağlamda geleneksel risk değerlendirme tekniklerinin belirsizlik olduğu durumlarda yetersiz kaldığı, karmaşık ortamlardaki riskleri etkin şekilde değerlendiremediği ve büyük ölçüde öznel uzman yargılarına dayanması nedeniyle dinamik süreçlerde güvenilirliğinin azaldığı görülmüştür (Marseguerra vd., 2006). Ayrıca, genellikle nitel riskleri ölçmede, karar verme modelleriyle entegre olmada veya veri güvenilirliğini hesaba katmada başarısız oldukları için potansiyel yanlış yorumlamalara ve etkisiz risk yönetimine neden olabilirler. Buradan yola çıkarak önerilen yöntem ile risk değerlendirme parametreleri finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik açılardan ele alınarak, hidrojen vadisinin tasarım aşamasından itibaren operasyonel süreçlerde ortaya çıkabilecek tehlikelere karşı proaktif bir yapay zekâ yaklaşımı

benimsenmektedir. Bu yaklaşım, belirsizlikleri bulanık mantık kavramı ile modele dahil ederek risk değerlendirmesi yapmayı hedeflemektedir.

Öte yandan literatürde hidrojen enerjisi ile ilgili risk analizleri yapan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar genellikle üretim (Park vd., 2019), taşıma (Du vd., 2023; Li vd., 2024; Sun vd., 2023), depolama (Gümüş vd., 2013; Wu vd., 2021) ve yakıt ikmali (Wang vd., 2024) süreçleri gibi teknik konulara veya sosyo-ekonomik (Guo vd., 2024; Hienuki, 2017) etkilere odaklanmaktadır. Hidrojen vadileriyle ilgili riskler üzerine sadece birkaç çalışma bulunmaktadır (Battaglia & Vanoli, 2024; Petrollese vd., 2022). Ancak ilgili çalışmalar incelendiğinde, risk değerlendirme süreçlerinin hidrojen enerjisinin doğası kaynaklı ortaya çıkabilecek kazalara odaklanıldığı, hidrojen vadisinin tüm fonksiyonlarını bütünsel bir bakış açısıyla inceleyen bir çalışma olmadığı ve hidrojen vadisinin tasarımı sırasında ortaya çıkabilecek risklerin tüm boyutlardan ele alacak kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında önerilen yöntem, hidrojen vadisinin teknik gereksinimlerinin yanı sıra çevre ile etkileşimini incelemekte ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla tasarım aşamasında ortaya çıkabilecek risklerin kaldırılması açısından değerlendirmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışması, hidrojen vadisinin tasarımı süresince ortaya çıkabilecek riskleri tespit etmeyi ve belirsizlik altında bu risklerin değerlendirilmesi için yapay zekâ temeli ve sistematik bir entegre bir yöntem ortaya koymayı amaçlamaktadır. CREAM (Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi-Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM), risk analizi, bulanık mantık, çok kriterli karar verme ve yapay sinir ağları yöntemlerini bütünleşik olarak kurgulayan yöntem ile süreçlerin tüm boyutlarıyla finansal, çevresel, teknik, altyapısal, yönetim ve teknik açıdan detaylı olarak incelenmesi hedeflenmektedir. Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi, 1998 yılında Hollnagel tarafından önerilen ikinci nesil bir insan güvenilirliği metodolojisidir (Hollnagel, 1998). CREAM'in amacı, insan performansını etkileyen faktörleri analiz ederek hata olasılıklarını tahmin etmek ve sistem güvenilirliğini artırmak için kapsamlı çerçeve sunmak için kullanılmaktadır.

Tez kapsamında önerilen olan bütünleşik entegre yöntem içerisinde CREAM yaklaşımının, hata oluşumundaki çevresel etkileri ele alma yaklaşımının risk yönetimi kapsamına uyarlayarak hidrojen vadisi tasarımı sürecine özel olarak

geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak hidrojen vadisi tasarımına etki eden riskler ve bu risklerin değerlendirilmesi için kullanılacak ortak performans faktörleri literatür taraması ve uzman görüşü ile belirlenmiştir. Risklerin değerlendirilme sürecinde barındırdığı belirsizliğin matematiksel olarak modellenebilmesi ve ilgili belirsizlik kaynaklı bilgi kaybının minimize edilmesi amacıyla ilgili metodolojiye bulanık mantık entegre edilmiştir. Bulanık mantık, klasik mantıkta 0 ya da 1 olarak belirlenen değerlerin [0,1] aralığında dereceli bir değer olarak esnek bir şekilde atanabilmesine imkân sağlayarak bilgi kaybını azaltmayı amaçlayan bir yaklaşımdır (Zadeh, 1965). Uzmanların risk değerlendirme faktörleri ve riskleri değerlendirmeleri için gerekli ölçekler bulanık mantık yaklaşımı çerçevesinde dilsel değişkenler kullanılarak geliştirilmiştir. Ortak performans faktörlerinin her birine ait ikili karşılaştırmalarına ait uzman değerlendirmeleri, çok kriterli karar verme yöntemi olan Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) ile analiz edilerek kriterlerin finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutlar içerisindeki ilişkileri incelenmiştir. Ardından bulanık bilişsel haritalama yöntemi ile bu kriterlerin göreli ağırlıkları hesaplanarak bir sonraki yöntem olan YSA'nın başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Belirlenen başlangıç çözüm ve oluşturulacak olan veri setine bağlı olarak her bir ortak performans faktörü için bir yapay sinir ağları (YSA) modeli kurulmuş; finansal, çevresel, altyapı, yönetimsel ve teknik boyutlar için elde edilen değerlendirmeler bulanık çıkarım sistemi ile nihai risk değerlendirme skoruna dönüştürülerek nihai risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, uzman görüşünü yapay zekâ ve bulanık çıkarım sistemi ile entegre ederek mevcut veriler yardımıyla karmaşık bir karar verme sistemine yayılmasını böylece gelecekte karşılaşılabilecek risklerin de oluşturulan bu model sayesinde uzman görüşüne yapay zekâ temelli yaklaşım ile tekrar ihtiyaç duymadan değerlendirilmesini sağlayacaktır.

1.2 Tezin Amaç ve Hedefleri

Tez çalışmasında hidrojen vadisinin operasyonlarını dikkate alarak tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken risklerin ve risk değerlendirme kriterlerinin ortaya çıkarılması, yapay zekâ ve CREAM yöntemleri başta olmak üzere entegre bir metodoloji ile değerlendirilmesi ve değerlendirme sonuçlarına

göre risk azaltma stratejilerinin belirlenmesi adına bir yol haritasının oluşturulması amaçlanmıştır. İlgili amaca başarılı şekilde ulaşmak için tez kapsamında aşağıda yer alan hedefler tamamlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında:

- İlgili finansal, çevresel, yönetimsel, altyapısal, teknik boyutlara göre olası risklerin literatür taraması, mevcut hidrojen vadilerine ait raporlar ve uzman görüşlerine bağlı olarak belirlenmesi,
- Değişken ve tutarlı verilerin toplanması için uygun ölçeklerin oluşturulması,
- İlgili risk boyutlarına bağlı olarak risk değerlendirme kriterlerinin operasyonel, stratejik ve taktiksel karar seviyelerinde belirlenmesi,
- Değerlendirmeler ve analizler için dilsel değişken ve/veya uzman yorumlarının matematiksel olarak ifade edilebilmesi ve sistem kapsamına alınması için bulanık mantık kavramının uygulanması,
- İlgili önerilen yapay zekâ temelli bütünleşik metodolojinin fazlarına bağlı olarak veri toplama süreçlerine uygun biçimde gerekli araçların belirlenmesi ve ölçeklerin tanımlanması,
- İlgili yapay zekâ temelli entegre metodolojinin uygulanarak risklere ait risk değerlendirme indekslerinin belirlenmesi ve risklerin önceliklendirilerek kategorize edilmesi,
- Risk değerlendirme kapsamında önerilen metot ve yaklaşımların performansların değerlendirilmesi,
- Ele alınan problem için en uygun entegre karar verme yöntemlerinin belirlenmesi,
- İlgili önceliklendirmeye bağlı olarak gerekli görülen risk azaltma stratejilerinin belirlenmesi

  gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen hedefler doğrultusunda önerilen entegre risk değerlendirme metodolojisi, belirsiz veri setlerinde veri kaybını önlemek amacıyla bulanık mantık yaklaşımını modele entegre etmeyi amaçlamıştır. Bu çerçevede, uzman değerlendirmesine dayalı geleneksel risk analizi yöntemlerine alternatif olarak uzman görüşlerini yapay zekâ ile entegre eden bir metodoloji geliştirilmiştir.

Çalışma dahilinde önerilen metodoloji, enerji güvenliği bağlamında yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrojenin üretim, depolama ve dağıtım süreçlerini kapsayan hidrojen vadisi için tasarım aşamasında ortaya çıkabilecek risklerin, belirlenecek ortak performans faktörlerine dayalı proaktif bir yaklaşımla değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

1.3 Tezin Özgün Katkısı

Çalışma kapsamında önerilen metodoloji ile hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımı fonksiyonlarının bir arada gerçekleştirildiği hidrojen vadisinin tasarımı için finansal, çevresel, altyapı, yönetimsel ve teknik boyutları bütünüyle ele alan entegre bir risk değerlendirme metodolojisi önererek gelecekte kurulacak hidrojen vadileri için uygulanabilir ve anlamlı sonuçlar elde edilmesi için uygun bir araç geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında hidrojen vadisinin tasarım aşamasında ortaya çıkabilecek risklerin bütünsel ve sistematik olarak değerlendirilmesi için bulanık mantık, bulanık DEMATEL, bulanık bilişsel haritalama, yapay sinir ağları, bulanık çıkarım sistemi ve CREAM yöntemleri ile entegre biçimde kullanılmaktadır. Tasarım aşamasında gerçekleştirilen risk değerlendirmesi ile kurulum ve operasyon aşamalarında karşılaşılabilecek olumsuz koşulların en erken düzeyde tespit edilmesi ile gerekli önleyici ve azaltıcı önlemlerin alınmasına katkı sağlanır. Bu sayede Türkiye kalkınma planları kapsamında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından oluşturulan stratejik planlarda ve uluslararası antlaşmalar kapsamında amaçlanan enerji güvenliğinin yanı sıra temiz enerji ile sera gazı emisyonlarının azaltılması adına teknoloji geliştirme ve teknoloji transferini desteklemek maddeleri çerçevesinde Türkiye'de yenilenebilir hidrojen enerjisi faaliyetlerinin güvenli ve sürdürülebilir bir biçimde uygulanmasına katkıda bulunulması hedeflemektedir.

Geliştirilen bütünleşik entegre yöntem içerisinde CREAM yaklaşımının, hata oluşumundaki çevresel etkileri ele alma yaklaşımı, hidrojen vadisi tasarımı sürecinde risk değerlendirmesi kapsamında uyarlanmıştır. CREAM kapsamında bağlamsal kontrol modu sınıflandırması kesin değerlerle gerçekleştirilmekte olup gerçek hayat problemleri çoğunlukla belirsiz ve yoruma açıktır. Bu sebeple risklerin değerlendirilme sürecinde barındırdığı belirsizliğin matematiksel olarak

modellenebilmesi ve ilgili belirsizlik kaynaklı bilgi kaybının minimize edilmesi amacıyla ilgili metodolojiye bulanık mantık entegre edilmiştir.

Önerilen metodoloji ile gerçekleştirilecek risk değerlendirmesi sonucunda riskler, potansiyel etkilerine göre önceliklendirilerek, kaynakların etkin kullanımını ve önleyici tedbirlerin stratejik bir şekilde planlanmasını mümkün kılar. Yapay zeka ile entegre bulanık çıkarım sistemi yardımıyla, uzman görüşleri mevcut veriler yardımıyla karmaşık bir karar verme sistemine yayılacak, böylece gelecekte karşılaşılabilecek risklerin de oluşturulan bu model sayesinde uzman görüşüne yapay zekâ temelli yaklaşım ile tekrar ihtiyaç duymadan değerlendirilmesi sağlanmıştır.

2
LİTERATÜR ANALİZİ

2.1 Hidrojen Vadisi

Hidrojen enerjisi düşük tutuşma enerjisi, diğer gazlarla karışımlarında, oldukça geniş bir konsantrasyon aralığında yanıcı olması, depolama ve taşıma işlemleri sırasında yüksek basınç altında tutulması ve bu aşamalarda sızıntı ihtimalinin patlamaya sebep olması gibi tehlikeleri barındırır (Li, 2022; Perelli & Genna, 2022). Buna ek olarak hidrojen gazı havadan daha hafif ve kokusuz bir gaz olması sebebiyle kapalı alanlarda yaşanabilecek sızıntılar, çalışanların oksijensiz kalarak boğulmasına sebep olabilir. Hidrojen enerjisinin diğer tüm enerji türlerinde olduğu gibi kendine has fiziksel ve kimyasal riskler taşımaktadır. Bu sebeple hidrojenin temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için hidrojen üretim, depolama, taşıma ve faaliyetlerinin gerçekleştirildiği tüm tesislerde geniş kapsamlı risk yönetimi çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

Literatürde hidrojen vadisi ile çalışmalar incelendiğinde çalışmaların ulusal ve uluslararası düzeyde hidrojen enerjisinin kullanımı gerekli olgunluk seviyesinin, hidrojen enerjisi ve teknolojilerine geçiş için fırsatlar ve zorlukların incelendiği görülmektedir. Bu kapsamda hidrojen enerjisinin geniş ölçekte benimsenmesi ve hidrojen vadilerinin hayata geçirilmesi için gerekli teknik, ekonomik ve sosyal altyapının mevcut durumu analiz edilmekte ve hidrojen enerjisinin sürdürülebilir ve sahip olup olmadığı, gerekli teknik, ekonomik ve sosyal altyapının bulunup bulunmadığı incelenmekte ve bu enerji türünün benimsenmesi için yol haritaları ortaya konmaktadır.

San Marchi vd. (2017) hidrojen-enerji sistemlerinin kullanıma alınması için gerekli gerekli standart ve düzenlemelerin oluşturulması kapsamında hidrojenin fiziksel özelliklerine bağlı olan potansiyel tehlikeler ve sonuçlarını, hidrojen tesisleri için kantitatif risk değerlendirme yöntemlerini, hidrojenin farklı materyaller üzerindeki

etkileri ve uygun malzemelerin seçimini, hidrojen yakıt kalitesinin yakıt üzerindeki performansa etkisini literatür taraması ile analiz etmiştir.

Aditiya ve Aziz (2021) Asya-Pasifik ülkelerinin hidrojen enerjisi beklentilerini teknolojik, sosyal ve ekonomik yönlerden ele almış, bu ülkelerin hidrojen enerjisini benimseme miktarını ölçmek için yerli enerji kapasitesi, ulusal zenginlik, toplumsal kalkınma ve araştırma ve geliştirme (AR-GE) olmak üzere belirledikleri dört gösterge ile bir inceleme çalışması gerçekleştirmiştir. Buna göre Asya-pasifik bölgesindeki ülkelerde hidrojen, güvenilir bir enerji türü olarak benimsenmeye başlamış olmasına karşın ülkelerin yeni teknoloji satın alabilme gücüne sahip olmaması sebebiyle yaygın kullanıma geçilememiştir. Halihazırda yürüttükleri stratejiler ile Japonya, Güney Kore, Avustralya ve Yeni Zelanda gibi devletlerin yakın bir gelecekte bu bölgede hidrojen enerjisi lideri olmaları muhtemeldir (Aditiya & Aziz, 2021).

Guo vd. (2024) hidrojen enerjisinin yaygın kabul görmesi, güvenilirliğinin artması ve hidrojen ekonomisinin gelişimini sağlamak amacıyla hidrojen üretim, taşıma, depolama ve kullanım fonksiyonları için hidrojen enerjisi güvenliğini etkileyen faktörler ve meydana gelen hidrojen kazalarını inceleyen bir literatür taraması gerçekleştirmiştir. Çalışmaya göre hidrojen kazalarının önlenmesi için uygun materyal seçimi, hidrojen sızıntılarının erken tespiti, insan hatalarının önlenmesi ve yönetimin önemi faktörlerinin öne çıktığını tespit etmiştir (Guo vd., 2024).

Bampaou ve Panopoulos (2025) hidrojen vadilerinin mevcut gelişimi ve hidrojen ekonomisinin geliştirilmesindeki desteğine dair gelişmeleri incelemek amacıyla bir literatür taraması gerçekleştirmiştir. Hidrojen ekonomisi, ulaşım, sanayi ve elektrik üretiminde temiz enerjiye geçiş çabasıdır ve bu faaliyetlerin karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunur. Bu kapsamda hidrojen vadileri, enerji şebekelerine entegrasyon, piyasa koşullarına uyumu ve toplum tarafından benimsenme seviyesi gibi yönlerden incelenmiş ve arz-talep dengesinin henüz oluşmamış olması, halihazırda kurulu endüstriyel alanlara hidrojen enerjisinin entegrasyon güçlüğü, yeterli finansmanının sağlanmaması, hidrojen enerjisinin güvenliği, maliyeti ve kullanımı konularında kamuoyunun oluşmaması ve gerekli yasal düzenlemelerin mevcut olmaması hususlarını hidrojen ekonomisinin önündeki yaygın engeller olarak tanımlamıştır. Bununla birlikte çalışma, mevcut durumda Avrupa Birliği'nin Temiz Hidrojen Ortaklığı'na kayıtlı 90 hidrojen vadisi

bulunduğuna ve Avrupa'nın hidrojen ekonomisini geliştirme çabasındaki lider konumda olduğuna değinmektedir. Çalışma, kurulumunun ardından ölçek büyütme hedefi olan dolayısıyla daha büyük bir yatırım getiriş vaat eden hidrojen vadisi projelerinin prosedür, bilgi ve deneyim birikimi açısından küçük ölçekli tesislere kıyasla daha zorlayıcı olmasına rağmen finansman desteği bulmak açısından kolaylık sağlayacağı vurgulanmaktadır (Bampaou & Panopoulos, 2025).

Hossain Bhuiyan ve Siddique (2025) hidrojenin net sıfır enerji hedeflerine ulaşma yolundaki katkısını vurgulamak için hidrojen üretimi, depolanması ve taşınması ile ilgili fırsatları ve zorlukları inceleyen bir literatür incelemesi gerçekleştirmiştir. Çalışma, yüksek altyapı maliyeti ve teknolojik kısıtların üstesinden gelmek için ulusal stratejilerin uzun vadeli politikalar, hedefe yönelik teşvikler ve uluslararası iş birliklerini içermesi gerektiğini vurgulamaktadır. Hidrojen üretimi ve dağıtımındaki zorluklara işaret eden çalışma, çevre dostu hidrojen ekonomisi ortamına ulaşmak için üretim yöntemlerinin elektroliz gibi yenilenebilir enerjiyle çalışan, daha düşük karbonlu veya karbon-nötr yöntemler ile gerçekleştirilmesi gerektiğine dikkat çekmektedir. Hidrojen depolama süreçlerinde ise hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu gibi başka problemler ilgili bir başka zorluklar ortaya çıkmakta, bu durum depolama kapasitesi, güvenlik ve maliyet arasında denge kurulmasını gerektirmektedir (Hossain Bhuiyan & Siddique, 2025).

Pastore vd. (2022) İtalya Hidrojen Stratejisi kapsamında hidrojen elektrolizörlerinin kurulumunu ekonomik ve çevresel faktörler kapsamında incelemiştir. Gerekli teknik altyapının oluşması için farklı senaryolar öğrenme eğrileri ile modellenmiş ve ilgili sermaye giderleri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında hidrojen enerjisinin pazarda rekabetçi konuma gelişinin karşısındaki en önemli engel yenilenebilir enerji maliyetlerinin yüksek olması olarak belirlenmiş, hidrojen enerjisinin güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak benimsenmesi için ekonomik planlamanın, kamu ve özel sektör iş birlikleri ile sağlanabileceği tespit edilmiştir (Pastore vd., 2022). Yine İtalya kapsamında gerçekleştirilen bir çalışmada Ficco vd. (2022), kurulacak hidrojen vadilerini teşvik etmek amacıyla hidrojen enerjisi tüketim yöntemlerini inceleyen laboratuvar çalışmaları ile araştırmacılara ve sektör öncülerine bilgi sağlamıştır. Çalışmada, ilgili teknolojiler geliştikçe ve yüksek verimli temiz enerji tesisleri kurulduğu takdirde hidrojen enerjisi üretim maliyetlerinin rekabetçi seviyelere düşerek

kullanımının yaygınlaşacağını öngörmekte ve kısa, orta ve uzun vadede hidrojen enerjisi talebine dair tahminler öne sürmektedir. Yapılan analizler 2030 yılına kadar yeşil hidrojen üretimi ve kullanımı sayesinde 31,298 ton/yıl CO_2 salınımını azaltacağını, aynı yıl yerel enerji talebini karşılamak için 1000 ton/yıl hidrojen enerjisi üretilmesi gerektiğini göstermektedir (Ficco vd., 2022). Restelli vd. (2024) Kuzey Afrika-Kuzey İtalya arası sıvı hidrojen iletimi için gerekli sıvılaştırma, depolama, transfer, dağıtım vb. değer zinciri ögelerini tekno-ekonomik açıdan incelemiştir. Çalışma Afrika'da düşük maliyet ile üretilen hidrojenin, Avrupa'ya transfer edilerek kullanımına dair bir temel oluşturmaktadır (Restelli vd., 2024).

Włodarczyk ve Kaleja (2023), Avrupa Birliği enerji dönüşüm ve iklim çalışmaları politikaları çerçevesinde Polonya'nın hidrojen vadisi stratejisini incelemiş; hidrojen vadilerinin gelişimi, hidrojenin bir enerji kaynağı olarak kullanım potansiyeli ve yerel hidrojen ekonomisini analiz etmiştir.

Hidrojen vadisinin en etkin biçimde kurulması için hidrojen üretim tekniği, depolama ve dağıtım teknolojilerini inceleyerek farklı konfigürasyonları inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Petrollese vd. (2022) rüzgar ve/veya fotovoltaik güç ile beslenecek bir hidrojen vadisi için farklı senaryolar üzerine gerçekleştirdiği tekno-ekonomik analizler sonucu depolama alanının küçük olduğu, hidrojen depolarının sıkça tamamen boşaltıldığı ve elektrolizlerin genellikle kısmi yük ile çalıştığı, yüksek dönüşüm verimliliğine sahip senaryoda en yüksek performansa sahip hidrojen vadisinin elde edildiği tespit etmiştir. Hidrojen vadisinde üretilen enerjisinin depolanma miktarı, süresi, biçimi; satılacak enerjinin miktarı, formu ve zamanı hususlarını kapsayan hidrojen üretim ve depolanmasına ilişkin kontrol stratejilerini incelemek için Schrotenboer vd. (2022), Markov karar süreçlerini kullanarak optimizasyon gerçekleştirmiştir. Güç kaynağı olarak rüzgâr enerjisini kullanan bir hidrojen üretim modelini betimleyen çalışma, üretim ve depolama faaliyetlerini dengeleyerek verimliliği arttırma, piyasa fiyat tahmini ile piyasa öngörülebilirliğini arttırmayı hedefleyen bir metodoloji önermektedir (Schrotenboer vd., 2022). Ramsebner vd. (2024) endüstriyel talebi karşılamak amacıyla değişken talep seviyelerine karşılık vermek için farklı hidrojen vadisi konfigürasyonlarını analiz etmiştir. Çalışmada merkezi olmayan bir hidrojen enerji üretimi modelinin teknolojik-ekonomik stratejileri şebekeye bağlı merkezi üretim konfigürasyonu ile karşılaştırılmış, şebeke bağlantılı merkezi üretim tesislerinde

sabit enerji talebinin birim maliyetlerinin daha düşük olduğunu ancak depolama maliyetlerinin arttığını, değişken enerji talebini karşılamanın ise kapasite yatırımlarını arttırdığını buna karşın depolama ile ilgili maliyetleri ortadan kaldırdığı sonuçlarına varılmıştır (Ramsebner vd., 2024). Rosén vd. (2024), hidrojen enerjisinin boru hattı kullanılarak taşınması için tekno-ekonomik açıdan ve beklenen enerji transferi talebini karşılama kapasitesi açısından farklı konfigürasyonları, lineer optimizasyon kullanarak incelemiştir. İşveç'te bulunan hidrojen altyapısının incelendiği çalışma, elektrik enerji talebinin yüksek olduğu ancak büyük ölçekli hidrojen depolama kapasitesi bulunmadığı durumlarda boru hattı yardımıyla hidrojenin transferi ve elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanımının verimli ve esnek bir çözüm olduğunu öne sürmektedir (Rosén vd., 2024).

Hidrojen vadilerinin başarılı uygulamaları için ekonomik, teknik ve sosyal fizibilite çalışmaları kritik öneme sahiptir ve hidrojen enerjisinin güvenli uygulamalarının gerçekleştirilmesi için hidrojen enerjisinin üretimi, depolanması, taşınması gibi faaliyetler sırasında karşılaşılabilecek riskler tanımlanmalı, değerlendirilmeli ve riskleri en aza indirecek stratejiler geliştirilmelidir.

Mirza vd. (2011) hidrojen kaynaklı kazaları kök sebep analizi ile incelemiş, kazalara sebep olan birincil faktörleri teknik, operatör ve tasarım hataları olarak belirlerken yönetimi kazaya sebep olan ikincil faktör olarak tanımlamışlardır.

Chrysochoidis-Antsos vd. (2020), Hollanda 'da bulunan yakıt ikmal istasyonlarının yanına rüzgâr enerjisi ile üretim yapan hidrojen ikmal istasyonu kurabilmek için teknik imkanlarını değerlendiren bir metodoloji öne sürmüştür. Buna göre coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak mevcut istasyonların uygunluğu değerlendirilmiş, iklim koşulları incelenerek rüzgâr enerjisi ile üretim kapasitesi değerlendirilmiş ve potansiyel hidrojen üretimi ile hidrojen talebi arasındaki ilişki incelenerek kurulabilecek istasyon sayısı ve bu yapıyı destekleyecek boru hattı uzunluğu hesaplanmıştır (Chrysochoidis-Antsos vd., 2020).

Wu vd. (2021) rüzgâr ve fotovoltaik enerji ile hidrojen enerjisi üretimi ve depolama tesisleri için ekonomik, teknik, çevresel ve güvenlik ana kriterleri altında belirledikleri 14 kriteri AHP ile ağırlıklandırmış ve bulanık sentetik değerlendirme ile risk analizini gerçekleştirilmiştir. Önerilen metot, Çin'de bulunana bir rüzgâr-

fotovoltaik-hidrojen deposunun değerlendirilmesi için kullanılmıştır (Wu vd., 2021).

Hirayama vd. (2018) hidrojen dolum istasyonları ile konvensiyonel benzin istasyonlarını Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HMEA) ve Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) yöntemlerini kullanarak karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve kaza olasılıklarının kalitatif değerlendirilmesi sonucu iki istasyonun risk seviyelerinin yaklaşık eşit olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışmanın sonucu, kamuoyunda hidrojen enerjisinin geleneksel enerji kaynakları kadar güvenli olmadığı düşüncesine meydan okumaktadır (Hirayama vd., 2018).

Perelli ve Genna (2022), hidrojen üretim ve depolama tesisi kurulumu için HAZOP ile fiziksel ve kimyasal tehlikeleri ve kazaların önlenmesine yönelik alınabilecek önlemleri detaylı olarak tanımlamıştır. Çalışmada, hidrojen enerjisi risk yönetiminin ilk katmanı olarak tasarım öne çıkmış ve uygun teknoloji ve standartlar kullanılarak tasarlanan tesislerin hidrojen enerjisi üretimi ile ilgili birçok engelin önüne geçilebileceği sonucuna varılmış, risklerin azaltılmasına yönelik diğer hususlar ise kontrol sistemleri, yönetim ve insan hataları olarak belirlenmiştir (Perelli & Genna, 2022).

Pique vd. (2022) Tehlike Tanımlama (HAZID) yöntemini kullanarak hidrojen dolum istasyonları için bir ön risk değerlendirmesi gerçekleştirmiş, belirlenen tehlikelerin olasılığını azaltmak ve olası kazaların etkilerini hafifletmek için gerekli stratejileri belirlemiştir.

Zhao vd. (2023) hidrojen vadisi projeleri için kamu-özel sektör iş birliğinde risk değerlendirmesi için C-OWA operatörü kullanarak risk indeks sistemi geliştirmiş ve gri bulanık sentetik risk değerlendirmesi kullanan bir çerçeve oluşturmuştur. Elde edilen sonuçlara göre kamu kurumlarının standartları oluşturmak ve özel sektör kurumlarının teknolojik inovasyonlar ve hidrojen enerji kullanımının geliştirilmesi yönündeki riskler ile ilgili çalışmalara odaklanması önerilmiştir (Zhao vd., 2023).

Wang vd. (2024), methanol-hidrojen ve sıvı hidrojen dolum istasyonlarında, yangın kazaları ile sonuçlanabilecek gaz sızıntılarını önlemek için papyon ve dinamik Bayes Ağı yöntemleri kullanılarak yeni bir kantitatif risk analizi yöntemi geliştirmiştir. Zhou vd. (2024) ise hidrojen yakıt ikmal istasyonları sızıntı ve sızıntı

kaynaklı kazaları hidrojen dağıtıcı, depolama tankı ve kompresör ile ilgili farklı simülasyon senaryoları kullanarak değerlendirilmiş, böylece olası bir patlama sonrası diğer hidrojen tesisi bileşenlerinde oluşacak hasarı ve tesis yerleşiminin patlama sonuçlarına etkisini analiz etmiştir.

Ma vd. (2024) Pekin Yongfeng hidrojen yakıt istasyonu modeli üzerinde hidrojen kaynaklı bir patlamanın ve ilgili şok dalgalarının çevredeki yapılar üzerinde oluşturacağı hasarı simülasyon üzerinde incelemiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucu hidrojen sızıntısından kaynaklanan bir patlamanın şiddetinin ortam sıcaklığı, ateşleme kaynağının türü ve ateşleme sırasındaki hidrojen-gaz karşımınım konsantrasyonu tarafından belirlendiği ortaya koyulmuştur (Ma vd., 2024).

Hidrojen güvenliğinin sağlanması adına gerçekleştirilen risk değerlendirme çalışmalarına ek olarak çeşitli incelemeler aracılığıyla gelecekte tasarlanacak hidrojen tesislerine veya oluşturulacak politikalara da yol gösterici çalışmalar bulunmaktadır. Hidrojen üretim, depolama ve taşıma faaliyetlerine yönelik inceleme çalışmaları, hidrojen uygulamalarının güvenliğini arttırma amacını taşır. Japonya'da bulunan hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının güvenliği için uygulanan çeşitli risk değerlendirme metodolojilerini özetlemek için Suzuki vd. (2022) bir inceleme çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma, ulusal yönetmeliklerinin hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının tasarımı üzerindeki etkisini ve farklı hidrojen yakıt ikmal istasyonu türleri için hidrojen sızıntısı ve yangın tehlikeleri gibi güvenlik konularına işaret etmektedir (Suzuki vd., 2022). Battaglia ve Vanoli (2024), yakın bir gelecekte yenilenebilir kaynaklar sayesinde üretilen hidrojen enerjisinin, talep fazlası elektriğin yönetilebilmesi için kullanılabilir. Bu kapsamda İtalya'nın Campania bölgesinde Avrupa Birliği'nin CO2 emisyonunu azaltma politikasına uygun yeni bir enerji stratejisi geliştirilmiştir (Battaglia & Vanoli, 2024). Hidrojen ve hidrojen karışımlı gazların boru hattı ile taşınması sırasında meydana gelebilecek tehlikeler konusunda gerçekleştirilen deneysel ve matematiksel çalışmaları incelemek üzere Li vd. (2024) bir literatür taraması gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda hidrojenin taşınması sebebiyle boru hatlarında meydana gelebilecek hidrojen gevrekliği, hidrojen sızıntısı, yangın ve patlama gibi olaylar ve ilgili riskleri azaltacak koşulları incelenmiştir.

Tablo 2.1 Hidrojen vadisi risk analizi kapsamındaki çalışmalar

		(Wang vd., 2024)	(Zhou vd., 2024)	(Zhu vd., 2024)	(Li vd., 2024)	(Guo vd., 2024)	(Battaglia & Vanoli, 2024)	(Zhao vd., 2023)	(Kwak vd., 2023)	(Sun vd., 2023)	(Du vd., 2023)	(Perelli & Genna, 2022)	(Pique vd., 2022)	(Petrollese vd., 2022)	(Aditiya & Aziz, 2021)	(Wu vd., 2021)	(Li vd., 2020)	(Lam vd., 2019)	(Hirayama vd., 2018)	(San Marchi vd., 2017)	(Mirza vd., 2011)
Finansal	X1							✓													
	X2							✓													
	X3							✓							✓	✓					
	X4													✓		✓					
	X5															✓					
	X6							✓								✓					
Politik	X7		✓					✓							✓						
	X8							✓							✓						
	X9		✓					✓	✓			✓								✓	
İş Gücü	X10									✓							✓				
	X11	✓																			
	X12	✓																			
	X13									✓											
	X14	✓								✓	✓	✓					✓				
Yönetimsel	X15							✓		✓								✓			
	X16							✓								✓					
	X17							✓		✓											
	X18									✓											
	X19									✓	✓	✓					✓				✓
	X20							✓													
	X21															✓	✓				
Altyapısal	X22						✓				✓			✓							
	X23										✓					✓					
	X24						✓							✓		✓					
	X25							✓								✓					
	X26									✓	✓										

Tablo 2.1 Hidrojen vadisi risk analizi kapsamındaki çalışmalar (devamı)

		(Wang vd., 2024)	(Zhou vd., 2024)	(Zhu vd., 2024)	(Li vd., 2024)	(Guo vd., 2024)	(Battaglia & Vanoli, 2024)	(Zhao vd., 2023)	(Kwak vd., 2023)	(Sun vd., 2023)	(Du vd., 2023)	(Perelli & Genna, 2022)	(Pique vd., 2022)	(Petrollese vd., 2022)	(Aditiya & Aziz, 2021)	(Wu vd., 2021)	(Li vd., 2020)	(Lam vd., 2019)	(Hirayama vd., 2018)	(San Marchi vd., 2017)	(Mirza vd., 2011)
Çevresel	X27				✓					✓	✓		✓		✓	✓					
	X28										✓		✓			✓		✓			
	X29				✓					✓	✓		✓				✓				
	X30									✓	✓					✓	✓				
	X31								✓												
	X32								✓												
	X33								✓	✓	✓					✓					
	X34								✓		✓										
	X35								✓												
	X36										✓										
Teknik ve Tasarım	X37	✓			✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓
	X38	✓				✓	✓				✓										
	X39												✓								
	X40		✓			✓		✓	✓		✓					✓					
	X41	✓		✓		✓						✓							✓		✓
	X42											✓	✓								✓
	X43			✓		✓					✓	✓									✓
	X44									✓		✓	✓								✓
	X45		✓	✓		✓							✓						✓		✓
	X46	✓		✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓					✓		✓
	X47										✓	✓							✓		
	X48	✓										✓							✓		

X1: Enflasyon; X2: Faiz oranı değişikliği; X3: Finansal Yönetim; X4: Beklenmedik maliyetler; X5: İlk maliyet; X6: Yüksek operasyon ve bakım maliyeti; X7: Merkezi politikalara uygunluk; X8: Merkezi politikaların istikrarı; X9: Endüstri standartlarına uygunluk; X10: Dikkat hatası; X11: Motivasyon eksikliği; X12: Yorgunluk; X13: Çalışanların bedensel sağlığı; X14: Eğitim eksikliği; X15: Talimatların net olmaması; X16: Deneyim eksikliği; X17: Sorumluluk alanlarının net olmaması; X18: Etkili geri bildirim eksikliği; X19: Denetlemenin eksikliği; X20: Katılımcı tarafların deneyimsizliği; X21: Koordinasyon eksikliği; X22: Elektrik enerjisi kaynağına erişim; X23: Rüzgar ve Güneş enerjisine erişim; X24: Su kaynağına erişim; X25: Arazi satın alımı; X26: Ulaşım; X27: Doğa olayları; X28: Hava koşulları (yağmur/kar oranı); X29: Doğal afetler; X30: Zemin ile ilgili sorunlar (engebe, toprak kayması, vb.); X31: Rüzgar hızı; X32: Atmosferik basınç; X33: Atmosferik sıcaklık; X34: Nem; X35: Atmosferik kararlılık; X36: Işık miktarı; X37: Materyal seçimi; X38: Üretim hatasına sahip malzeme; X39: Malzemenin düşürme/darbe sonucu hasar alması; X40: Uygunsuz yerleşim düzeni; X41: Bileşenler arası bağlantının düzgün yapılmaması; X42: Yeterli havalandırma sisteminin bulunmaması; X43: Hidrojen tespit sisteminin yeterli olmaması; X44: İnertleme; X45: Ateşleme kaynaklarının yönetimi; X46: Yeterli ısı ve basınç uyarı sisteminin bulunması; X47: Yangın karşıtı önlemler; X48: Acil kapatma valfi.

2.2 Risk Değerlendirme

Risk değerlendirme yöntemleri genel olarak kalitatif ve kantitatif olarak ikiye ayrılmaktadır (İlbahar vd., 2018). Kalitatif değerlendirmeler, uzmanların deneyim, eğitim ve görüşlerine dayanarak riskler için öznel bir değerlendirme yapılmasını kapsamaktadır. Bu yaklaşım, hesap karmaşıklığı içermez ve verinin eksik ya da yetersiz olduğu durumlarda hızlı ve basit bir çözüm sağlar. Kalitatif risk değerlendirme yöntemlerine Ne-olur (What-if) analizi, Fonksiyonel Tehlike Analizi, HAZID ve HAZOP örnek verilebilir. Ancak risklerin daha hassas, ölçülebilir ve nesnel şekilde değerlendirilebilmesi için kantitatif yöntemlerin kullanılması daha objektif, güvenilir ve hassas incelemeler için gereklilik arz etmektedir. Risk değerlendirmesi, ürün ve süreçlerin kalite ve güvenilirliğini artmasına katkıda bulunur.

Hata modu ve etki analizi (HMEA-Failure Mode and Effects Analysis-FMEA), 1950'lerda ortaya çıkmış ve yüksek risk barındıran havacılık sektöründe güvenilirlik çalışmaları kapsamında kullanılmaya başlanmıştır ve günümüzde birçok farklı sektörde güvenilirlik çalışmaları kapsamında uygulanmaktadır (Bouti & Ait Kadi, 1994). HMEA, bir sürecin aksamasına veya durmasına sebep olabilecek hata türlerini ve bu hataların etkilerin tanımlamak, belirlenen hataların ortaya çıkmasını engelleyecek ya da etkilerini azaltacak yöntemlerin belirlenmesini kapsayan sistematik bir risk değerlendirme yöntemidir (Ford Motor Company, 2011). HMEA mühendislik, sağlık, otomotiv, havacılık sanayi gibi pek çok sektörde sistemlerin güvenirliğini arttırmak amacıyla etkin biçimde kullanılmaktadır (Liu vd., 2014).

HMEA yöntemi ile risk değerlendirmesi, şiddet (Severity-S), oluşma sıklığı (Occurance-O), tespit edilebilirlik (Detectability-D) parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Risk şiddeti, risk ortaya çıktığında süreç ya da ürün üzerinde meydana gelecek etkinin ağırlığını, oluşma sıklığı riskin ortaya çıkma frekansını, tespit edilebilirlik, risk ortaya çıktığında bunu tespit edebilecek mekanizmaların varlığını ifade etmektedir (İlbahar vd., 2018). HMEA uygulamasında, süreç için tespit edilen riskler, şiddet, oluşma sıklığı ve tespit edilebilirlik çerçevesinde genellikle 1-10 arası belirlenmiş bir skalada ile puanlanmaktadır. Parametre skorlarının birbiri ile çarpılması sonucu bir risk öncelik numarası (Risk Priority

Number-RPN) elde edilmekte ve bu risk öncelik numarası, hangi risklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiği konusunda bilgi sahibi olunmasını sağlamakta ve karar vericilerin bilgiye dayalı kararlar vermesi için öncelik belirtmektedir. Yüksek RPN değeri, acil düzeltici faaliyet gerektiren riskleri ifade eder (Liu vd., 2014).

HMEA ile kritiklik analizinin birleştirilmesi ile oluşan Hata Türü Etkileri ve Kritiklik Analizi (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis- FMCEA), sistem veya süreç içerisindeki hata modları için risk öncelik puanının belirlenmesinin yanında çevresel ve operasyonel faktörleri dikkate alarak bir kritiklik değeri hesaplanması ve bu değeri kullanarak risklerin sıralanmasını kapsamaktadır (Bouti & Ait Kadi, 1994).

Fine-Kinney yöntemi, yaygın olarak kullanılan bir diğer sayısal risk değerlendirme yöntemdir. 1971 yılında Fine tarafından temelleri atılmış (Fine, 1971) ve 1976 yılında Fine ve Kinney tarafından son haline getirilmiştir (Gül vd., 2018). Yöntemde risk önceliklendirme puanı, hataların ortaya çıkması durumunda ortaya çıkacak etkinin büyüklüğü olan ciddiyet (Consequence-C), riske maruz kalma sıklığı (Exposure-E) ve riskin meydana gelme olasılığı (P) parametrelerinin çarpımı ile hesaplanır.

Hata Ağacı Analizi ya da HTA (Fault Tree Analysis-FTA), risklerin kök sebeplerin ve risklerin ortaya çıkma olasılığının görselleştirerek analiz edilmesi için kullanılan grafik bir yöntemdir (Ericson, 2005). HTA, yukardan aşağıya bir yöntem olup risklere yol açabilecek faktörlerin mantıksal operatörler kullanılarak dallandırılması ve riskin ortaya çıkmasına sebep olan faktörlerin bir ağaç yapısı şeklinde temsil edilmesini kapsamaktadır. Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis-ETA) ise bir başlangıç olayının sebep olabileceği olası sonuçları aşağıdan yukarı inceleyen grafiksel risk değerlendirme yöntemidir.

Sistemlerin karmaşıklık seviyesinin artması, risklerin etkilerinin hassas ölçümüne duyulan ihtiyaç sebebiyle literatürde öne sürülen pek çok farklı risk değerlendirme yöntemi bulunmaktadır. Özellikle risk değerlendirmesi için mihenk taşı olan uzman görüşlerinin matematiksel modellere daha detaylı olarak aktarılabilmesi, bu süreçte bilgi kaybının yaşanmaması ve risk analizi gerçekleştirilen süreçlerdeki belirsizliğin analize aktarılabilmesi amacıyla bulanık mantığın, risk

değerlendirmesi yöntemlerinde sıkça kullanıldığı görülmektedir (Sarwar vd., 2023).

Literatürde yeterli verinin bulunmadığı durumlarda ve/veya uzman görüşlerindeki belirsizliği modelleyerek risklerin önceliklendirilmesi için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri'nin (ÇKKV) kullanıldığı çalışmalar görmek mümkündür. Hidroelektrik enerji santralinin operasyonu sırasında ortaya çıkabilecek personel, ekipman ve ortam tehlikelerin ağırlıklarının belirlenmesi için Yücesan ve Kahraman (2019), uzmanlardan aldıkları dilsel değerlendirmeleri Aralık Değerli Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (Pythagorean Fuzzy Analytic Hierarchy Process-PFAHP) ile önceliklendirmiştir. Raghu Natha Reddy ve Gokulachandran (2020), tekstil sektöründe risk değerlendirmesi için üretim, süreç, lojistik, esneklik ve teknolojik kriterler altında bulanık AHP ve İdeal Çözüme Benzerlik Bazında Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) tekniklerini kullanmıştır. Lyu vd. (2020), Coğrafi Bilgi Sistemleri'ni (CBS) kullanarak metrolarda su baskını riskini AHP ve Üçgensel Bulanık Sayılar ile Analitik Hiyerarşi Süreci (TFN-AHP- Triangular Fuzzy Numbers Analytic Hierarchy Process) kullanarak belirleyen bir risk değerlendirme yöntemi öne sürmüştür. Deveci vd. (2023), Birleşmiş Milletler 'in sürdürülebilirlik indeksleri ve Avrupa Birliği'nin sürdürülebilirlik hedeflerini temel alarak sürdürülebilir madencilikte risk değerlendirmesi faktörlerini belirlemiş ve geliştirdikleri yeni Fermatean bulanık skor fonksiyonu ve SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis, Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi) yöntemi ile risk faktörlerini ağırlıklandıran bir yöntem geliştirmiştir. İnşaat projelerine dair riskleri zaman, maliyet, kalite, güvenlik ve sürdürülebilirlik kriterlerine göre değerlendirilebilmesi için Taylan vd. (2014), çok kriterli karar verme yöntemlerinin bulanık uzantıları kullanılmıştır. Kriter ağırlıklarını hesaplamak için FAHP ve inşaat projelerinin karar vericilerin değerlendirmelerine göre sıralamak için fuzzy-TOPSIS yöntemi kullanılmıştır (Taylan vd., 2014). Debnath vd. (2018), inşaat sektöründe personelin kısmi vücut yaralanmalarını kaza olasılığı, kaza şiddeti ve güvenlik seviyesi parametrelerine bağlı olarak incelemek için Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemini temel alan dair bir mesleki risk değerlendirmesi yöntemi öne sürmüştür.

Riskin doğasında var olan belirsizliği daha iyi temsil edebilmek ve değerlendirme sürecini daha hassas hale getirebilmek amacıyla risk değerlendirmesinde yaygın bir yöntem olan HMEA temel alınarak geliştirilen metodolojilere literatürde sıkça rastlanmaktadır. Liu vd. (2014), HMEA ile hesaplanan risk öncelik değerinin belirsizlik altında yeterli görülmediği görüşü ile, risk faktörlerini ve risk faktörü ağırlıklarını bulanık sayı olarak ele almış, HMEA ve MULTIMOORA yöntemlerini birleştiren yeni bir risk öncelik modeli önermiştir ve sağlık sektörü kapsamında uygulamasını gerçekleştirmiştir. Mohsen & Fereshteh (2017), proses ekipman arızalarında uzman görüşlerinden kaynaklanan kısmi güvenilirliği açıklamak ve HMEA ile risk değerlendirmede belirsizliği göz önünde bulundurmak için Z-sayılarını kullanan yeni bir yöntem öne sürmüştür. Önerilen metodolojide risk faktörü ağırlıkları FAHP yöntemi ile hesaplanmakta ve hata modlarının önem derecesi Entropi Ağırlıklandırma Yöntemi ile belirlenmekte olup hata modlarının grup faydasını maksimize edecek şekilde sıralanması için VIKOR yöntemi kullanılmıştır (Mohsen & Fereshteh, 2017).

Risk faktörlerinin belirsizlik altında ifade edilebilmesi için Qin vd. (2020), Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler (Interval Type-2 Fuzzy Sets-IT2FSs) ile Kanıta Dayalı Akıl Yürütme (Evidential Reasoning-ER) ile HMEA yöntemini bütünleştiren bir metodoloji öne sürmüş, ağırlıklandırılan risk faktörlerini kanıt yapıları aracılığıyla başarısızlık modlarını analiz etmiştir. Yenilenebilir enerji yatırım risklerini incelemek için İlbahar vd. (2022), Beklenti Teorisi ile Aralık Değerli Bulanık Sayılar ile Analitik Hiyerarşi Süreci'ni (Interval-Valued Fuzzy Numbers Analytic Hierarchy Process IVFN-AHP) HMEA yöntemine entegre eden yenilikçi bir yaklaşım önermiştir. Yöntem, uzman değerlendirmelerindeki belirsizlik ve ön yargıyı Beklenti Teorisi'nin karar ağırlığı fonksiyonu ile normalize ederek, teknolojik, sosyal, pazar ve politika, bölgesel olmak üzere 4 ana kriter altında hiyerarşik olarak tanımlanan risklerin değerlendirilmesini amaçlar (İlbahar vd. (2022). Liu vd. (2024), deniz taşımacılığında petrol sızıntıları üzerinde risk değerlendirmesi için uzmanlar arasındaki ilişkileri ve lider etkisini dikkate alan geliştirilmiş bir HMEA modeli sunmuştur. Önerilen yöntemde uzmanlar arası etkiyi temsil etmek için bir güven ağı oluşturulmuş, belirsizlikler tereddütlü bulanık kümelerle ele alınmış ve risk faktörlerinin ağırlıkları COPRAS yöntemiyle hesaplanmıştır (Liu vd., 2024).

Literatürde benzer şekilde, Fine-Kinney yönteminin revize edilmiş versiyonlarına rastlamak mümkündür. İlbahar vd. (2018), Fine-Kinney, FAHP ve bulanık çıkarım sistemini entegre ederek Pisagor Bulanık Oransal Risk Değerlendirmesi (Pythagorean Fuzzy Proportional Risk Assessment–PFPRA) adında, riskleri gözlem gerektiren, derhal harekete geçilmesi gereken veya sürecin durdurulmasını gerektiren olarak sınıflandırılması için yeni bir risk değerlendirme yöntemi geliştirmiştir. Gül vd. (2018), risk parametrelerinin ağırlıklandırılması için FAHP ve tehlikelerin sıralanması için Bulanık Çok Kriterli Optimizasyon ve Kompromis Çözümleme Yöntemi (Fuzzy Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje-FVIKOR) yöntemlerini Fine-Kinney metoduna entegre etmiş, bu sayede grup karar verme süreçlerini destekleyen ve karmaşık risklerin ayrıntılı biçimde değerlendirilebilmesini sağlayan bir yöntem elde etmeyi amaçlamıştır. İş Sağlığı ve Güvenliği alanında kapsamlı bir risk değerlendirmesi gerçekleştirmek adına Karaşan vd. (2018), Güvenlik ve Kritik Etki Analizi (Safety and Critical Effect Analysis-SCEA) yöntemini ve bu yöntemin Pisagor Bulanık Küme uzantısını literatüre kazandırmıştır. Bu yöntem riskin büyüklüğü, olasılığı, sıklığı ve tespit edilebilirliğini parametrelerini birlikte değerlendirmesiyle HMEA ve Fine-Kinney yöntemlerinin birleşimi olarak değerlendirilebilir (Karaşan vd., 2018).

Bayes ağları, belirsizliklerin modellenmesi ve olasılık temelli analizlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan güçlü bir yöntem olmasıyla risk değerlendirmesi yöntemlerinde kullanılan bir yöntemdir. Kabir vd. (2016), petrol ve gaz boru hatları taşımasında uzman görüşü ve geçmiş veri kullanılarak ürün kusuru, doğal etkenler, sabotaj gibi arızalara sebep olabilecek tehlikeleri, karar vericilerin güvenilirliğini de göz önünde bulundurarak Bayes İnanç Ağı ile modelleyen ve ana düğümlerin meydana gelme olasılıklarını FAHP kullanarak hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Metro inşaatı çalışmalarında risk yönetiminin ve güvenliğin sağlanması amacıyla, Wang ve Chen (2017) Bulanık Kapsamlı Değerlendirme Metodu (Fuzzy Comprehensive Evaluation Method - FCEM) ve Bayes Ağları yöntemlerini birleştirerek yöntemini önermiş, coğrafi, kalite ve inşaat kategorilerinde belirsizlik ve veri eksikliği altında risk değerlendirmesini sağlayan Bulanık Kapsamlı Bayes Ağı (Fuzzy Comprehensive Bayesian Network - FCBN) yöntemini önermiştir. Yu vd. (2024), hata modu sayısının fazla olduğu senaryolarda hata modları arasındaki ilişkiyi Bayes İnanç Ağı kullanarak tanımlayan ve dilsel

modellerin entegre edildiği bir HMEA modeli öne sürmüştür. İlgili çalışma uzman görüşlerini her biri kendi skalasını oluşturacak biçimde kişiselleştirilmiş bireysel anlambilim (Personalized Individual Semantics-PIS) kullanarak ifade etmiş ve insan, çevre, ekipman odaklı tanımlanan riskleri kural tabanlı olarak sıralamıştır (Yu vd., 2024).

2.3 CREAM

Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi CREAM, 1998 yılında Holnagel (1998) tarafından önerilen ikinci nesil bir insan güvenilirliği metodolojisidir. Literatürde İngilizce isminin kısaltması olan CREAM şeklinde yerleşmiş olan yöntem, kavram karmaşasının önüne geçmek adına çalışmanın ilerleyen kısmında da bu isimle anılmıştır. İnsan Güvenilirlik Analizi (İGA, Human Reliability Analysis-HRA), karmaşık sistemlerde insan hatalarının meydana gelme olasılığını belirlemeye, hataların sistem güvenilirliği üzerine etkilerini değerlendirmeye ve hataların oluşma riskini azaltmaya yönelik sistematik bir yaklaşımdır (Hollnagel, 1998). Bu yaklaşım, insan hareketlerinin sistem performansına katkısını ve farklı performans koşullarının hataların meydana gelmesindeki etkisini analiz etmeyi amaçlar.

Birinci nesil insan güvenilirliği metotları insan hatasının nitel değerlendirmesine odaklanmış ve insan hatasında gerçekleştirilen görevin özellikleri ön planda tutmuştur. Bu bakış açısı, hata oluşum sürecini incelemekte yetersiz kalmıştır.

İkinci nesil yöntemler, insan hatasının çevresel faktörle olan ilişkisini insan güvenilirliği analizinin bir parçası olarak değerlendirmiş, çevresel etkenlerin insan hatası üzerindeki etkisinin, görevin kendi özelliklerinden daha önemli olduğunu savunmuş ve nicel ölçümler sağlamaya odaklanmıştır (Marseguerra vd., 2006). Davranış bilimi, psikoloji ve diğer alanları birleştiren ikinci nesil yöntemler, insan hatasını oluşturan faktörleri bütünüyle açıklamaya çalışmıştır (Pan vd., 2017).

İlk nesil insan güvenilirliği metotlarına İnsan Hatası Oranı Tahmin Tekniği (Technique For Human Error-Rate Prediction-THERP), 1990'larda ortaya çıkan ve günümüzde hala kullanılan ikinci nesil yöntemlere CREAM ve İnsan Hatası Analizi için Bir Teknik (A Technique for Human Event Analysis-ATHEANA) örnek olarak verilebilir. Günümüzde, yapay zekâ ve simülasyon gibi matematiksel modeller ile

entegre olmuş insan güvenilirliği analizi yöntemlerini üçüncü nesil olarak tanımlamak mümkündür (Pan vd., 2017).

CREAM'in amacı, insan performansını etkileyen faktörleri analiz ederek hata olasılıklarını tahmin etmek ve sistem güvenilirliğini artırmak için kapsamlı çerçeve sunmak şeklinde özetlenebilir. Hataların analizinde kullanılan faktörler, ortak performans koşulları (Common Performance Conditions-CPC) olarak isimlendirilir. Yöntem, temel CREAM ve genişletilmiş CREAM olarak iki evreden oluşmaktadır. Temel CREAM, insan güvenilirliğini etkileyen koşulları değerlendirmek, hata düzeylerini yaklaşık bir aralıkta tahmin etmek ve Karmaşık (Scrambled), Fırsatçı (Opportunistic), Taktiksel (Tactical), Stratejik (Strategic) olarak sınıflandırmak için kullanılır. Bu sınıflama control modu olarak isimlendirilir ve Bağlamsal Kontrol Modeli'nin (Contextual Control Mode-COCOM) parçasıdır. Kontrol modları operatörlerin sahip olduğu kaynaklar ve karar verme yeteneği, belirsizlik, mevcut önleyici stratejiler açısından değişkenlik göstermektedir. Genişletilmiş CREAM ise hataları görevlerin gerektirdiği bilişsel talepler ve fonksiyonları detaylı olarak Analiz ederek kesin hata olasılıklarının hesaplanması için kullanılır (Hollnagel, 1998).

Literatürde CREAM yönteminin Hollnagel tarafından önerilen şekliyle insan güvenilirliği analizi için kullanıldığı görülmektedir (Akyüz & Çelik, 2015; Maniram Kumar vd., 2015). Ancak karmaşık sistemlerde hata olasılığının hesaplanması için çok fazla gözlem ve deneyim gerektirmekte, OPK'lar arası bağımlılıkların belirlenmesi, belirsizliğin ele alınması açısından CREAM yöntemi yetersiz kalmaktadır. CREAM, yönteminin hesap yükünü hafifletmek ve daha uygulanabilir hale getirmek amacıyla He vd. (2008), basitleştirilmiş bir CREAM versiyonu öne sürmüştür.

CREAM ile hata olasılığını hesaplanırken insan, organizasyon, teknolojik ve çevresel faktörlerin tamamı ele alınır (Konstandinidou vd., 2006). İnsanların sınırlı bilgi işleme kapasitesi, verilere dayanarak çıkarım yapma süreçleri bağlamında güvenilirlik kapsamında dahi CREAM, odağında insanı bulundurduğu için karar verme teorisi ile yakından ilişkilidir (Hollnagel, 1998). İnsan güvenilirlik analizinin öznel yargılara dayanması ve hatanın oluştuğu koşullardaki belirsizlikleri hesaba katabilmek için, bulanık mantık CREAM yöntemine entegre edilerek, öznel

yargıları sistematik bir şekilde ölçme ve performansı etkileyen faktörlerin analizini daha duyarlı bir şekilde gerçekleştirme imkânı sağlar (Konstandinidou vd., 2006).

Belirsizliği temsil etmek ve insan muhakemesini taklit etmek amacıyla, aitliği 0 ile 1 arasında sürekli bir değerle ifade eden matematiksel model, bulanık mantık olarak adlandırılmaktadır (Zadeh, 1965). Bulanık mantık, insanın düşünme yapısını taklit etmeyi ve karar verme mekanizmasını modellemek amacıyla kullanılır. Konstandinidou vd. (2006), insan güvenilirliği analizinde operatörün deneyim ve karar verme süreçlerinin doğasında yer alan öznellik ve belirsizliği sayısal olarak ele almak ve daha gerçekçi bir matematiksel model oluşturmak için CREAM yöntemini bulanık mantık ile entegre etmiştir. Önerilen yeni metodoloji OPK'ların riskler üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi, bulanık çıkarım sistemi oluşturarak meydana gelen hataların hızlı, etkili ve analitik biçimde analiz edilmesini sağlamaktadır, bu sayede belirsiz çalışma koşulları, yetersiz veri ve kalitatif değerlendirmeler altında güvenilir bir analiz yöntemi ortaya çıkmıştır (Konstandinidou vd., 2006). Marseguerra vd. (2006), Konstandinidou vd. (2006) tarafından önerilen bulanık CREAM yöntemini belirsizlikleri azaltmak için OPK ağırlıklarını ve OPK arasındaki bağımlılık ilişkilerini Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process-AHP) ile inceleyerek genişletmiştir. Liu vd. (2013) ise geliştirdikleri CREAM-bulanık mantık temelli yöntem ile insan faktörü çeşitliliğinin, bireylerin eğitim, tecrübe, yetkinlik gibi faktörlerinden dolayı ortaya çıkan çeşitliliğin, hata olasılıkları ve Ortak Sebep Hatasına (Common Cause Failure-CCF) etkisini incelemiştir.

Orijinal CREAM'in geliştiricisi Eric Hollnagel'ın da aralarında bulunduğu Kim vd. (2006), Bayes Ağları ile CREAM yöntemini entegre ederek kontrol modunu olasılık ile bulan bir yaklaşım geliştirmiştir. Önerilen metodolojide deterministik modeli stokastik hale getirmek ve bu sayede güvenilirlik analizi kapsamında ortaya çıkabilecek belirsizliklerin olasılık dağılımları ile temsil edilmesine ve daha hassas bir analiz gerçekleştirilmesine olanak sağlamak amacıyla Bayes Ağları tercih edilmiştir (Kim vd., 2006). Yang vd. (2011) ise Bayes Ağ Modelini hem kontrol modu belirleme hem de insan hatası olasılığını tespit etme mekanizması geliştirmiş, önerdikleri yöntemde OPK'lar arasındaki nedensel ilişkilerini göstermek ve risk olasılıklarını tahmin etmek için Bayes Ağ Modelini kullanmış, önerilen metodolojide OPK'lar değerlendirilirken nötr etki derecesi kaldırılmış ve

OPK'ların performansa olan pozitif ve negatif etkileri değerlendirilmiştir. Bao vd. (2013), CREAM yöntemini elektrik güç sistemlerinde enerji akışını kontrol etmek kapsamında operatörler arasındaki bağımlılığı inceleyecek biçimde geliştirmiştir. Bunun için orijinal yöntemde belirtilen OPK'lar, operatörler arası bağımlılığa etki eden faktörler ile değiştirilmiş ve yeni faktörler bulanık sayılar ile tanımlanmış, operatörler arası ilişkinin insan hatası üzerine etkisini ise Bayes Ağları ile modellenmiştir (Bao vd., 2013).

Yang vd. (2012), motor montaj hattında insan hatalarından kaynaklanan kalite kusurlarını analiz etmek üzere CREAM ile Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis-FTA) yöntemlerini entegre eden yeni bir metodoloji öne sürmüştür. Geliştirilen yöntemde geleneksel CREAM yöntemindeki arıza modları ihmal, hata ve ihlal olarak uyarlanmış, hataların öncülleri ve geriye dönük ilişkileri yeniden tanımlanarak yöntem motor üretim bağlamında özelleştirilmiştir. CREAM kök sebeplerin belirlenmesi, Hata Ağacı Analizi ise kök sebeplerin göreceli önemini hesaplamak için kullanılmıştır (Yang vd., 2012).

Denizcilik, yüksek riskliler barındıran bir sektör olduğundan hataların önlenmesi kritik öneme sahiptir bu kapsamda Yang vd. (2013), denizcilikte yeterli veri olmadığı durumlarda ve belirsizlik altında riski sayısal olarak modelleyebilmek ve insan hata olasılığının tespit edilebilmesi için AHP ile OPK ağırlıkları belirlenmiş, Bulanık Kanıtsal Akıl Yürütme (Fuzzy Evidential Reasoning) ve Bayes Ağ Modeli ile birleştirmiş ve çok girişli, çok çıkışlı bir Bayes çıkarım modeli kullanılmıştır. Tanker operasyonlarında insan güvenilirliğini değerlendirmek için Zhou vd. (2017), belirledikleri 8 OPK'yı Bulanık AHP (Fuzzy AHP-FAHP) ile ağırlıklandırmış ve CREAM ile hata olasılık değerlerini hesaplamıştır. Denizcilik operasyonları ile ilgili gerçekleştirilen yapılan çalışmada ise Xi vd. (2017) riskler OPK ağırlıklarının DEMATEL yöntemi ile belirlendiği, Kanıtsal Akıl Yürütme ve CREAM yönteminin entegrasyonu ile değerlendirilmiş olup çalışma eksik veriler altında karar vermeye odaklanan bir yaklaşım sunmaktadır. Gemi kazalarının önlenmesi için insan hatalarını inceleyen Ung (2018), kazaya sebep olabilecek faktörleri FTA ile modellemiş, Bayes Çıkarımı ile OPK'lar arasındaki ilişkileri modelleyen yöntemin esas amacı bilgi kaybı olmadan OPK'lar ve kontrol modu arasında dönüşümünü sağlamaktır. Bir diğer çalışmasında Ung (2019), petrol tankerlerinin çarpışmasında insan hatasının etkisini, CREAM, Hata Ağacı Analizi

ve Bulanık Bayes ağı yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Mevcut veriler ve uzman görüşü ile kazalara sebep olan olaylar Hata Ağacı Analizi ile modellenmiş, Bulanık Bayes Ağı ve CREAM yöntemleri kullanılarak hataların meydana gelme olasılığı hesaplanmıştır. Ung, CREAM yöntemini uyarlarken, OPK'ları tanker çarpışması esnasında ortaya çıkacak koşulları değerlendirecek biçimde 7 adet olarak tanımlamıştır (Ung, 2019). Yine denizcilik alanında insan hatasını incelemek üzere Yang vd. (2019), CREAM yönteminde OPK ilişkilerini Bayes Ağı ile modellemiş, Kanıta Dayalı Muhakeme ile olasılık değerlerini hesaplamış, yöntemin geçerliliği Deepwater Horizon kazası verileriyle doğrulanmıştır. Derin su sondajlarında acil bağlantı kesme faaliyetinin değerlendirilmesi için Nie vd. (2019), CREAM ile IAHP (Improved AHP) ve DBN-GO (Hedef Odaklı Dinamik Bayes Ağı, Goal-Oriented Dynamic Bayesian Network) yöntemleri entegre edilmiştir. Çalışmada sondaj çalışmalarının farklı aşamalarında acil bağlantı kesilmesi için orijinal CREAM'den farklı olarak hata olasılığı yerine eylemin başarıya ulaşma olasılığı hesaplanmıştır, bu sayede sistem güvenilirliğinin ve operasyonel etkinliğinin artırılması hedeflemiştir (Nie vd., 2019). Ahn ve Kurt (2020), gemilerde motor odasında çıkan yangınlarda, personelin acil durum tepkisini ölçmek ve güvenilirlik hesaplamak için Bulanık Mantık, Bayes Ağları ve Kanıta Dayalı Akıl Yürütme yöntemlerini entegre eden bir metodoloji önermiştir. Lee vd. (2024), balıkçı gemilerinde insan güvenilirliği analizi gerçekleştirmek için CREAM yönteminde OPK'ları yeniden tanımlamış, Bulanık Mantık ve Bayes Ağları ile entegre bir yöntem geliştirmiştir.

Modifiye edilen CREAM yöntemlerinin farklı sektörlerde uygulama alanı bulduğu görülmektedir. Üretim sırasında operasyonel güvenliği arttırmak için geliştirilen yeni yöntem IRIS (Integrated Risk Index by Sapio), Calá vd (2020). tarafından bütünleşik ve dinamik bir risk yönetimi olarak öne sürülmüştür. Öne sürülen yöntemde, Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (Hazard and Operability Study-HAZOP) ile belirlenen tehlikeler, Bayes Ağları kullanılarak risk faktörleri arasındaki ilişkiler modellenmiş, ardından görevler CREAM yöntemi ile analiz edilerek, insan faktörleri açısından temel kontrol modlarına göre sınıflandırılmıştır. Stratejik olarak sınıflandırılmamış görevler, Genişletilmiş CREAM ile daha detaylı analiz edilmiş, nihayetinde Çok Kriterli Değer Teorisi (Multi-Attribute Value Theory-MAVT) kullanılarak, risk faktörleri önceliklendirilmiş ve bir risk indeksi

hesaplanmıştır (Calá vd., 2020). Ma vd. (2021), inşaat alanlarında meydana gelebilecek kazaları incelemek için Dinamik Bayes Ağları ile CREAM yöntemini entegre eden ve zamana bağlı olarak riskleri inceleyen bir yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmanın amacı, insan hatasının meydana geliş sürecini simüle etmektir (Ma vd., 2021). Önerilen yöntemde Bayes ağında modellenen hatalar, sonuçları ani ya da zaman içinde ortaya çıkan olarak sınıflandırılmış, bu sınıflandırma sayesinde, insan hatasının oluşum akışı belirlenmiş ve olasılık tahminleri daha hassas ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Mahdi Rezaie vd. (2021), şehir içi demiryollarında insan kaynakları güvenilirliğini incelemek amacıyla geliştirdiği yöntemde CREAM'e OPK'lar arasındaki ilişkiyi incelemek ve OPK ağırlıklarını belirlemek için Bulanık Analitik Ağ Sürecini (Fuzzy Analytic Network Process- FANP) entegre etmiştir. Chen vd. (2021), yüksek hızlı tren operasyonlarında insan güvenilirliğini ölçmek için CREAM yönteminde aralık değerli tip-2 bulanık sayılarını kullanmış ve OPK arası bağımlılıkları ölçmek için Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process-ANP) yöntemini kullanmıştır.

Bu çalışma hidrojen vadisi tasarımı için risk değerlendirmesini finansal, altyapısal, çevresel, yönetimsel ve teknik boyutlardan ele alarak bütüncül bir risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. CREAM çerçevesinde geliştirilen metodoloji, risklerin çevresel faktörler ile ilişkisini inceleyerek belirsiz ortamlar için sisteme etki eden farklı faktörlerin ve bu faktörler arasındaki ilişkilerinin sayısal olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Önerilen metodoloji belirlenen problem kapsamında yapısal model kurulduktan sonra uzman görüşlerinin hesap yükü olmadan YSA ve BÇS yolukla kantitatif hale getirmektedir

Tablo 2.2 Literatürde CREAM entegrasyonları

Çalışma	CREAM Entegrasyonu	Uygulama Alanı	Uygulama	Uygulama Sektörü
(Konstandinidou vd., 2006)	Bulanık Mantık	İnsan Güvenilirlik Analizi (İGA)	Açıklayıcı Örnek	Kimya
(Marseguerra vd., 2006)	Bulanık Mantık	İGA	Açıklayıcı Örnek	Nükleer Enerji ve Havacılık
(Kim vd., 2006)	Bayes Ağ Modeli	İGA	Açıklayıcı Örnek	Nükleer Enerji
(Yang vd., 2011)	Bayes Ağ Modeli	İGA	Açıklayıcı Örnek	-
(Yang vd., 2012)	Hata Ağacı Analizi	Kalite Kusurlarının Analizi	Vaka Analizi	Motor Montaj Hattı
(Liu vd., 2013)	Bulanık Mantık	İGA ve Ortak Sebep Hatası Analizi	Açıklayıcı Örnek	-
(Bao vd., 2013)	Bulanık Mantık ve Bayes Ağ Modeli	İGA	Vaka Analizi	Elektrik Güç Sistemi Anahtarlama
(Yang vd., 2013)	Bulanık Bayes Ağ Modeli, Bayes Çıkarımı, Kanıta Dayalı Muhakeme (KDM)	İGA	Açıklayıcı Örnek	Denizcilik
(Zhou vd., 2017)	Bulanık Mantık, AHP,	İGA	Uygulama	Tanker Operasyonları
(Xi vd., 2017)	KDM, DEMATEL	İGA	Vaka Analizi	Denizcilik
(Ung, 2018)	Bulanık Mantık, Bayes Çıkarımı, Hata Ağacı Analizi	İGA	Açıklayıcı Örnek	Denizcilik
(Nie vd., 2019)	IAHP (Improved AHP), DBN-GO (Hedef Odaklı Dinamik Bayes Ağı)	İGA, Başarı Olasılığı Hesaplama	Açıklayıcı Örnek	Sondaj Çalışmaları
(Ung, 2019)	Bulanık Bayes Ağı, Hata Ağacı Analizi	İGA	Uygulama	Petrol Tanker Kazaları
(Yang vd., 2019)	Bayes Ağ Modeli, KDM	İGA	Vaka Analizi	Denizcilik
(Ahn & Kurt, 2020)	Bulanık Mantık, Bayes Ağ Modeli ve KDM	İGA	Uygulama	Gemi Motor Odası Yangını
(Calá vd., 2020)	Bayes Ağ Modeli, Çok Kriterli Değer Teorisi, Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması	İGA, Risk Yönetimi	Açıklayıcı Örnek	Kriyojenik Gaz Üretimi
(Chen vd., 2021)	Aralık Değerli Tip-2 Bulanık Sayılar, Analitik Ağ Süreci	İGA	Açıklayıcı Örnek	Yüksek Hızlı Tren Operasyonları
(Ma vd., 2021)	Dinamik Bayes Ağ Modeli	İGA, Risk Analizi	Açıklayıcı Örnek	Asansör Montajı-İnşaat
(Mahdi Rezaie vd., 2021)	Bulanık Analitik Ağ Süreci	İGA	Vaka Analizi	Şehir İçi Demiryollarında
(Lee vd., 2024)	Bulanık Mantık, Bayes Ağ Modeli	İGA	Uygulama	Balıkçı Tekneleri

2.4 Araştırmanın Katkısı

Literatürdeki çalışmalar, temiz enerjiye geçiş sürecinde hidrojen vadilerinin çeşitli kapsamlarda önemi ve hidrojenle ilgili teknolojilerin adaptasyonuna ilişkin mevcut duruma dair araştırmaları sunmaktadır.

Mevcut literatürdeki çalışmalar, hidrojen vadileri bağlamında öncelikle hidrojen enerjisine ve ilgili teknolojilere geçiş sürecinde ortaya çıkan fırsatlara ve zorluklara odaklanmaktadır. Buna ek olarak ulusal ve küresel ölçekte hidrojen enerjisine adaptasyon düzeyine ilişkin araştırmalar bulunmaktadır. Bu bağlamda literatür, hidrojen enerjisinin yaygınlaştırılabilmesi ve hidrojen vadilerinin geliştirilebilmesi için gerekli olan teknik, ekonomik ve sosyal altyapının incelendiği çalışmaları kapsamaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla ekonomik, teknolojik ve sosyal bakış açılarına odaklanmaktadır. Oysa hidrojen vadilerinin gerektirdiği yatırım miktarı ve gerekli altyapısal karmaşıklık göz önünde bulundurulduğunda hidrojen vadilerinin çok boyutlu bir analiz sürecine ihtiyaç duyduğu açıktır. Bu nedenle, hidrojen vadilerine özgü olarak finansal, çevresel, yönetsel, altyapısal ve teknik boyutların eşzamanlı olarak değerlendirilebildiği bir risk değerlendirme metodolojisine yönelik önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışmada öncelikli amaç, söz konusu boşluğu gidermektir.

Hidrojen enerjisi kapsamında yürütülen mevcut risk analizi çalışmaları ise meydana gelmiş yangın ve patlama gibi hidrojen kaynaklı kazalara odaklanmaktadır. Bu durum, önleyici ve proaktif bir yaklaşımın literatürde eksik kaldığını göstermektedir. Hidrojen enerjisine dair risk analizi çalışmaları incelendiğinde üretim, depolama, taşıma, dolum ve tüketim gibi farklı operasyonların tekil olarak ya da birkaçının kombinasyonu olarak incelendiği görülmektedir. Literatürde hidrojen vadilerine özgü kapsamlı bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirilmemiş olmakla birlikte, hidrojen vadilerinin güvenli ve sürdürülebilir işleyişinin sağlanmasına yönelik bütüncül ve kapsamlı bir risk analizi metodolojisinin eksikliği bulunmaktadır.

Ek olarak, yöntemin mimarı Eric Hollnagel, 2012'de yayınladığı bir yazıda, CREAM'in hata kaynağını yalnızca sistemin insan bileşeninde araması, analizde görevin tek bir parçasına odaklanması ve sistemin değişkenliğinden ziyade eylemlerin başarısız olabileceği noktaları incelemesi nedeniyle günümüz

ihtiyaçlarına tam olarak yanıt vermeyen bir yöntem olduğunu ifade etmiştir (Hollnagel, 2012). Bu doğrultuda önerilen CREAM tabanlı risk değerlendirme yaklaşımı, ile gerçekleştirilen analizi finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutları kapsayacak biçimde genişleterek kapsamlı ve çok boyutlu bir analiz için uyarlamıştır.

CREAM, insan güvenilirliği analizinde etkili bir çerçeve sunmasına karşın, risk değerlendirme kapsamına taşınabilmesi için önemli yapısal değişikliklere ihtiyaç duymaktadır. Literatürde çeşitli gerçek problemlere uyarlanmış özgün CREAM yaklaşımları bulunsa da, hidrojen vadilerinde bir risk analizi gerçekleştirebilecek şekilde geliştirilmiş bir CREAM modeli henüz önerilmemiştir. Geleneksel risk değerlendirme yöntemleri, hidrojen vadilerinin çok boyutlu ve dinamik yapısını kavramada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, söz konusu yapıların tasarım sürecinde ortaya çıkan karmaşıklık ve karşılıklı bağımlılıkların etkili bir şekilde ele alınabilmesi için birden fazla yöntemin bütünleştirilmesine dayalı kapsamlı bir metodolojiye ihtiyaç vardır. Öte yandan, risk değerlendirme süreçleri büyük ölçüde uzman görüşlerine bağımlı olup, uzman verisinin elde edilmesi süreci çeşitli zorlukları barındırmaktadır. Bu nedenle, uzman bağımlılığını ve öznel girdilerdeki belirsizliği azaltmaya yönelik gelişmiş yöntemlerin kullanımı gereklidir. Bu kapsamda, yapay zekâ uygulamaları; sınırlı veri ile öğrenme yeteneği ve karmaşık sistemleri modelleyebilme kapasitesi sayesinde, hidrojen vadisi tasarım süreçlerinde genel desenleri tanımlamak ve uyarlanabilir öğrenmeyi desteklemek amacıyla kullanılabilir. Ancak mevcut literatürde, hidrojen vadisi odaklı çalışmalarda yapay zekâ tabanlı dinamik risk değerlendirme yaklaşımlarının entegrasyonunun yetersiz olduğu görülmektedir.

2.5 Araştırma Soruları

Gerçekleştirilen bu çalışma, aşağıdaki sorulara cevap aramaktadır.

- Hidrojen vadisi kapsamında gerçekleştirilen üretim, depolama, taşıma faaliyetleri tasarım sürecinden nasıl etkilenir?
- Bir hidrojen vadisinin tasarım sürecinde ne tür riskler ile karşılaşılmaktadır?
- Hidrojen vadisi tasarımı sırasında ortaya çıkan riskler hangi boyutlar ve koşullar kapsamında değerlendirilmelidir?

- Hidrojen vadisi tasarım süreci için standartlaştırılmış bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirilebilir mi?
- CREAM metodolojisinde karşılaşılan sınırlılıklar entegre bir yaklaşımla giderilebilir mi?
- Risk değerlendirme sürecinde, kriterler arası nedensellik ilişkilerini gösteren yapısal bir model nasıl oluşturulur?
- Kriterlerin birbiri üzerindeki etki şiddetleri göz ününde bulundurularak etki ağırlığı nasıl hesaplanabilir?
- Uzman görüşlerine yüksek derecede bağımlı olan süreçlerde yapay sinir ağları kullanılarak uzman görüşleri sistematik olarak modellenebilir mi?
- Farklı boyutlarda gerçekleştirilen risk değerlendirmeleri, bilgi kaybını en aza indirecek biçimde nasıl birleştirilebilir?

Bu tez çalışması, ilgili araştırma sorularını hidrojen vadisi tasarım süreci için CREAM ve YSA ile entegre edilmiş, standartlaştırılmış bir risk değerlendirme metodu ile cevaplayacaktır.

3
ÖNERİLEN METODOLOJİ

Çalışmanın bu bölümünde hidrojen vadisi tasarım sürecinde risk değerlendirmesi sürecinde, başta CREAM olmak üzere, kullanılan yöntemler detaylı adımlarıyla aktarılmış, ardından önerilen entegre risk değerlendirme yaklaşımı sunulmuştur.

3.1 CREAM

CREAM, hataların geriye dönük analizi, ortaya çıkma sebeplerinin incelenmesi veya güvenilirlik performansının tahmin edilmesi süreçlerinde kullanılan bir insan güvenilirlik metodudur. Yöntem, insan hatasının çalışma koşullarına bağlı karmaşık bir bağlam içerisinde geliştiği varsayımına dayanır, bu sebeple hataların ortaya çıkış sebebini analiz ederken bilişsel ögelerin yanında çevresel faktörleri de analize dahil etmektedir. Bu bağlamda CREAM, insan-makine etkileşimi esnasında insan performansını bütünsel biçimde analiz eden, hataların ortaya çıkma olasılıklarının hesaplamasında ve hataların ortaya çıkmasına neden olan sebeplerin tespit edilmesi için kullanılan bir yöntemdir.

Bu bölümde CREAM metodolojisine ait kavramlar ve metodolojisinin adımları Hollnagel tarafından 1998'de tanımlandığı üzere aktarılmıştır (Hollnagel, 1998).

3.1.1 Bağlamsal Kontrol Modeli

Hollnagel, CREAM yönteminde çevresel faktörlerin çalışan tarafından gerçekleştirilen görevlere etkisini incelemek için Bağlamsal Kontrol Modeli'ni (BKM) önermiştir. Bu model, çalışma ortamını oluşturan insan, teknoloji ve örgüt ile ilişkili faktörleri göz önünde bulundurarak hataların oluşmasında bu çevresel koşulların etkisini incelemeyi amaçlamaktadır.

3.1.1.1 Kontrol Modları

Güvenilirlik analizinin gerçekleştirildiği anda çalışana bulunduğu ortamdaki çalışma koşulları, mevcut ekipman, zaman kısıtı, çalışanın deneyimi gibi faktörler

sonucu oluşan durumda hangi strateji ile hareket edeceği bağlamsal kontrol modelinin kontrol modları ile açıklanır. Bu kapsamda mevcut koşullar altında çalışanın olaylara tepki verebilme, plan yapabilme ve gelecek durumu öngörme kabiliyeti doğrultusunda süreci yönetmek için Karmaşık (Scrambled), Fırsatçı (Opportunistic), Taktiksel (Tactical) ve Stratejik (Strategical) olmak üzere dört farklı kontrol modu bulunmaktadır.

Bağlamsal Kontrol Modeli, hataların sınıflandırılmasından öte hataların meydana geldiği anda ortamdaki çevresel faktörleri betimlemektedir. Kontrol modları, operatörün mevcut durum karşısında sahip olduğu kontrol miktarının tespit edilmesi, bir sonraki adımda nasıl hareket edeceğinin öngörülebilmesi ve performans güvenilirliğinin dolayısıyla bir hatanın meydana gelme olasılığının tahmin edilmesi için kullanılır. Kontrol seviyesinin etkinliği, çalışanın bilişsel süreçleri, deneyimi ve beklentilerine göre şekil alacağından aynı çevresel koşullar altında farklı bireyler için belirlenen kontrol modu aynı olmayacaktır. Belirlenen kontrol modu, operatörün karar verme mekanizması ve eylem planı hakkında bilgi vermektedir. Hollnagel tarafından bağlamsal kontrol modeli içerisinde tanımlanan kontrol modlarına dair detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

Karmaşık Kontrol Modu: Sürecin bir sonraki aşamasının öngörülemediği, ekipman tasarımının ve ara yüzünün beklenen işlevleri karşılamadığı, zaman baskısının yüksek olduğu ve gerekli eylem prosedürlerinin bulunmadığı ortamı ifade eder. Karmaşık kontrol modu, çalışanın mevcut duruma dair farkındalığının var olmadığı, sürece aşina olmadığı ve bir sonraki adımda ne yapması gerektiğine dair plan yapamadığı durumdur.

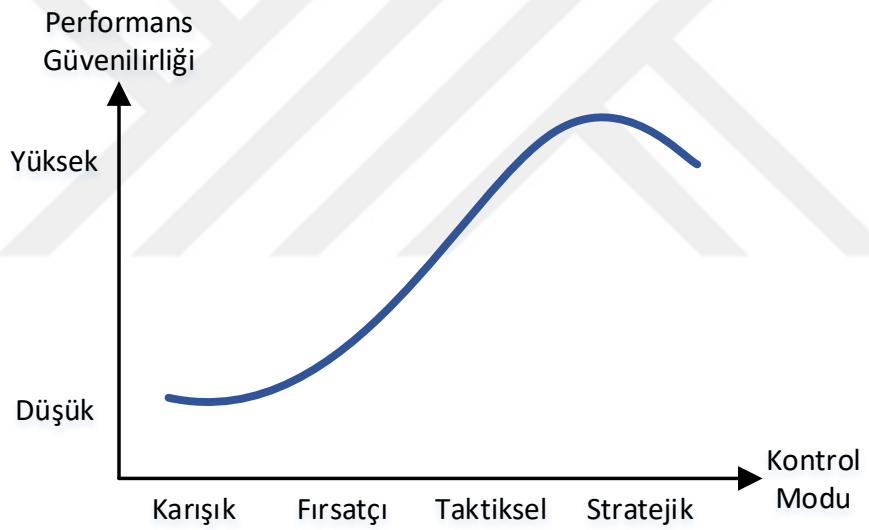
Fırsatçı Kontrol Modu: Çalışma koşullarının çalışan tarafından tam algılanmadığı ve zaman baskısının mevcut olduğu durumdur. Fırsatçı kontrol modunda çalışan bir sonraki eylemini uzun vadeli bir stratejiye göre değil, mevcut durumdaki koşullara bağlı biçimde sezgilerine ve alışkanlıklarına dayanarak belirler.

Taktiksel Kontrol Modu: Kısıtlı bir kapsam ve zaman dilimi kapsamında belirli prosedürler belirlenmiş ise çalışanın eylem stratejisi taktiksel kontrol modu olarak belirlenir. Zaman baskısı Karmaşık ve Fırsatçı kontrol moduna göre daha az olmakla beraber mevcut çalışma koşulları çalışana tanıdık gelmekte ve önceden belirlenmiş hedefler sayesinde çalışan, gelecek durum hakkında öngörüde

bulunabilmektedir. Sık karşılaşılan çalışma koşulları, çalışanın prosedürler dahilinde kural tanımlı hareketler geliştirmesine olanak tanır.

Stratejik Kontrol Modu: Stratejik kontrol modu, ideal durum gibi düşünülebilir. Çalışandan beklenen görev için gerekli ekipmanın hazır olduğu ve ara yüzünün kullanıma en uygun şekilde tasarlandığı, gerekli prosedürlerin tanımlandığı, çalışana karar vermek için geniş bir zaman dilimi tanındığı ve çalışanın yetkinlik düzeyinin yüksek olduğu çalışma koşulları stratejik kontrol modunu ifade eder. Bu bağlamda stratejik kontrol modunda uygun çalışma ortamının sağlandığı, deneyim ve yeteneklerinin kendisine atanan görev ile eşleştiği durumda çalışan sistemin gelecek durumunu değerlendirerek uzun vadeli kararlar alabilir.

Bağlamsal kontrol modeli çerçevesinde insan performansına dair güvenilirlik ile kontrol modlarının ilişkisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kontrol modu-güvenilirlik ilişkisi (Hollnagel, 1998)

3.1.1.2 Genotip ve Fenotip

Hataların ne olduğunu ve nasıl meydana geldiğine dair nedensel ilişkinin kurulabilmesi için CREAM, hataların gözlemlenebilir belirtileri ile hataların meydana çıkmasının altında yatan nedenleri ayrı biçimde incelemektedir. Hatanın ortaya çıkmasına neden olan gözlemlenebilir ve somut biçimde tespit edilebilir faktörler *fenotip* olarak isimlendirilmektedir. *Genotip* ise hataların ortaya çıkmasına neden olan gizli koşulları ifade eder ve bu faktörler deneyim, yorumlama ve ek

araştırmalar ile tespit edilebilir. CREAM kapsamında hataların ortaya çıkışına dair sebep-sonuç ilişkileri, genotip-fenotip ile kurulur.

Genotipler insan, teknoloji ve organizasyon ile ilgili olmak üzere 3 gruba ayrılır. İnsanla ilişkili genotiplere gözlem hatası, planlama eksikliği, dikkatsizlik ve yanlış tespit olarak örnek verilebilir. Arayüz tasarımının karmaşık olması, ekipman arızası, tasarım hatası, prosedürlerin net olmaması gibi faktörler teknoloji ilişkili genotipler olarak sınıflandırılır. Çalışana gerekli eğitimin verilmemiş olması, iletişim eksikliği, uygun çalışma ortamının sağlanmaması (yeterince aydınlatılmamış, gürültülü, kalabalık vb.) organizasyonla ilişkili genotipler arasında yer alır. Genotiplerin genel sınıflandırılması, Şekil 3.2'de görülebilir.



Şekil 3.2 Genotiplerin sınıflandırılması (Hollnagel, 1998)

Fenotipler yanlış zamanda, yanlış türde, yanlış nesnede, yanlış sırada gerçekleştirilen eylemler olarak sınıflandırılır. Bir veya birkaç genotipin arasındaki etkileşimler sonucu ortaya çıkan fenotipler, hata modu olarak da isimlendirilir. Hataların analizi sırasında fenotiplerin yanı sıra genotiplerin de analiz edilmesi, hatanın altında yatan gizli faktörlerin açığa çıkarılmasına ve bu hataların azaltılması için ilgili stratejilerin geliştirilmesine yardımcı olur.

3.1.1.3 Ortak Performans Koşulları (OPK)

Hataların ortaya çıkmasına sebep olan çalışma ortamını oluşturan görev, personel, mevcut ekipman ve çevresel koşulların tamamı ortak performans koşulları (OPK) tanımlanabilir. Ortak performans koşulları, hata olasılığını belirleyen kontrol modunun belirlenmesi için kullanılır. CREAM yönteminde hataların analizi için kullanılan ortak performans koşulları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Ortak performans koşulları (Hollnagel, 1998)

Ortak Performans Koşulları	Açıklama	Tanımlayıcı
Organizasyonun Yeterliliği	Ekip üyelerinin rol ve sorumluluk tanımları, kurumsal destek ve prosedürlerinin, yönetim sistemleri unsurlarının mevcudiyetini ve yeterliliğini değerlendirir.	Yetersiz, Verimsiz, Verimli, Çok Verimli
Çalışma Koşulları	Fiziksel çalışma koşullarının niteliği (Ortam aydınlatması, ekran parlaklığı, gürültü vb.)	Uyumsuz, Uyumlu, Avantajlı
İnsan-Makine Arayüzü ve Operasyonel Destek Yeterliliği	Kullanılan ekipman, kontrol panelleri, otomasyon ve prosedürlerin anlaşılabilirliği ve tasarımının geneli	Uygunsuz, Tolere Edilebilir, Yeterli, Destekleyici
Prosedür/Planların Mevcudiyeti	Operasyonel ve acil durumlar için prosedürlerin mevcudiyeti, rutin ve sezgisel müdahalelerin gelişmiş olması	Uygunsuz, Kabul edilebilir, Uygun
Eşzamanlı Hedeflerin Sayısı	Çalışandan aynı anda gerçekleştirmesi beklenen hedef sayısı	Daha fazlası..., Eşleşen..., Daha az...
Mevcut Zaman	Görevi yerine getirilmesi için çalışana verilen zaman ve görevin yürütülmesinin süreç dinamikleri ile ne kadar iyi senkronize edildiğine karşılık gelir.	Sürekli yetersiz, Geçiçi yetersiz, Yeterli
Günün Saati (Sirkadiyen Ritim)	Görevin gerçekleştirildiği günün (veya gecenin) saati, görev saatinin kişinin sirkadiyen ritmine göre ayarlanıp ayarlanmadığını tanımlar. Günün saatinin ve özellikle vardiyanın işin kalitesi üzerindeki etkisi ve normal sirkadiyen ritmin bozulması halinde performans veriminin azalması.	Gece (Sirkadiyen ritimle uyumsuz), Gündüz (Sirkadiyen ritme uyumlu)
Eğitim ve Deneyimin Yeterliliği	Operatörlere yeni teknolojiye alışma, eski becerileri tazeleme vb. konularda verilen eğitimin seviyesi ve kalitesi. Aynı zamanda operasyonel deneyim seviyesini de ifade eder.	Yetersiz, Yeterli Sınırlı Deneyim, Yeterli Yüksek Deneyim
Ekip İş Birliği Kalitesi	Resmi ve gayri resmi organizasyonel yapı arasındaki uyum, güven düzeyi ve ekip üyeleri arasındaki iş birliğinin kalitesi.	Yetersiz, Verimsiz, Verimli, Çok Verimli

OPK, analiz başlangıcında çalışmanın gerçekleştirildiği koşulların tasvir edilmesi için kullanılır. Performans koşullarının bağlamsal tanımlamaları Tablo 3.1'de

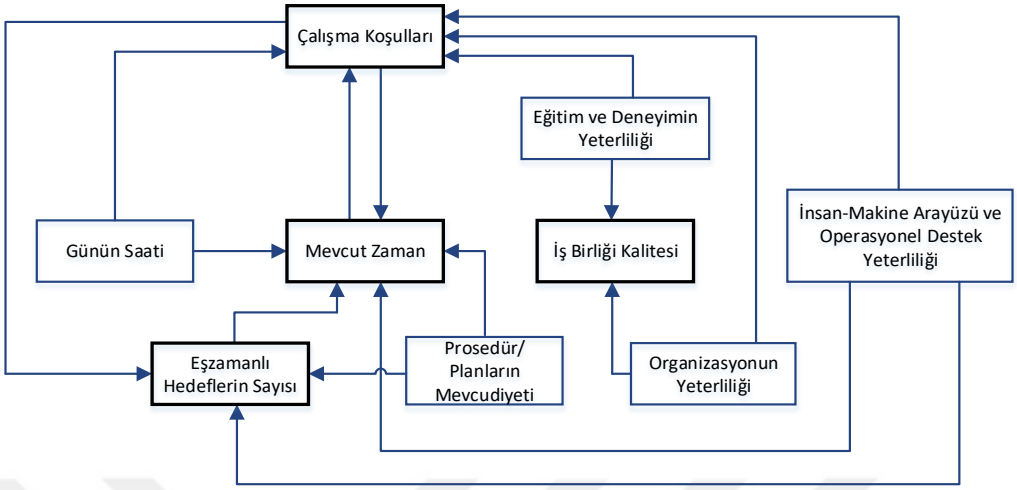
verilen tanımlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmesine karşın, bu faktörlerinin güvenilirlik analizi çerçevesinde performansa olan etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Hollnagel, İGA konusundaki deneyimine dayanarak OPK'ların farklı seviyeleri performans güvenilirliğini "geliştirici", "azaltıcı" veya performans güvenilirliğine "önemli etkisi yok" olarak sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 3.2'de görülebilir.

Tablo 3.2 OPK ve performans güvenilirliği ilişkisi (Hollnagel, 1998)

Ortak Performans Koşulları	**Tanımlayıcı**	**Performans Güvenilirliğine Etkisi**
Organizasyonun Yeterliliği	Yetersiz	Azaltıcı
	Verimsiz	Azaltıcı
	Verimli	Önemli etki yok
	Çok Verimli	Geliştirici
Çalışma Koşulları	Uyumsuz	Azaltıcı
	Uyumlu	Önemli etki yok
	Avantajlı	Geliştirici
İnsan-Makine Arayüzü ve Operasyonel Destek Yeterliliği	Uygunsuz	Azaltıcı
	Tolere edilebilir	Önemli etki yok
	Yeterli	Önemli etki yok
	Destekleyici	Geliştirici
Prosedür/Planların Mevcudiyeti	Uygunsuz	Azaltıcı
	Kabul Edilebilir	Önemli etki yok
	Uygunsuz	Geliştirici
Eşzamanlı Hedeflerin Sayısı	Daha fazlası…	Azaltıcı
	Eşleşen…	Önemli etki yok
	Daha az…	Önemli etki yok
Mevcut Zaman	Sürekli yetersiz	Azaltıcı
	Geçici yetersiz	Önemli etki yok
	Yeterli	Geliştirici
Günün Saati (Sirkadiyen Ritim)	Gece (Sirkadiyen ritimle uyumsuz)	Azaltıcı
	Gündüz (Sirkadiyen ritme uyumlu)	Önemli etki yok
Eğitim ve Deneyimin Yeterliliği	Yetersiz	Azaltıcı
	Yeterli sınırlı deneyim	Önemli etki yok
	Yeterli yüksek deneyim	Geliştirici
İş Birliği Kalitesi	Yetersiz	Azaltıcı
	Verimsiz	Önemli etki yok
	Verimli	Önemli etki yok
	Çok Verimli	Geliştirici

Bu koşullar tanımları itibarıyla birbirinden bağımsız değildir ve bazı ortak performans koşulları arasında bir bağımlılık ilişkisi mevcuttur. Ancak bu bağımlılık ilişkisi OPK'ların insan güvenilirliği açısından mantıksal değerlendirilmesi ile

tanımlanmış olup nitel bir örneklendirmeden ibarettir. CREAM kapsamında Hollnagel tarafından tanımlanan bağımlılık ilişkileri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 OPK'lar arasındaki bağımlılık ilişkisi

OPK arası bağımlılık ilişkisi, analiz sürecinde ortam koşullarının değerlendirilmesini etkilemektedir. Öyle ki, diğer OPK'lara bağımlı olan bir koşul, bağlı olduğu koşulların çoğunluğunun performans üzerindeki etkisi ile aynı yönlü olarak değerlendirilmelidir. Örneğin Şekil 3'ten görüldüğü üzere Çalışma Koşulları; Eğitim ve Deneyimin Yeterliliği, Organizasyonun Yeterliliği, İnsan-Makine Arayüzü ve Operasyonel Destek Yeterliliği, Mevcut Zaman ve Günün Saatine bağlıdır. Eğer bağlı olduğu 5 OPK'den 4'ünün performans üzerindeki etkisi arttırıcı yönde ise değerlendirici Çalışma Koşulları'na performans üzerindeki etkisini azaltıcı olarak ifade eden bir tanımlayıcı kullanamaz.

Literatürde ise bu bağımlılık ilişkilerinin kantitatif olarak belirlenmesi için farklı yönler izlendiği görülmektedir. Bu kapsamda CREAM uygulamalarında çok kriterli karar verme yöntemleri (Marseguerra vd., 2006) ya da Bayes Ağ Modeli (Yang vd., 2011b) gibi farklı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

CREAM çerçevesinde faaliyetlerin gerçekleştirildiği ortamı tanımlayan koşulların, hata modlarının ortaya çıkmasında doğrudan etkisi olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak OPK'ların hataların altında yatan sebepler ile doğrudan ilişkili olduğu mantıksal bir çıkarım olarak gözlemlenebilir. Böylece ata modlarının ortaya çıkmasına sebep olan genotipler ile OPK'lar arasında da nedensel bir ilişki kurmak mümkündür. Bir performans koşulunu kesin olarak tek bir genotip ile ilişkilendirmek mümkün olmasa da Hollnagel tarafından gerçekleştirilen nükleer

santral kapsamındaki analizinde en muhtemel OPK-Genotip ilişkileri Tablo 3.3'teki şekliyle tanımlanmıştır.

Tablo 3.3 OPK'ların genotipler ile ilişkisi

Ortak Performans Koşulları	İnsan İlişkili Genotipler	Teknoloji İlişkili Genotip	Organizasyon İlişkili Genotip
Organizasyonun Yeterliliği			✓
Çalışma Koşulları	✓	✓	✓
İnsan-Makine Arayüzü ve Operasyonel Destek Yeterliliği	✓	✓	✓
Prosedür/Planların Mevcudiyeti		✓	✓
Eşzamanlı Hedeflerin Sayısı	✓	✓	
Mevcut Zaman	✓		✓
Günün Saati (Sirkadiyen Ritim)	✓		
Eğitim ve Deneyimin Yeterliliği		✓	✓
Ekip İş Birliği Kalitesi	✓		✓

3.1.1.4 Bilişsel Faaliyet ve Fonksiyonlar

Bilişsel faaliyetler, görevlerin incelenmesinde detaylı analiz gerçekleştirebilmek için operatörün bu görevleri yerine getirmek için ihtiyaç duyduğu çeşitli bilişsel faaliyetleri ifade eder. CREAM kapsamında bu faaliyetler temel olarak Tablo 3.4'teki gibi tanımlanmıştır.

Tablo 3.4 Kritik bilişsel faaliyetlerin listesi (Hollnagel, 1998)

Bilişsel Talep	Açıklama
Koordinasyon	Bir faaliyeti tamamlamak için sistem bileşenlerinin uygun biçimde planlanması, düzenlenmesi veya eşleştirilmesi.
İletişim	Sistemin çalışması için gerekli bilgilerin sözlü, elektronik veya mekanik yöntemler ile iletilmesi veya alınması.
Karşılaştırma	İki veya daha fazla ögenin benzerlik ve farklılıklarının tanımlanması.
Tanı Koyma	Bir durumun belirtiler ve testler yardımıyla doğasının veya sebebinin teşhis edilmesi.
Değerlendirme	Yalnızca mevcut bilgiler kullanılarak gerçek veya varsayımsal değerlendirmeler gerçekleştirme.
Uygulama	Önceden belirlenmiş bir eylemi faaliyete geçirebilme.
Tanıma	Gerekli ayrıntıları araştırarak bir bileşenin durumunun betimlenmesi.
Sürdürme	Belirli bir operasyonel durumun sürdürülmesi.
İzleme	Zaman içerisinde sistem ve parametrelerinin takip edilmesi.
Gözlemleme	Belirli ölçüm değerlerinin veya sistem göstergelerinin okunması.

Tablo 3.4 Kritik bilişsel faaliyetlerin listesi (Hollnagel, 1998) (devamı)

Bilişsel Talep	Açıklama
Planlama	Bir hedefi gerçekleştirmek için gerekli eylemlerin belirlenmesi ve düzenlenmesi.
Kayıt Etme	Ölçümlerin, sistem olaylarının kayda geçirilmesi.
Düzenleme	Hedefi gerçekleştirmek için sistemin hız ve yön ayarlarının değiştirilmesi.
Tarama	Sistem ve ögeleri hakkında genel bir izlenim için bilgi kaynaklarının gözden geçirilmesi.
Doğrulama	Bir sistem durumunun veya ölçümün doğruluğunu inceleme ve test yoluyla onaylanması.

Bağlamsal Kontrol Modeli kapsamında Tablo 3.4'te belirtilen her bir bilişsel faaliyeti için hataların meydana gelmesine sebep olabilecek operatör kaynaklı eksiklikler BKM fonksiyonları olarak tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar Tablo 3.5'te görülebilir.

Tablo 3.5 BKM fonksiyonları (Hollnagel, 1998)

Bilişsel Talep	Gözlem	Yorumlama	Planlama	Uygulama
Koordinasyon			✓	✓
İletişim				✓
Karşılaştırma		✓		
Tanı Koyma		✓	✓	
Değerlendirme		✓	✓	
Uygulama				✓
Tanıma		✓		
Sürdürme			✓	✓
İzleme	✓	✓		
Gözlemleme	✓			
Planlama			✓	
Kayıt Etme		✓		✓
Düzenleme	✓			✓
Tarama	✓			
Doğrulama	✓	✓		

BKM Fonksiyonlarının yerine getirilememesi ile ortaya çıkabilecek potansiyel bilişsel hataların sınıflandırılması ve bu hataların insan hata olasılığını hesaplamak için kullanılan nominal değerler Tablo 3.6'da yer almaktadır.

Tablo 3.6 Bilişsel fonksiyonlarla ilişkili olası hatalar (Hollnagel, 1998)

BKM Fonksiyonu	Muhtemel Bilişsel Fonksiyon Hatası	Nominal Değer
Gözlem	G1. Yanlış nesnenin gözlemlenmesi	0,001
	G2. Tanımlama hatası	0,07
	G3. Gözlem eksikliği	0,07
Yorumlama	Y1. Yanlış tanı koyma	0,2
	Y2. Hatalı karar verme	0,01
	Y3. Yorumlamanın gecikmesi	0,01
Planlama	P1. Önceliklerin hatalı belirlenmesi	0,01
	P2. Planlamanın yetersiz olması	0,01
Uygulama	U1. Uygulamanın hatalı yapılması	0,003
	U2. Uygulamanın yanlış zamanda yapılması	0,003
	U3. Uygulamanın yanlış nesneye yapılması	0,0005
	U4. Uygulamada sıra hatasının yapılması	0,003
	U5. Eylemlerin gerçekleştirilmemesi	0,03

Bilişsel faaliyetlere dair detaylar, hataların neden meydana geldiğine dair genişletilmiş CREAM ile gerçekleştirilen detaylı uygulamalarda kullanılmaktadır.

3.1.2 CREAM Uygulama Adımları

CREAM iki temel aşamadan oluşmaktadır. Temel CREAM, insan güvenilirliğini etkileyen koşulları değerlendirmek ve bağlamsal kontrol modelini belirlemek ve hata olasılıklarına dair bir aralık tahmininde bulunmak için hızlı bir tarama görevi üstlenir. Genişletilmiş CREAM, temel analizin ardından hata ihtimalinin daha yüksek bulunduğu durumlar için hata olasılığının ve hataya sebep olabilecek faktörlerin derinlemesine analiz edilmesi için uygulanır. CREAM aşamalarına dair girdi ve çıktıların karşılaştırılması Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 CREAM aşamalarının karşılaştırması

	Girdi	Çıktı
Temel CREAM	• Görev analizi ve olay sıralaması • OPK listesi ve değerlendirme kriterleri • OPK'ların birbiri ile ilişkileri • Kontrol Modları ve Hata Olasılık Aralıkları	• Görevlerin kontrol modunun belirlenmesi • Hata olasılıklarının aralık olarak ifade edilmesi
Genişletilmiş CREAM	• Temel CREAM'in uygulanmış • Bilişsel faaliyetler ve talepler • Bilişsel fonksiyonların olası hataları ve sayısal değerleri • OPK ve Bilişsel Fonksiyonların İlişkisi	• Hata olasılıklarının nicel değerlerinin hesaplanması

Bu bölümde temel ve genişletilmiş CREAM yönteminin uygulanması için gerekli adımlar verilmiştir.

3.1.2.1 Temel CREAM

İnsan hata olasılığının Bağlamsal Kontrol Modeli'ne göre sınıflandırılması için uygulanan temel CREAM adımları aşağıdaki gibidir (Hollnagel, 1998):

Adım 1: CREAM kapsamında incelenecek olan faaliyet, sistematik olarak analiz edilir. Buna göre yapılması gereken faaliyet adımları kronolojik olarak sıralanır, varsa faaliyetler arasındaki hiyerarşi belirlenir ve sistem ögeleri arasındaki etkileşimler tanımlanır.

Adım 2: Bu adımda incelenen faaliyetin gerçekleştirildiği ortamın tanımlanması için OPK'lar, ve OPK'lara ait Tablo 3.1'de verilen tanımlayıcılar kullanılır. Bu aşama Adım 1'de belirlenen her bir faaliyet adımı için tekrar edilir. Mevcut ortamın doğru biçimde tanımlanabilmesi için analizi gerçekleştiren uzmanın bilgi birikimi ve deneyimi önemli bir noktadır. OPK'lar değerlendirilirken, Bölüm 3.1.1.3'te bahsedilen OPK'lar arası bağımlılık ilişkileri dikkate alınmalıdır.

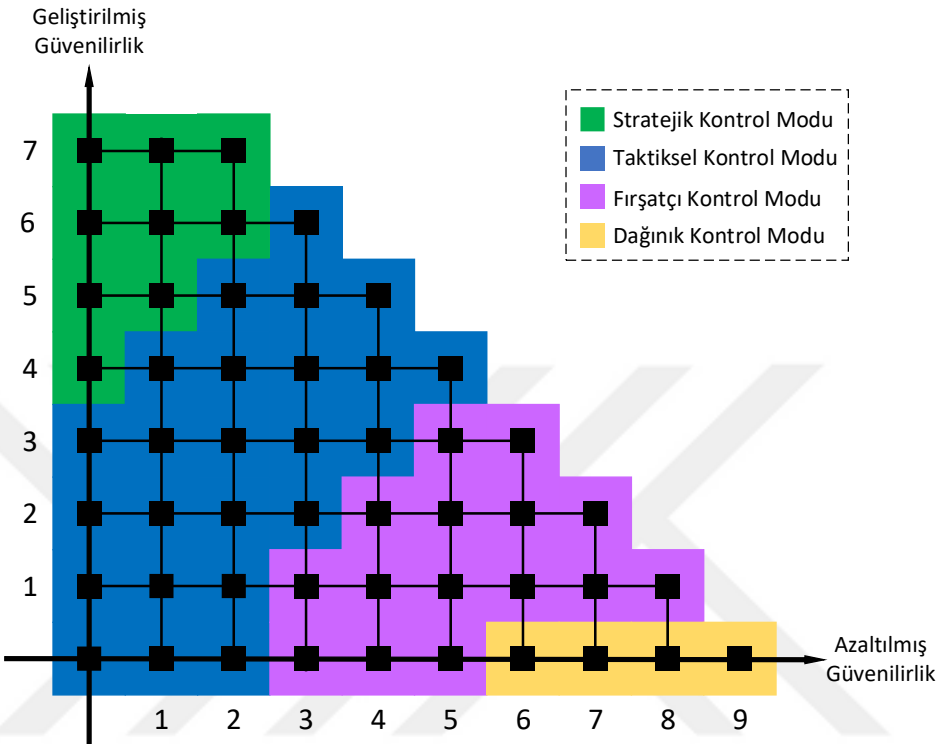
Adım 3: Bir önceki adımda çalışma ortamını çevresel, teknolojik ve örgütsel açıdan değerlendiren OPK tanımlayıcıları belirlendikten sonra bu değerlendirmelerin insan performansına etkisi Tablo 3.2 kullanılarak tespit edilir.

Adım 4: Analiz edilen her bir faaliyet için Adım 2 ve 3'ün gerçekleştirilmesinin ardından bu faaliyetler için birleşik OPK skoru hesaplanır. Birleşik OPK skoru Adım 3'te belirlenen performans etkilerinin üçlü gösterimini ifade eder, bu gösterim Denklem (3.1)'de görüldüğü gibidir.

$$[A, O, G];\ (A + O + G = 9) \tag{3.1}$$

burada incelenen bir faaliyet için ortak performans koşullarından A toplam performans azaltıcı koşul sayısını; O, toplam önemli etkisi olmayan koşul sayısını ve G toplam performans geliştirici koşul sayısını ifade eder. Toplamda 9 OPK bulunduğundan A, O ve G sayılarının toplamı, bu değere eşit olmalıdır.

Adım 5: Bu aşamada birleşik OPK puanı kullanılarak her bir faaliyetin hangi kontrol moduna ait olduğu tespit edilir. Şekil 3.4 kullanılarak A değeri X ekseninde ve G değeri Y eksenine yerleştirilir, incelenen faaliyet için kontrol modu iki değerin kesiştiği noktanın bulunduğu alan olarak belirlenir.



Şekil 3.4 Temel CREAM ile kontrol modunun belirlenmesi (Hollnagel, 1998)

Adım 6: Belirlenen kontrol moduna bağlı olarak incelenen faaliyet için insan hatası meydana gelme olasılığı bir aralık olarak ifade edilir. Bu aralık değerler Tablo 3.8 kullanılarak belirlenir.

Tablo 3.8 Kontrol moduna bağlı hata olasılık aralığı

Kontrol Modu	Alt Olasılık Değeri	Üst Olasılık Değeri
Stratejik	0,00005	0,01
Taktiksel	0,001	0,1
Fırsatçı	0,01	0,5
Karmaşık	0,1	1,0

3.1.2.2 Genişletilmiş CREAM

Temel CREAM adımlarının uygulanmasının ardından hata riskinin yüksek olduğu kontrol modları için daha detaylı analiz yaparak hataların meydana gelmesindeki temel sebeplerin araştırılması amacıyla Genişletilmiş CREAM uygulanır. Bu bölümde Genişletilmiş CREAM adımlarına yer verilmiştir.

Adım 1: İncelenen faaliyetlerinin detaylı olarak tanımlanabilmesi için incelenen görevin her bir adımı için operatörün ihtiyaç duyduğu bilişsel talep belirlenir. Analiz edilen görevin her bir adımı için ağırlıklı olarak kullanılan talep belirlenir ve her bir adım için yalnızca bir bilişsel talep atanır. Eğer bir adım iki ya da daha fazla fonksiyon ile eşleşiyor ise mevcut adım detaylandırılarak tek bir bilişsel fonksiyon atanana kadar alt adımlar belirlenir. Bu işlem bilişsel talep profili oluşturmak olarak isimlendirilir. Bilişsel talep profili ile faaliyetin gerektirdiği bilişsel taleplerin karşılanma durumu ve karşılanamıyorsa çevresel koşullar ile mi ilgili olduğu incelenir. Bilişsel faaliyetler Tablo 3.4'te görülebilir.

Adım 2: Bilişsel talep profilinde bulunduğu tespit edilen bilişsel faaliyetlerin her biri için bu faaliyetler sırasında ortaya çıkabilecek hata modları Tablo 3.5 kullanılarak belirlenir. İncelenen faaliyetin tüm adımlarında BKM fonksiyonlarına kaç kez rastlandığı tespit edilir ve kümülatif olarak toplanır. Bu aşamada incelenen faaliyete ilişkin BKM fonksiyonlarının dağılımını bir histogramda göstermek analiz için faydalı olabilir.

Adım 3: Bir önceki adımda incelenen görevin yerine getirilmesi için gerekli olan BKM fonksiyonları incelenmişti. Bu adımda ise her bir adım için bu fonksiyonlara dair baskın hata türü incelenecektir. Burada amaç fonksiyonlardan hataya aşamalı ve sistematik bir geçiş sağlayarak hata olasılığının hesaplanması için gerekli bilgileri hazırlamaktır.

Bilişsel fonksiyonların gerçekleştirilmesi sırasında meydana gelebilecek hatalar Tablo 3.6'da verilmiştir. Bu adımda, incelenen görevin her bir adımında gerçekleştirilen bilişsel faaliyetler için mevcut OPK göz önünde bulundurularak uygun hata modlarında bulunan ve ortaya çıkma ihtimali en yüksek hatalar tespit edilmelidir.

Adım 4: Elde edilen tüm veriler doğrultusunda hata olasılığının hesaplanmak için öncelikle Tablo 6'da verilen bilişsel fonksiyon hatalarına ait nominal değerlerinin OPK seviyelerine göre düzeltilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda Temel CREAM'in 2. Adımında tanımlanan OPK seviyelerine karşılık gelen ağırlıklandırma faktörleri Tablo 3.9'dan tespit

edilir. Her bir adım için dokuz OPK'nin ağırlıklandırma faktörleri toplamı kümülatif ağırlık faktörünü oluşturur. Kümülatif ağırlıklandırma faktörü ile Tablo 3.6'daki nominal değerlerin çarpımı her bir adımın bilişsel hata olasılığını verir.

Tablo 3.9 OPK'lara göre Ağırlıklandırma Faktörleri (Hollnagel, 1998)

Ortak Performans Koşulları	Tanımlayıcı	Gözlem	Yorumlama	Planlama	Uygulama
Organizasyonun Yeterliliği	Yetersiz	1,0	1	2	2
	Verimsiz	1	1	1,2	1,2
	Verimli	1	1	1	1
	Çok Verimli	1	1	0,8	0,8
Çalışma Koşulları	Uyumsuz	2	2	1	2
	Uyumlu	1	1	1	1
	Avantajlı	0,8	0,8	1	0,8
İnsan-Makine Arayüzü ve Operasyonel Destek Yeterliliği	Uygunsuz	5	1	1	5
	Tolere edilebilir	1	1	1	1
	Yeterli	1	1	1	1
	Destekleyici	0,5	1	1	0,5
Prosedür/Planların Mevcudiyeti	Uygunsuz	2	1	5	2
	Kabul Edilebilir	1	1	1	1
	Uygunsuz	0,8	1	0,5	0,8
Eşzamanlı Hedeflerin Sayısı	Daha fazlası…	2	2	5	2
	Eşleşen…	1	1	1	1
	Daha az…	1	1	1	1
Mevcut Zaman	Sürekli yetersiz	5	5	5	5
	Geçici yetersiz	1	1	1	1
	Yeterli	0,5	0,5	0,5	0,5
Günün Saati (Sirkadiyen Ritim)	Gece (Sirkadiyen ritimle uyumsuz)	1,2	1,2	1,2	1,2
	Gündüz (Sirkadiyen ritme uyumlu)	1	1	1	1
Eğitim ve Deneyimin Yeterliliği	Yetersiz	2	5	5	2
	Yeterli sınırlı deneyim	1	1	1	1
	Yeterli yüksek deneyim	0,8	0,5	0,5	0,8
İş Birliği Kalitesi	Yetersiz	2	2	2	5
	Verimsiz	1	1	1	1
	Verimli	1	1	1	1
	Çok Verimli	0,5	0,5	0,5	0,5

Adım 5: Bir İGA yöntemi CREAM'in nihai çıktısı olarak incelenen faaliyet için hata olasılığının hesaplanmalıdır. Bunun için incelenen görev adımlarına ait düzeltilmiş değerlerin tek bir olasılık değeri olarak birleştirilmesi gerekmektedir. Herhangi bir faaliyetin hata ile sonuçlanması için faaliyetin içerisindeki herhangi bir adımda hata bulunması yeterli olduğu için incelenen faaliyetin genel hata olasılığı Adım 4'te her bir faaliyet adımı için hesaplanan bilişsel hata olasılık değerlerinin en büyüğü olarak tanımlanır.

3.2 Bulanık Küme Teorisi

Belirsizlik, bir olayın veya sistemin gerçek durumunun belirlenmesine ilişkin sınırlamalardır. Bu sınırlamalar sistemdeki değişkenliğin ve/veya gözlem ve bilgi eksikliğinin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir (Akhtar vd., 2024). Gerçek hayat problemleri, kesin değerlerle ifade edilen matematiksel modellerin aksine, belirsizlik ve muğlaklığa neden olabilecek çok sayıda unsur içermektedir. Bu durum, karmaşık gerçek dünya senaryolarının klasik mantık ile modellenmesi sırasında modelin detay seviyesi ve doğruluk açısından yetersiz kalmasına neden olabilmektedir.

Belirsizliğin modellerde temsil edilmesi, oluşturulan modellerin doğruluk düzeyinin artırılması, risk değerlendirmesinin daha güvenilir hâle getirilmesi ve karar verme süreçlerinin iyileştirilmesi açısından kritik bir süreçtir. Risk değerlendirmesi, uzman görüşünü temel alan bir süreç olup sistemdeki detayların ve belirsizliklerin olabildiğince detaylı analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Zadeh tarafından önerilen bulanık mantık, katı ikili değerlendirmeler yerine doğruluk derecelerini mümkün kıldığından, belirsizliği temsil etmek için sağlam bir yaklaşımdır (Zadeh, 1965). Benzer şekilde yapay zekâ, örüntüleri tanıma ve kısmi verileri genelleştirme yeteneğine sahiptir; dolayısıyla sınırlı verilerle bile geniş kapsamlı çıkarımların yapılmasına olanak sağlar (Han vd., 2022).

Bir bulanık sayı, gerçek sayı kümesi elemanının yanı sıra bu elemanın ilgili kümeye ait olma derecesini gösteren üyelik derecesi $\mu\epsilon[0,1]$ ile temsil edilir. Bulanık sayıların genel gösterimi Denklem (3.2)'de görülebilir (Chan & Kumar, 2007) .

$$\tilde{A} = \left\{\left(x, \mu_{\tilde{A}}(x)\right)\middle| x\epsilon R, \mu\epsilon[0,1]\right\}, \tag{3.2}$$

Üçgensel bulanık sayılar (ÜBS), Denklem (3.3)'teki koşulları sağlaması şartıyla $\tilde{B} = (a, b, c)$ olarak gösterilmektedir.

$$\mu_{\tilde{B}}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, & x\epsilon[a,b] \\ \dfrac{c-x}{c-b}, & x\epsilon[b,c] \\ 0, & diğer\ durumlar \end{cases} \tag{3.3}$$

3.3 Bulanık DEMATEL Yaklaşımı

Karar verme deneme ve değerlendirme laboratuvarı veya DEMATEL, karmaşık sistemlerin ögeleri arasındaki bağımlılık ilişkilerini tespit ederek sistemin yapısal ilişki modelinin kurulması için geliştirilmiş bir yöntemdir (Si vd., 2018). DEMATEL, uzman görüşüne dayanan ikili karşılaştırmalar ile kriterlerin birbirleri üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemidir. İlk olarak 1974 yılında Battelle Memorial Enstitüsü çalışmaları kapsamında Gabus ve Fontela tarafından ortaya koyulan DEMATEL, sistemdeki bağımlılık ilişkilerinin sebep-sonuç ilişkilerinin kurulmasında kullanılır ve bir eşik değerini referans alarak belirli bir seviyenin üzerindeki ilişkilerin modellenmesine olanak tanır (Fontela & Gabus, 1974). Kriterlerin arasındaki etkileşimlerin analiz edilmesi sayesinde sistem üzerindeki etkisi en büyük olan faktörler tespit edilebilir. Bu sebeple DEMATEL tedarikçi seçimi (Chang vd., 2011), denizcilik için risk değerlendirmesi (Mentes vd., 2015), yatırımların önceliklendirilmesi (Karaşan & Kahraman, 2021) gibi çok sayıda gerçek dünya probleminin incelenmesinde kullanılmıştır.

Yöntemin uygulanması sonucu sebep sonuç ilişkilerinin görsel olarak ifade edildiği Etki-İlişki Haritası ortaya çıkar. Böylece sistemdeki neden ve sonuç ilişkileri görselleştirilerek net bir şekilde ifade edilebilir (Apaydın & Aladağ, 2022). Bu bağlamda ilişkilerin belirlenmesinde kullanılan eşik değer, sistemdeki ilişkilerin modellenmesi aşamasındaki detay seviyesini belirlemektedir.

Gerçek senaryoların matematiksel uygulamalarında gerçekleşen bilgi kaybı ve uzman görüşlerinden doğan belirsizliğin oluşturulacak yapısal modele tam olarak yansıtılabilmesi ve belirsizliklerin ortadan kaldırılması için DEMATEL modeline bulanık mantık entegre edilerek dilsel değişkenler bulanık sayılar ile ifade edilmiştir (Si vd., 2018). Bulanık DEMATEL, kriterler arasındaki ilişkilerin bulanık tasvir edilmesi sayesinde sistem ögeleri arasındaki ilişkilerin daha gerçekçi ve esnek modellenmesine imkân sunar (Chang vd., 2011).

Bulanık DEMATEL kapsamında kullanılacak bulanık kümeler, modellenen sistemin karmaşıklık seviyesine göre belirlenir. Bu çalışmada DEMATEL yöntemine bulanık üçgensel sayılar entegre edildiği bir metodoloji izlenmiştir.

Bulanık DEMATEL yönteminin uygulama adımları aşağıda görülebilir (Chang vd., 2011):

Adım 1: Problemin tanımlanması.

Bulanık DEMATEL uygulamasının ilk aşaması olarak karar verme probleminin amacı, değerlendirmede kullanılacak kriterler ve karşılaştırmada kullanılacak dilsel ölçekler belirlenir.

Adım 2: Doğrudan İlişki Matrisinin (T) oluşturulması.

Uzmanlar tarafından dilsel değişkenler ile kriterler arası gerçekleştirilen ikili karşılaştırmalar, Adım 1'de oluşturulan ölçek kullanılarak bulanık üçgensel sayı karşılıklarına dönüştürülür. Karar verme problemi için n adet kriter ($n = 1,2, \dots, i$) ve K karar vericinin bulunduğu varsayılırsa, karar verici k'nin $(k = 1,2,3 \dots, K)$ i'inci kriterin $(i = 1,2,3 \dots, n)$, j'inci kriter $(j = 1,2,3 \dots, n)$ ile ikili karşılaştırması Denklem (3.4)'teki gibi temsil edilir.

$$x_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k), \tag{3.4}$$

Buna göre karar verici k'ye ait doğrudan karşılaştırma matrisinin temsili Denklem (3.5)'teki gibi gerçekleştirilir.

$$T^k = \begin{pmatrix} x_{11}^k & x_{12}^k & \cdots & x_{1n}^k \\ x_{21}^k & x_{22}^k & & x_{2n}^k \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^k & x_{n2}^k & \cdots & x_{nn}^k \end{pmatrix} = \left[x_{ij}^k\right]_{n\times n}. \tag{3.5}$$

Adım 3: Başlangıç-Doğrudan İlişki Matrisinin (F) oluşturulması.

Bulanık Başlangıç-Doğrudan İlişki Matrisi, durulaştırılmış değerlerden oluşur. Bu sebeple karar vericilerin ikili değerlendirmelerini gösteren T matrisinin durulaştırılması için aşağıda verilen işlemler uygulanır.

Öncelikle değerlendirmelerin karşılaştırılabilir ve ölçeksiz hala getirilmesi için normalize edilmesi, gerekmektedir. Bunun için üçgensel bulanık sayıların alt, orta ve üst değerleri için sırasıyla Denklem (3.6)-(3.8) uygulanır.

$$xa_{ij}^k = (a_{ij}^k - mina_{ij}^k)/(maxc_{ij}^k - mina_{ij}^k), \tag{3.6}$$

$$xb_{ij}^k = (b_{ij}^k - mina_{ij}^k)/(maxc_{ij}^k - mina_{ij}^k), \tag{3.7}$$

$$xc_{ij}^{k} = (c_{ij}^{k} - mina_{ij}^{k})/(maxc_{ij}^{k} - mina_{ij}^{k}), \tag{3.8}$$

Burada xa_{ij}^{k}, xb_{ij}^{k}, xc_{ij}^{k}, normalize edilmiş bulanık alt, üst ve orta değerleri temsil etmektedir. Elde edilen değerler yardımıyla sol (xas_{ij}^{k}) ve sağ $\left(xcs_{ij}^{k}\right)$ normalize değerler Denklem (3.9) ve (3.10) ile hesaplanır.

$$xas_{ij}^{k} = \frac{xb_{ij}^{k}}{1 + xb_{ij}^{k} - xa_{ij}^{k}}, \tag{3.9}$$

$$xcs_{ij}^{k} = \frac{xc_{ij}^{k}}{1 + xc_{ij}^{k} - xb_{ij}^{k}}, \tag{3.10}$$

Normalize sol ve sağ değerlerin birleştirilmesi ile durulaştırılmış toplam normalize değerler (x_{ij}^{k}) Denklem (3.11) ile bulunur.

$$x_{j}^{k} = \frac{\left[xas_{ij}^{k} \times \left(1 - xas_{ij}^{k}\right) + \left(xcs_{ij}^{k}\right)^{2}\right]}{\left[1 - xas_{ij}^{k} + xcs_{ij}^{k}\right]}, \tag{3.11}$$

Bulanık Başlangıç-Doğrudan İlişki Matrisini oluşturmak için durulaştırılmış normalize değerlerin ölçeklendirilmesi ve nihai durulaştırılmış değerlerin elde edilmesi için Denklem (3.12) kullanılır.

$$F_{ij}^{k} = mina_{ij}^{k} + x_{ij}^{k} \times \left(maxc_{ij}^{k} - mina_{ij}^{k}\right), \tag{3.12}$$

Karar verici k için elde edilen başlangıç doğrudan ilişki matrisi (F^{k}), Denklem (3.13)'teki gibi elde edilmektedir.

$$F^{k} = \begin{pmatrix} f_{11}^{k} & f_{12}^{k} & \cdots & f_{1n}^{k} \\ f_{21}^{k} & f_{22}^{k} & & f_{2n}^{k} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ f_{n1}^{k} & f_{n2}^{k} & \cdots & f_{nn}^{k} \end{pmatrix}, \tag{3.13}$$

Eğer birden fazla uzman değerlendirmeye katılmış ise $(K > 1)$, Denklem (3.14) kullanılarak tüm uzmanların değerlendirmesin bir ortalaması alınır.

$$F_{ij} = \frac{1}{K\left(F_{ij}^{1}, F_{ij}^{2}, \ldots, F_{ij}^{K}\right)}, \tag{3.14}$$

Elde edilen birleştirilmiş başlangıç doğrudan ilişki matrisi (F), Denklem (3.15)'teki gibi elde edilmektedir.

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & & f_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{pmatrix} = \left[f_{ij}\right]_{n\times n}. \quad (3.15)$$

Adım 4: Normalleştirilmiş Doğrudan Başlangıç İlişki Matrisinin (D) oluşturulması.

Normalleştirilmiş Doğrudan Başlangıç İlişki Matrisi, Başlangıç-Doğrudan İlişki Matrisi ile normalizasyon faktörünün çarpımı ile bulunur. Bu işlem, Denklem (3.16)'da görülebilir.

$$D = K \cdot F, \quad (3.16)$$

Normalizasyon faktörü (K), Denklem (3.17) ile hesaplanır.

$$K = \frac{1}{\underset{1 \le i \le n}{max} \sum_{j=1}^{k} f_{ij}}, \quad (3.17)$$

Normalleştirilmiş İlk Doğrudan İlişki Matrisi (D), Denklem (3.18)'deki gibi elde edilmektedir.

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & & d_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix} = \left[d_{ij}\right]_{n\times n}. \quad (3.18)$$

Adım 5: Toplam İlişki Matrisinin (M) oluşturulması.

Toplam İlişki Matrisi, Denklem (3.19) kullanılarak oluşturulur.

$$M = D \cdot (I - D)^{-1}, \quad (3.19)$$

Burada I, birim matrisi temsil eder.

Toplam İlişki Matrisi (M), Denklem (3.20)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & & m_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{pmatrix} = \left[m_{ij}\right]_{n\times n}, \quad (3.20)$$

Eşik değeri (θ), Toplam ilişki matrisi değerlerinin ortalamasının alınması ile bulunur ve Denklem (3.21)'de görüldüğü üzere hesaplanır (Kaya & Karaşan, 2020). Toplam ilişki matrisinde, eşik değerinin altında kalan $i - j$ kriter çiftleri arasında bir ilişki bulunmamaktadır.

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} m_{ij}}{n^2}. \quad (3.21)$$

Adım 6: Satır ve sütun toplamlarının hesaplanması.

Neden-sonuç ilişkilerinin belirlenebilmesi için T matrisinin satır (R) ve sütun (C) toplamlarının hesaplanması gerekmektedir. R ve C değerleri sırasıyla Denklem (3.22) ve (3.23) ile hesaplanır.

$$R = [r_i]_{n\times 1} = \left[\sum_{i=1}^{n} m_{ij}\right]_{n\times 1}, \quad (3.22)$$

$$C = [c_i]_{n\times 1} = \left[\sum_{j=1}^{n} m_{ij}\right]_{n\times 1}. \quad (3.23)$$

Adım 7: Etki-İlişki Haritasının oluşturulması.

Etki-İlişki Haritasının oluşturulması için ilk olarak her bir kriter için $R + C$ ve $R - C$ değerleri hesaplanır. Bu diyagram, faktörlerin birbiri üzerindeki etkilerini ve bu etkilerin önem derecesini bulmak için kullanılır (Kaya & Karaşan, 2020). $R + C$ kriterlerin sistem içerisindeki göreli önem derecesini ifade ederken $R - C$ kriterin sistemin tamamına gösterdiği net etkiyi temsil eder (Desbalo vd., 2023). Buna değerlere göre kriterlerin sebep sonuç ilişkisi belirlenir.

3.4 Bulanık Bilişsel Haritalama

Bilişsel Haritalama (BH), karmaşık sistemlerin nasıl çalıştığını ifade etmek için sistem içerisindeki ögelerin ve bu ögelerin arasında bulunan nedensel ilişkilerin temsil edilmesi için kullanılan bir araçtır (Özesmi & Özesmi, 2004). Tolman tarafından önerilen BH, ögeler arasındaki nedensel ilişkileri yönlü bir şema olarak temsil eder (Tolman, 1948). Bu ilişkiler, uzmanlar tarafından belirlenen göreli gücü etkinin yönünü ve şiddetini ifade edecek [-1,1] aralığında bir değer ile ifade edilir.

Kosko, BH'yı nedensel ilişkileri farklı derecelerde temsil etmek üzere bulanık mantık ile genişletmiştir (Kosko, 1986). Bulanık bilişsel haritalama (BBH), belirsizlik ve eksik bilginin bulunduğu durumlarda sistem ögelerin ve bu ögelerin arasında bulunan nedensel ilişkilerin bilgi kaybını en küçükleyecek biçimde temsil edilmesi için sabit bir sonuç elde edilene kadar etkileri yinelemeli olarak değerlendirerek temsil eder.

Sistemde bulunan n adet eleman için ($n = 1,2, \dots, i$) BBH algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir (İlbahar vd., 2022; Kosko, 1986):

Adım 1: Dilsel ölçeğin geliştirilmesi.

Nedensel ilişki derecelerinin büyüklük ve yönünü tayin edebilmek için kullanılacak dilsel ölçek ve bulanık sayı karşılıkları tanımlanır. Burada tanımlanacak ölçek değerleri [-1,1] arasında yer almalıdır. Pozitif değer, i'inci elemanın ($i = 1,2,3 \dots, n$), j'inci eleman ($j = 1,2,3 \dots, n$) üzerinde arttırıcı etkisi olduğunu tanımlarken negatif değerler i'inci elemanın, j'inci eleman üzerinde azaltıcı etkisi olduğunu ifade eder. Etki değerinin 0 olması ise iki sistem elemanı arasında herhangi bir etki bulunmadığını gösterir.

Adım 2: İlişki Matrisinin (E) oluşturulması.

Uzman görüşü ile dilsel ölçek kullanılarak ögeler arasındaki ilişkiler Adım 1'de tanımlanan ölçek kullanılarak değerlendirilir ve bu değerlendirmeler bulanık sayı karşılıklarına dönüştürülerek ilişki matrisinin (E) oluşturulur. İlişki matrisi E, Denklem (3.24) kullanılarak ifade edilir.

$$E = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & & e_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{pmatrix} = \left[e_{ij}\right]_{n \times n}. \tag{3.24}$$

Burada e_{ij}, i'inci kriterin j'inci kriter üzerindeki etkisini göstermektedir.

Adım 3: Başlangıç Vektörünün (s_j^0) oluşturulması.

Başlangıç durumunda sistemdeki elementlerin durumunu gösteren $1xn$ boyutunda s_j^0 vektörü oluşturulur. Bu vektör, başlangıç durumunda elementlerin aktifliğini veya önemini belirtir.

Adım 4: Yakınsama fonksiyonunun tanımlanması.

Kararlı duruma ulaşılması için iterasyonlarda kullanılacak fonksiyon bu adımda tanımlanır. BBH için genellikle Denklem (3.25)'te gösterilen Sigmoid Fonksiyonu kullanılır.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-0.5x}}. \tag{3.25}$$

Sigmoid Fonksiyonu, [0,1] aralığında çıktı üretir ve yineleme sonuçlarının normalize edilmesi için kullanılır.

Adım 5: Yineleme döngüsünün oluşturulması.

Sistem elemanlarının ağırlıklarının hesaplanması için yineleme sayısı $t, (t = 1,2,3 \dots, k)$ boyunca başlangıç vektörü etki matrisi ve aktivasyon fonksiyonu yardımıyla güncellenerek sistem içerisinde elemanlara gerçekleştirilen toplam etki hesaplanır. Bunun için Denklem (3.26) ve (3.27) iteratif olarak uygulanır.

Sistem elemanlarının diğer elemanlar tarafından ne ölçüde etkilendiğini ortaya çıkarmak için Etki hesabı Denklem (3.26)'daki gibi hesaplanır.

$$x^{(t+1)} = s_i^{(t)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{n} s_j^{(t)} e_{ji}^{(t)}, \tag{3.26}$$

Burada $s^{(t)}, t$'inci iterasyonda $(t = 1,2,3 \dots, k)$ başlangıç vektörünün güncellenmiş halidir ve elemanının sistem üzerindeki toplam etkisini temsil eder, $x^{(t+1)}$, $t+1$'inci iterasyonda sistem elemanına diğer elemanların etkisini temsil eder. Etki değerleri, Adım 4'te tanımlanan yakınsama fonksiyonu kullanılarak [0,1] aralığında bir değere dönüştürülür. Bu işlem Denklem (3.27)'de ifade edilmektedir.

$$s_i^{(t+1)} = f\left(x^{(t+1)}\right) = f\left(s_i^{(t)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{n} s_j^{(t)} e_{ji}^{(t)} \right). \tag{3.27}$$

İterasyon $s_i^{(t+1)} \approx s_i^{(t)}$ koşulu sağlanana kadar denk tekrar edilir. Bunun için bir eşik değeri (ε) belirlenir, $\left| s_i^{(t+1)} - s_i^{(t)} \right| < \varepsilon$ olduğu durumda yineleme durdurulur.

Adım 6: Sistem elemanlarının önceliklendirilmesi.

Yakınsanan $s_i^{(k)}$değerleri sistem elemanlarının sistem üzerindeki etkisini temsil eder ve elemanların küresel ağırlığı olarak kabul edilir. Bu ağırlık değerleri sistem elemanlarının önceliklendirilmesi için kullanılır.

3.5 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) insan beyninin biyolojik bilgi işleme mekanizmasının, ağırlıklı bağlantılara sahip birbirine bağlı yapay nöronlar taklit etmeyi amaçlayan, bilgi aktarımını ve uyarlanabilir öğrenmeyi sağlayan matematiksel modellerdir (Galimberti & Repetto, 2023). Bu modeller konveks olmayan amaç fonksiyonlarına sahip problemlerde görüntü tanıma, sınıflandırma, tahmin ve optimizasyon gibi karmaşık görevler için kullanılabilir (Bishop, 2007). Yapay sinir ağları, yüksek işleme kapasitesi ile birçok probleme uyarlanabilir, anlamlı sonuçlar üretmek için karmaşık veri kümelerini işlemek için esnek ve etkili bir araçtır.

Çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), denetimli öğrenme kapsamında ileri beslemeli ve geri yayılımlı YSA modelidir. ÇKA, giriş katmanı, gizli katman(lar) ve çıkış katmanı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Girdi katmanı modele verinin aktarımını gerçekleştirir, gizli katmanlar ağırlık matrisleri ve aktivasyon fonksiyonları ile verileri ayrıştırılabilir özelliklerine ayırır, çıktı katmanı ise gizli katmanlarda tanınan özelliklere göre veriyi ilgili hedefe dönüştürür. Giriş katmanından çıkış katmanı yönünde her aşamada aktivasyon fonksiyonları ve ağırlıklı toplamlar kullanılarak ağırlık güncellemeleri yapılır, bu sebeple ÇKA ileri beslemeli bir YSA modeli olarak anılır. Ardından modeli gerçekleştirdiği tahmin ile gerçek veri arasındaki hata hesaplanır ve hatanın geri yayılımı yoluyla ağırlıklar güncellenir (Pal & Mitra, 1992). ÇKA ile verilerdeki karmaşık örüntüleri temsil etmek için Lojistik Sigmoid, Tanh ve ReLu gibi çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılabilir. Çıktı katmanında regresyon için çeşitli fonksiyonlar kullanılabilirken binary sınıflandırma için çıkış katmanında Lojistik Sigmoid, çok sınıflı problemlerde Softmax fonksiyonu kullanılır (Bishop, 2007).

ÇKA modelinin uygulama adımları aşağıdaki gibidir (Bishop, 2007):

Adım 1: Modelin Oluşturulması

ÇKA'nın uygulanabilmesi için ilk aşamada probleme ait girdi veri setinin $(X = [x_1, x_2, \dots, x_n], n = 1,2,3, \dots, N)$ ve ilk ağırlık vektörünün (w)

tanımlanması; kullanılacak gizli katman sayısı, bu katmanlarda bulunacak nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve öğrenme oranı gibi parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada modelin doğru parametreler ile kurgulanması, modelin genel başarısı üzerinde kritik öneme sahiptir.

Adım 2: İleri Yayılım

Giriş katmanı ile modele girişi gerçekleştirilen veri seti, aktivasyon fonksiyonu yardımıyla diğer katmanlar boyunca ilerletilir. Bunun için öncelikle bir nörona gelen toplam ağırlıklı giriş değeri hesaplanmalıdır. Denklem (3.28), h-1 katmanındaki i nöronundan h $(h = 1,2,3, \dots, L)$ katmanındaki j nöronuna gelen toplam giriş değerini hesaplamak için kullanılır. Nöronların aktifleşmesi için ağırlıklı toplamın eşik değerinden yüksek olması gerekmektedir.

$$a_j^h = \sum_{i=1}^{D_{h-1}} w_{ji}^{(h)} z_i^{(h-1)} + \theta_j^{(h)}, \tag{3.28}$$

Burada a_j^h, h'ıncı katmandaki j'inci nörona ait net girdiyi; $w_{ji}^{(h)}$, $h-1$'inci katmanda bulunan i nöronu ile h katmanındaki j nöronu arasındaki bağlantının ağırlık değerini; $z_i^{(h-1)}$ bir önceki katmanın i'inci birim çıktısını; D_{h-1}, $h-1$'inci katmandaki birim sayısını $\theta_j^{(h)}$ ilgili katmandaki bias değerini, temsil eder.

h katmanının çıktısı z_j, Denklem (3.29) ile hesaplanır. Burada $\varphi(.)$, ilgili gizli katmanın aktivasyon fonksiyonunu, z_j h katmandaki j'inci nöronun çıkış değerini temsil eder.

$$z_j = \varphi(a_j), \tag{3.29}$$

Girdi katmanı haricindeki nöronların çıktısı, nörona gelen toplam ağırlıklı giriş değerlerine aktivasyon fonksiyonlarının uygulanması ile hesaplanır. Aktivasyon fonksiyonları modele doğrusal olmayan ilişkileri tanıtarak karmaşık problemlerin modellenmesine yardımcı olur. Literatürde en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonunun Lojistik Sigmoid olduğu görülmektedir. Ancak Lojistik Sigmoid fonksiyonunun yanı sıra Tanh,

ReLu ve SoftMax gibi farklı fonksiyonları da bu aşamada kullanılabilir (Bouraya & Belangour, 2024).

Ağ modelinin nihai çıktısı Denklem (3.30)'daki gibi ifade edilebilir.

$$y_k(x,w) = f\left(a_k^{(L)}\right) = f\left(\sum_{j=1}^{D_{L-1}} w_{kj}^{(L)} z_j^{(L-1)} + \theta_k^{(L)}\right). \tag{3.30}$$

Burada y_k ilgili girdi değeri x ve ağırlık vektörü w ile elde edilen k'ıncı sınıfa ait çıktıyı, L modelde bulanan nihai katman olup çıktı katmanını temsil etmektedir. k $(k = 1,2,3,\dots,K)$, bu katmanda bulunan nöron sayısını, $a_k^{(L)}$ çıkı katmanındaki k'ıncı nöronun net girdi değerini, $z_j^{(L-1)}$ bir önceki katmandan gelen çıktı değerini, $f(.)$ ise çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonunu ifade eder.

Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde çıktı katmanında kullanılan SoftMax fonksiyonu tüm sınıfları $(k = 1,2,3,\dots,K)$ kapsayan bir olasılık dağılımı oluşturur. Burada gözlenen veriye $argmax(\, y_k(x,w)\,)$ fonksiyonun çıktısı yani $y_k(x,w)$ sonucunun en yüksek olduğu sınıf etiketi atanır. Denklem (3.31) çoklu sınıflandırma problemlerinde çıktı katmanında kullanılan SoftMax fonksiyonunu temsil etmektedir (Bishop, 2007).

$$\mu_k = \frac{e^{\eta_k}}{1 + \sum_j e^{\eta_j}}, \tag{3.31}$$

Burada $(k = 1,2,\dots,K)$, sınıflandırma problemindeki sınıfları, η_k k'inci sınıf için girdi değerlerini ve μ_k ise gözlem değerinin k'inci sınıfa ait olma olasılığını ifade eder. Bu olasılıklar bir olasılık dağılım fonksiyonu olarak Denklem (3.32)'deki gibi ifade edilebilir.

$$p(x|\eta) = \left(1 + \sum_{k=1}^{K-1} e^{\eta_k}\right)^{-1} \times e^{\eta \cdot x}. \tag{3.32}$$

Adım 3: Hataların Hesaplanması ve Geri Yayılım

Bu adıma kadar gerçekleştirilen işlemler doğrultusunda veri seti vektörü ($[x_n]$) tüm gizli katmanlardan geçirilmiş ve bu veri noktalarına karşılık tahmin vektörü ($[t_n]$) oluşturulmuştur. Bu aşamada ise gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki hata ölçülerek modelin ne kadar doğru tespit

yapıldığı ölçülür. Buna göre bir sonraki iterasyonda ağırlıklar güncellenecektir.

Kayıp fonksiyonu modelin yapısına göre değişiklik göstermektedir. Tahmin problemleri için Toplam Karesel Hatalar, ikili sınıflandırma için Çapraz Entropi, çok sınıflı sınıflandırma için Çapraz Entropi ile hatalar hesaplanabilir. Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde hata ($E(w)$), Denklem (3.33)'de gösterilen Çapraz Entropi kullanılarak olasılıksal olarak hesaplanır.

$$E(w) = -\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} t_{nk} \ln y_{nk}\,, \tag{3.33}$$

burada k $(k = 1,2,3,\dots,K)$ sınıflandırma probleminde yer alan sınıf sayısını, y_{nk} her bir veri seti $[x_n]$, $(n = 1,2,3,\dots,N)$ ve sınıf çifti için Denklem (3.30) ile elde edilen tahmin değerlerini $y_k = (x_n, w)$ ifade eder. t_{nk} her bir veri seti- sınıf çiftinin gerçek hedef değerlerini temsil etmektedir. Burada ele alınan problem çok sınıflı sınıflandırma problemi olduğu için y_k Softmax fonksiyonunun olasılık değeri çıktısını temsil eder $y_k \epsilon [0,1]$ ve $\sum_k y_k = 1$ şartlarını sağlar. t_k veri gözlem değerlerine ait sınıf etiketlerini temsil etmektedir ve $t_k \epsilon \{0,1\}$ ve $\sum_k t_k = 1$ şartlarını sağlar.

Bir sonraki aşama, sıradaki iterasyonda hatanın azaltılması için ağırlık vektörünün güncellenmesidir. Hatayı minimize edebilmek için gradyan iniş yöntemi kullanılır. Hesaplanan hata, çıktı katmanından başlayarak hesaplanan gradyana göre her bir katman üzerine yayılır. Geri yayılım çıktı katmanındaki hatanın türevinin alınması ile başlar, ardından diğer katmanlar üzerinde de zincir kuralı uygulanarak hatanın türevi alınır (Rumelhart vd., 1986). Bu doğrultuda Denklem (3.34), Denklem (3.33) ile ölçülen tahmin hatasının çıktı katmanı girdisine göre göre değişimini ifade etmek için zincir kuralı ile kısmi türevinin alınmasını ifade eder.

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial y_k} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial a_i} =$$

$$\sum_k \left(-\frac{t_k}{y_k}\right) y_k(\delta_{ik} - y_i) = -t_i + y_i \sum_k t_k = y_i - t_i \tag{3.34}$$

burada a_i çıktı katmanındaki i'inci nöronun giriş değeridir.

Denklem (3.35), çıktı katmanı için bu kısmi türevin her bir veri gözlem değeri-sınıf çifti için hata sinyalini temsil eder. Bu değer sinyal geri yayılımın başlangıç değerini oluşturur ve çıktı katmanı için hesaplanan hata değerinin ağın içerisine dağıtılmasına olanak sağlar.

$$\delta_{nk} = \frac{\partial E}{\partial a_{nk}} = y_{nk} - t_{nk}, \tag{3.35}$$

Hata değeri yalnızca çıktı katmanında bilinmektedir. Denklem (3.35) ile ağın içerisine aktarılan hatanın her bir katmanın hataya olan katkısı oranında diğer katmanlara yayılabilmesi Denklem (3.36) kullanılır.

$$\delta_j^{(h)} = \varphi'\left(a_j^{(h)}\right) \sum_k w_{kj}^{(h+1)} \delta_k^{(h+1)}, \tag{3.36}$$

Gizli katmanlardaki her bir bağlantının hata değerine katkısı Denklem (3.37)'de gösterildiği üzere bu katmana giden hata $\left(\delta_j^{(h)}\right)$ ve gelen sinyal $\left(z_i^{(h-1)}\right)$ kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{\partial E_n}{\partial w_{ij}^{(h)}} = \delta_j^{(h)} z_i^{(h-1)}, \tag{3.37}$$

Öğrenme kuralı, öğrenme hızı kullanılarak bir sonraki iterasyon için ağırlık vektörü Denklem (3.38)'deki gibi güncellenir. Burada gösterilen öğrenme kuralı Stokastik Gradyen İniş'dir. Bunun yanı sıra Adam ve Rmsdrop gibi öğrenme kuralları örnek verilebilirken öğrenme hızı genellikle $(10^{-4}, 10^{-1})$ aralığındadır.

$$w^{(\tau+1)} = w^{(\tau)} - \eta \frac{\partial E}{\partial w}. \tag{3.38}$$

burada τ modelin güncellenme adımını temsil etmektedir. Yapay sinir ağları iterasyonu önceden belirlenmiş bir hata değerine ulaşınca, önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşınca ya da iyileşme gözlemlenmediğinde manuel olarak durdurulabilir (Bishop, 2007).

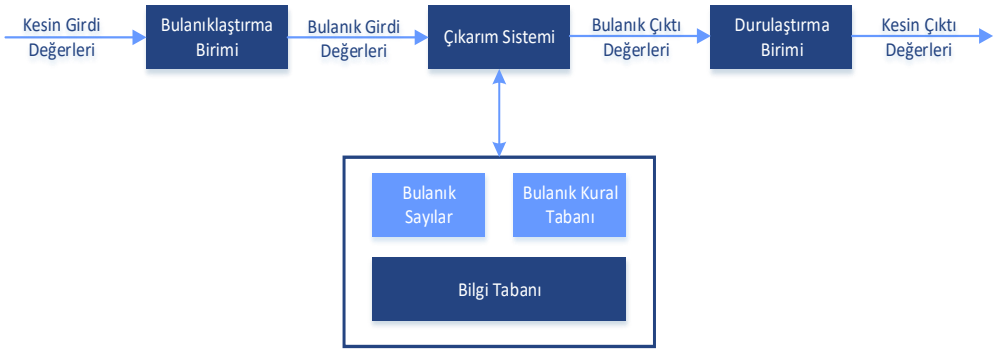
Adım 4: Model performansının değerlendirilmesi

Sınıflandırma algoritmalarının değerlendirilmesi için başta doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru olmak üzere çok sayıda metrik kullanılabilir. Bu metrikler, oluşturulan modelin sınıflandırma

yeteneğindeki başarısını kalitatif olarak değerlendirmek için kullanılır. Doğruluk, tüm gözlem noktalarının doğru biçimde sınıflandırılma derecesini; kesinlik, bir sınıfa ait olduğu tahmin edilen verilerin gerçekten o sınıfa ait olma oranını; duyarlılık, bir sınıfa ait gözlemlerin ne kadarının o doğru biçimde o sınıfa atandığını; F1-skoru ise, kesinlik duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasını ifade eder (Fikadu vd., 2025). Tüm bu metrikler [0,1] aralığında değer almaktadır. 1'e yaklaşan değerler modelin gözlem verilerini sınıflara doğru biçimde atadığını ve sınıflar arası ayrım gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Genel kabul olarak 0,80 üzeri değerler modelin sınıflandırma performansının iyi olduğunu gösterirken 0,90 ve üzeri değerler oldukça yüksek başarı olarak kabul edilir. Kesinlik, duyarlılık ve F1 değerleri, çok sınıflı problemlerinde makro veya ağırlıklı ortalama üzerinden değerlendirilmektedir. Makro ortalama, her bir sınıfı eşit ağırlıkta değerlendirirken, ağırlıklı ortalama her bir sınıfı sahip olduğu üye sayısına göre ağırlıklandırarak genel skoru belirler.

3.6 Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık Çıkarım Sistemleri (BÇS), belirsizlik altında bilgi elde etmek amacıyla "Eğer-O zaman" şeklinde yapılandırılmış kurallar yardımıyla uzmanların yargı mekanizmasını haritalamayı amaçlayan bir yöntemdir. BÇS, uzman sistemler, veri sınıflandırma, kontrol sistemleri ve görüntü tanıma gibi çeşitli alanlarda yaygın şekilde uygulanmaktadır (Behret vd., 2011; Valdez vd., 2023). Şekil 3.5, BÇS'nin genel bir özetini göstermektedir (Konstandinidou vd., 2006)..



Şekil 3.5 Bulanık çıkarım sistemi (Konstandinidou vd., 2006)

BÇS'nin uygulanabilmesi için ilk adım girdi ve çıktı değişkenlerinin belirlenmesi ve bu değişkenlerin bulanıklaştırılması için kullanılan dilsel ölçeklerin

tanımlanmasını kapsamaktadır. Gerekli tanımlamaların ardından uzmanların karar verme süreçleri dikkate alınarak dilsel ifadelerin çıktılar ile ilişkisi "Eğer-O zaman" kuralları ile yapılandırılarak kural tabanı oluşturulur. Kural tabanın karmaşıklığı, karar verme probleminin karmaşıklığı ile paraleldir.

Bu çalışma kapsamında Mamdani tarafından 1975'te geliştirilen çıkarım sistemi kullanılmıştır (Mamdani & Assilian, 1975). Bu kapsamdan uzman görüşleri ile oluşturulan kural tabanı bulanık girdi değerlerinin bulanık çıktı değerlerine dönüştürülmesi için kullanılır. Çıkarım sistemi kapsamındaki her bir kural için değerlendirmeler gerçekleştirilerek sonuçlar bir operatör yardımıyla birleştirilir ve çıkarım sistemi sonucu nihai bir bulanık çıktı elde edilir. Önerilen metodolojide Min-Max operatörü kullanılmış olup öncüllerin üyelik dereceleri minimum fonksiyonu ile birleştirilmiş, ardından aynı çıktıyı gösteren kurallar arasından maksimum değer seçilmiştir.

Son olarak bir durulaştırma yöntemi kullanılarak elde edilen bulanık çıktı kesin bir değere dönüştürülür. Önerilen metodoloji ile hidrojen vadisi tasarım süreci için risk analizi metodolojisinde BÇS ile Risk Değerlendirme İndeksi (RDİ) Denklem (3.39) ile hesaplanır.

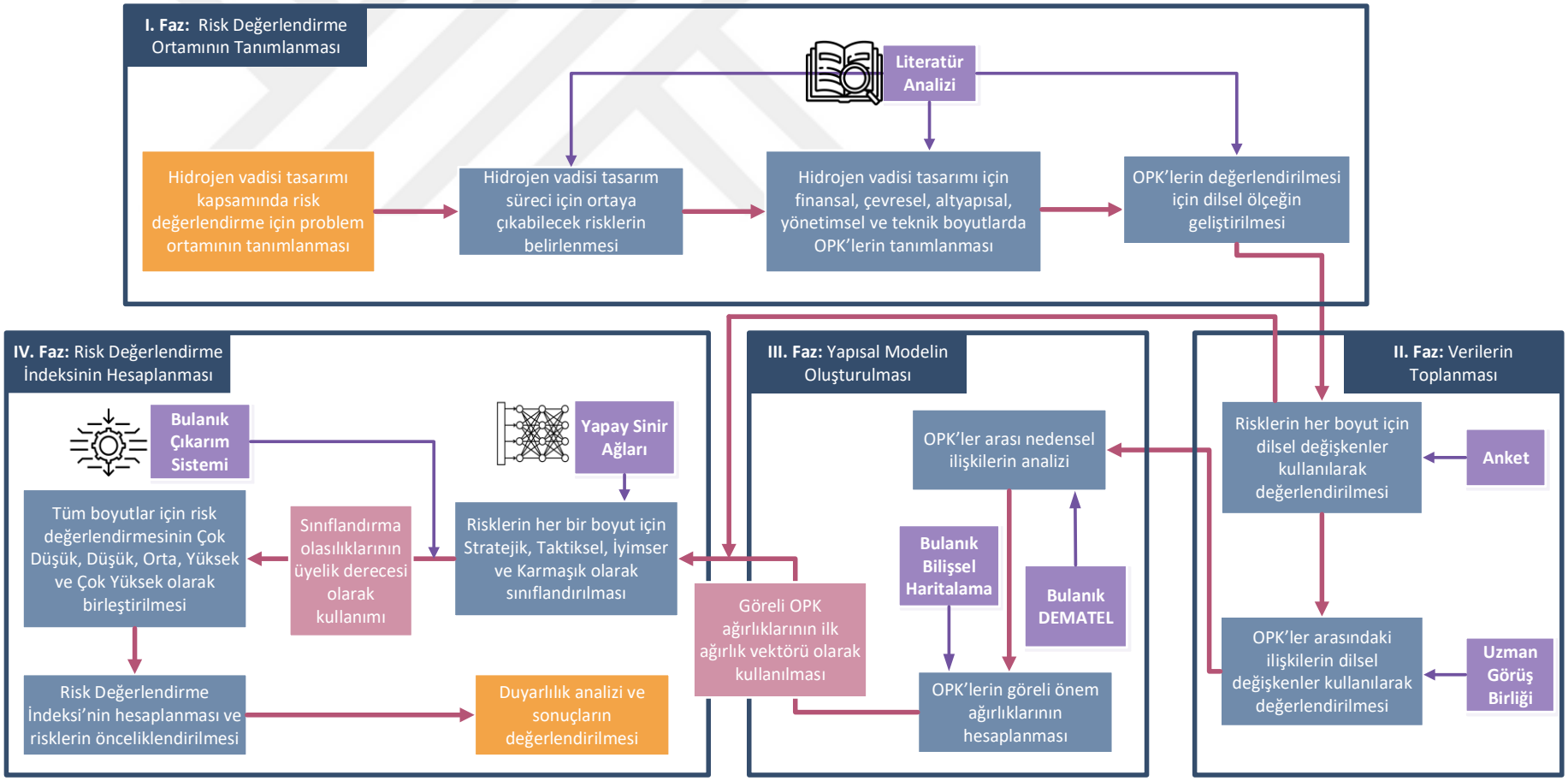
$$RDI = \frac{ÇD + (25 \times D) + (50 \times O) + (75 \times Y) + (100 \times ÇY)}{ÇD + D + O + Y + ÇY}. \quad (3.39)$$

Burada "ÇD", "D", "O", "Y" ve "ÇY" sırasıyla "Çok Düşük", "Düşük", "Orta", "Yüksek", "Çok Yüksek" çıktı sınıflarına karşılık gelen üyelik derecesini ifade eder.

3.7 Önerilen Yaklaşım

Hidrojen vadisi tasarımı, çok boyutlu ve disiplinler arası bir projedir ve bu kapsamdaki projeler için risk değerlendirmesi gerçekleştirmek, potansiyel risklerin ele alınması ve projenin sürdürülebilirliğinin sağlanması amacıyla, temel etmenlerin ve bunlar arasındaki karmaşık ilişkilerin derinlemesine analizini gerektiren karmaşık bir yapı gerektirmektedir. Önerilen metodoloji hidrojen vadisi tasarımındaki riskleri; şiddet, oluşum sıklığı, tespit edilebilirlik ve maruziyet sıklığı gibi geleneksel risk değerlendirme parametrelerinin aksine; finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik parametreler üzerinden değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

CREAM metodolojisinin bir risk değerlendirme çerçevesine uyarlanması, uzman görüşlerinin ayrıntılı şekilde temsil edilmesini sağlarken, farklı dışsal parametreler arasındaki bilgi kaybını en aza indirmektedir. Önerilen yaklaşım, riskin ortaya çıkmasına neden olan temel faktörlere dair kapsamlı bir içgörü sunarak, karar vericilerin hedefe yönelik risk azaltma stratejileri geliştirmesine olanak tanımaktadır. Çalışma kapsamında önerilen hidrojen vadisi tasarım süreci için bütünleşik risk değerlendirme yaklaşımı Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Önerilen bütünleşik metodoloji

Şekil 3.8'de görüldüğü üzere önerilen yaklaşım 4 faza ayrılmıştır. İlk faz, hidrojen enerjisi ve hidrojen vadisi ile ilgili araştırmaların, risk değerlendirme yöntemlerinin ve projelerinin incelenmesini kapsamaktadır. Bu aşamada gerçekleştirilen incelemeler sonucu hidrojen vadisi tasarım aşamasında karşılaşılabilecek riskler belirlenir; ilgili risklerin finansal, altyapısal, çevresel, yönetimsel ve teknik boyutlardan analiz edilebilmesi için değerlendirme boyutlarını etkileyen OPK'lar tanımlanır. Son olarak risk analizi sırasında kullanılacak dilsel ölçekler ve bulanık sayı karşılıkları geliştirilir.

II. Faz, belirlenen ortak performans koşullarının birbiri arasındaki ilişkilerin ve bu faktörlerin risklerin değerlendirilmesini nasıl etkilediğine dair analiz gerçekleştirilebilmesine dair veri toplanmasını kapsamaktadır. Bu aşamada toplanacak veriler şu şekilde tanımlanır:

- Risk boyutları içerisinde kapsamında OPK'ların birbirleri üzerinde etki edip etmediği, etki ediyorlarsa etkinin şiddeti ve yönünün değerlendirilmesi,
- Belirlenen hidrojen vadisi tasarım risklerinin OPK'lara göre değerlendirilmesi.

Bu değerlendirmeler, I. Faz'da belirlenen dilsel ölçekler kullanarak gerçekleştirilir. Risk seviyelerinin yüksek doğruluk ve güvenilirlikle belirlenmesi için değerlendirmeleri gerçekleştirecek katılımcıların hidrojen enerjisi konusunda deneyimli olması gerekmektedir. OPK'lar arasındaki ilişkilerin analizi için her bir boyut kapsamında bağımsız olarak veri toplanması gerekmektedir. Önerilen metodoloji ile hidrojen vadisi tasarımına etki eden risklerin değerlendirilmesi, her bir riskin tüm boyutlardaki OPK'lara göre değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Hidrojen vadisi tasarımında risk değerlendirmesi için risk boyutları düzeyinde yapısal modelin oluşturulması III. Faz'da gerçekleştirilmektedir. Yapısal model, sistem elemanları arasındaki nedensel ilişkilerin, ilişkilerin ağırlık ve yönü ile ortaya çıkartılmasını ve her bir sistem elemanının sistem üzerindeki toplam etkisinin belirlenmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu kapsamda ilk olarak Bulanık DEMATEL yöntemi ve OPK'ların ikili karşılaştırılması sonucu hidrojen vadisi tasarımını etkileyen koşullar arasındaki nedensel ilişkiler ortaya çıkarılır. Daha sonrasında Bulanık DEMATEL'in çıktısı olan toplam ilişki matrisi ve II. Faz'da toplanan ilişkilerin yönüne dair veri BBH yönteminin girdisi olarak kullanılarak OPK'ların risk değerlendirme boyutu içerisindeki göreli önem

ağırlıkları hesaplanır. Böylece, uzmanlardan toplanmasına ihtiyaç duyulan bilgi miktarı azaltılarak, risk boyutları kapsamında belirlenen kriterlerin hem ilişkilerinin hem de ağırlıklarının tespit edilmesi amaçlanır. Uygulanan DEMATEL ve bilişsel haritalama yöntemlerinin adımları finansal, çevresel, teknik, altyapısal, yönetim ve teknik belirlenen her bir boyut için tekrar edilmelidir.

IV. Faz, hidrojen vadisi tasarım risklerinin yapılan uzman değerlendirmeleri ve oluşturulan yapısal modeli kullanarak risk değerlendirme indeksinin hesaplanması ve risklerin sınıflandırılması süreçlerini içermektedir. Bu amaçla ilk olarak belirlenen riskler, risk değerlendirme boyutları düzeyinde ÇKA modelleri yardımıyla CREAM bağlamsal kontrol modlarına sınıflandırılmıştır. ÇKA modellerinin kurulması için III. Faz'da BBH sonucu ortaya çıkartılan göreli OPK ağırlıkları ilk ağırlık vektörü olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, uzman değerlendirmelerinin YSA modellerine entegre edilmesi yardımıyla eğitim için uygun bir başlangıç noktasının sağlanması ve öğrenme sürecinin hızlı bir şekilde sonuca yakınsamasını desteklemektedir. Hidrojen vadisi tasarım sürecindeki risk değerlendirmesinin son adımı, tüm boyutlardaki risk değerlendirmelerinin BÇS ile birleştirilmesidir. Kural tabanlı çıkarım sistemi, YSA modelindeki sınıflandırma etiketlerini belirlemek için kullanılan olasılık değerlerini girdi olarak kullanmaktadır. Risk boyutları düzeyindeki uzman görüşleri risklerin nihai sınıflandırılması için değerlendirilerek uzmanlara olan bağımlılık azaltılırken, ayrıntılı ve kapsamlı bir değerlendirme sağlanmaktadır.

Tablo 3.10 Risklerin önceliklendirilmesi

Önceliklendirme	Risk Değerlendirme İndeksi
Acil olarak kısa vadede önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirilmelidir	80-100
Orta dönemde risk önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirilmelidir	60-79
Yakın olarak gözlemlenmeli ve uzun vadede risk önleyici ve azaltıcı stratejiler planlanmalıdır	40-59
Olası değişiklikler için periyodik olarak gözden geçirilmelidir	20-39
Risk ihmal edilebilir düzeydedir	1-19

Bulanık çıkarım sistemi riskleri "Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek" sınıflandırarak 1 ile 100 arasında değişen bir risk değerlendirme indeksi (RDİ) değerinin hesaplanmasını sağlar. Hidrojen vadisi tasarımı sürecinde risklerin önlenmesi veya etkilerinin azaltılabilmesi için yüksek öncelikli olarak

sınıflandırılan risklerin daha ayrıntılı şekilde incelenmesi gerekmektedir. İlgili stratejilerin geliştirilmesi ve uygulanmasının ardından bu riskler için yeniden RDİ hesaplanmalıdır. Risklerin RDİ'ye göre önceliklendirilmesi Tablo 3.10'da görülebilir. Görüldüğü üzere önerilen metodolojinin sonucunda belirlenen riskler, risk değerlendirme indeksi değerine göre göre beş farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bu bağlamda tanımlanan sınıflar risklerin önceliğini belirtmekte ve bu sayede karar vericilere önleyici -azaltıcı stratejilerin geliştirilmesi için sistematik ve bilimsel biçimde yol göstermektedir.

4
UYGULAMA

4.1 Problemin Yapısı

Küresel ısınmanın önüne geçilmesi ve sürdürülebilir bir gelecek oluşturmak için uluslararası ve ulusal çok sayıda girişim bulunmaktadır. Başta Birleşmiş Milletler öncülüğünde oluşturulan Paris Anlaşması taraflarını bu doğrultudaki çabaları birleştirerek en kapsamlı çerçeveyi ortaya çıkarmıştır. Öte yandan ülkeler de stratejik planlarını belirlerken sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği konularını temel hedefler arasında konumlandırmaktadır.

Türkiye gelişmekte olan bir ülke olarak artan nüfusu ve sanayi faaliyetleri ile yeşil enerji dönüşümünü ve enerji güvenliğini sağlamak amacıyla yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik adımlar atmaktadır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2024–2028 Stratejik Planı'nda yer alan "Sıfır Karbon Hedefli Enerji Dönüşümü" başlığı altındaki "Yeşil hidrojen ve yenilenebilir yakıt değer zinciri geliştirilecektir" hedefi doğrultusunda, Türkiye'nin sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve uygun maliyetli enerji arzını sağlamak amacıyla hidrojen teknolojilerine yönelik altyapı kurma kararı alınmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a). Bu bağlamda, hidrojen değer zinciri kapsamında kullanılacak yöntem ve kaynakların önceliklendirilmesi ile hidrojen enerjisine yönelik ulusal ve uluslararası iş birliklerinin güçlendirilmesi gerekliliği, stratejik planın öncelikleri arasında belirlenmiştir.

Bu çalışma, gelişmekte olan ülkelerde yeşil enerjiye geçişin etkin biçimde gerçekleştirilebilmesi ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına dönüşümün desteklenmesi için hidrojen vadisi tasarım süreci esnasında ortaya çıkabilecek risklerin değerlendirilebilmesi için standartlaştırılmış bir metodoloji oluşturulması ve önerilen metodolojinin Türkiye merkezli bir hidrojen vadisi örneği üzerinden uygulanmasını amaçlamaktadır.

4.2 Veri Toplama Süreci

Hidrojen vadisi tasarım sürecine ilişkin risk değerlendirmesinin ilk aşamasında gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda Tablo 4.1'de yer alan riskler belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Hidrojen vadisi tasarımına ilişkin riskler

No.	Risk	No.	Risk
R1	Başlangıç Maliyetinin Yüksek Olması	R16	Hidrojen Dağıtım Altyapı Eksikliği
R2	Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği	R17	Olumsuz Arazi Koşulları
R3	Geri Dönüş Süresinin Uzun Olması	R18	Ulaşım ve Lojistik Alt Yapısının Bulunmaması
R4	Talep Düzeyinin Belirsiz Olması	R19	Yetkin Olmayan Personel Seçimi
R5	Teşvik Miktarının Yeterli Olmaması	R20	Personele Gerekli Eğitimin Verilmemesi
R6	Projenin Finansal Sürdürülebilirliği	R21	Tedarik Süreçlerinin Planlanamaması
R7	Politika ve Yasal Düzenlemelerdeki Belirsizlikler	R22	Paydaş Yönetiminin Doğru Yapılmaması
R8	Ekolojik Etki	R23	Yanlış Materyal Seçimi
R9	İklim Değişikliği	R24	Uygunsuz Yerleşim Düzeni
R10	Olumsuz Hava Koşulları	R25	Bileşenler Arası Bağlantının Düzgün Tasarlanmaması
R11	Doğal Afetlerin Ortaya Çıkması	R26	Yeterli Havalandırma Sisteminin Bulunmaması
R12	Sürdürülebilir Su Kaynağına Erişimin Sağlanmaması	R27	Hidrojen Tespit Sisteminin Yeterli Olmaması
R13	Elektrik Şebekesine Erişimin Sağlanmaması	R28	Isı ve Basınç Uyarı Sisteminin Yetersiz Olması
R14	Sürdürülebilir Enerji Kaynağına Erişim	R29	Yangın Karşıtı Önlemlerin Alınmaması
R15	Enerji Kaynağının Sürekliliğinin Sağlanmaması	R30	Acil Kapatma Valfinin Eksik Olması

İlgili risklerin açıklaması ve kapsamına ise detaylı olarak aşağıda değinilmiştir.

- **R1. Başlangıç Maliyetinin Yüksek Olması:** Hidrojen vadisinin tasarımının gerekli ekipman ve malzemenin toplanması, planların oluşturulması, yetkin personelin bir araya getirilmesi ve yasal yükümlülüklerin karşılanması gibi tasarım aşamasının yüksek maliyetli kalemlere etkisini kapsamaktadır.

- **R2. Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği:** Uzun vadeli bir proje sırasında yaşanabilecek ekonomik dalgalanmalar, finansal planları etkileyebilir. Yaşanabilecek enflasyon ve faiz oranı değişikliği, projenin sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilir.
- **R3. Geri Dönüş Süresinin Uzun Olması:** Hidrojen enerjisi üretimi ve kullanımı, başlangıçta yüksek maliyetler gerektirir. Bu maliyetlerin geri dönüşü ancak uzun vadeli bir süreçte düşük maliyetli enerji üretimi ile sağlanabilir.
- **R4. Talep Düzeyinin Belirsiz Olması:** Hidrojen enerjisi, son yıllarda öne çıkan bir enerji alternatifi olmasına karşın ilgili teknoloji henüz gelişme aşamasındadır. İlgili farkındalığının yeni oluşması ve kullanım alanlarının gelişmekte olması, hidrojen enerjisine olan talebin oluşmasına sağlamasına rağmen geçmiş veri kısıtlı olduğundan talep tahmini için yeterli veri bulunmamaktadır.
- **R5. Teşvik Miktarının Yeterli Olmaması:** Devlet tarafından projeye verilecek teşvik miktarının beklenenden az olması tasarımda teknoloji ve kapasite gibi önemli faktörleri etkiler.
- **R6. Projenin Finansal Sürdürülebilirliği:** Uzun vadede hidrojen vadisinin maliyet-gelir dengesi, finansal yönetimi ve finansal performansına göre projenin finansal açıdan başarısını ifade etmektedir.
- **R7. Politika ve Yasal Düzenlemelerdeki Belirsizlikler:** Ulusal ve uluslararası düzeyde hidrojen üretimi, depolaması ve kullanımı ile ilgili yasal yükümlülüklerin eksik olması, var olan maddelerin değişmesi ve yeni maddelerin eklenmesi ile ilgili belirsizlikleri kapsamaktadır.
- **R8. Ekolojik Etki:** Hidrojen vadisi barındırdığı farklı tesisler sebebiyle geniş bir araziye ihtiyaç duymaktadır. Tasarım aşamasında bölgedeki flora ve fauna dikkate alınmalıdır.
- **R9. İklim Değişikliği:** Hidrojen vadisinin kurulum alanında uzun vadede ortaya çıkabilecek çevresel değişiklikler hidrojen vadisinin üretim kapasitesini ve verimliliğini etkileyebilir.
- **R10. Olumsuz Hava Koşulları:** Tasarım aşamasında, operasyonlar sırasında yaşanabilecek aşırı sıcaklık, aşırı yağış ve kar yağışı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu koşullar, kurulum alanında bulunan malzeme ve

ekipmanların zarar görmesine, inşaat faaliyetlerini yavaşlamasına ve projenin tamamlama süresinin uzamasına neden olabilir.

- **R11. Doğal Afetlerin Ortaya Çıkması:** Hidrojen vadisinin tasarlanacağı alanda gerçekleşebilecek deprem, sel, toprak kayması gibi doğal afetlerin ortaya çıkması yapısal bütünlüğün korunması adına ek tedbirler gerektirmektedir.
- **R12. Sürdürülebilir Su Kaynağına Erişimin Sağlanmaması:** Elektroliz ile hidrojen üretimi için sürece girdi olarak su kullanılmaktadır. Bu sebeple hidrojen vadisinin tasarlanma aşamasında sürdürülebilir bir su kaynağına erişim ihtiyacı vardır.
- **R13. Elektrik Şebekesine Erişimin Sağlanmaması:** Hidrojen vadisinin işletimi için tasarım aşamasında gerekli elektrik enerjisini sağlayacak kaynaklara erişim için gerekli altyapının bulunması gereklidir.
- **R14. Sürdürülebilir Enerji Kaynağına Erişim:** Hidrojen faaliyetlerinin kesintisiz sürdürülebilmesi için tasarım aşamasında, operasyon süreçleri için gerekli enerji tespit edilmeli ve bu enerji kaynaklarına erişim sağlanmalıdır.
- **R15. Enerji Kaynağının Sürekliliğinin Sağlanmaması:** Enerji kaynaklarında kesinti olması, hidrojen vadisi için faaliyetlerinin aksaması sebep olabilir. Bu sebeple tasarım aşamasında ekosistemin enerji sürekliliği güvenceye alınmalıdır.
- **R16. Hidrojen Dağıtım Altyapı Eksikliği:** Hidrojen vadisi içerisinde üretilmiş hidrojen enerjisinin farklı lokasyonlara taşınması için gerekli altyapının yanlış tasarlanması durumudur.
- **R17. Olumsuz Arazi Koşulları:** Arazinin eğimi, zeminin yapısı ve materyali gibi karakteristik özellikleri hidrojen vadisinin tasarım aşamasında gereken altyapı çalışmalarını etkilediği gibi yapının dayanıklılığını da etkilemektedir.
- **R18. Ulaşım ve Lojistik Alt Yapısının Bulunmaması:** Hidrojen vadisi kurulum alanına malzeme ve ekipmanların ulaştırılabilmesi için gerekli ulaşım alt yapısının bulunmasıdır.

- **R19. Yetkin Olmayan Personel Seçimi:** Tasarım süreçlerinde görevlendirilen personelin ilgili konuda yetkin kişiler arasından seçilmiş olması gerekmektedir.
- **R20. Personele Gerekli Eğitimin Verilmemesi:** Tasarım süreçlerinde görevlendirilen personele, yönetim tarafından ilgili konularda gerekli eğitimlerin verilmemiş olması,
- **R21. Tedarik Süreçlerinin Planlanamaması:** Tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan gerekli ekipman ve malzemenin faaliyet takvimine uygun zamanda, miktarda ve biçimde tedarik edilmesidir.
- **R22. Paydaş Yönetiminin Doğru Yapılmaması:** Hidrojen vadisi tasarımında rol alan farklı paydaşların yönetimi, paydaşlar arası iletişim, bilgi paylaşımı, sorumluluk ve yetki atamalarının gerçekleştirilmesidir.
- **R23. Yanlış Materyal Seçimi:** Hidrojen vadisi operasyonu sırasında yüksek ısı ve basınca maruz kalacak malzemeler zaman içerisinde kimyasal ve fiziksel değişime uğrayabilir. Bunun sonucunda kullanılan malzemeler gevrekleşme, çatlama, korozyon ve titreşim gibi sonuçlara maruz kalabilir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak tasarım aşamasında uygun materyal tercih edilmelidir.
- **R24. Uygunsuz Yerleşim Düzeni:** Hidrojen vadisi tasarımı aşamasında hidrojen üretimi, depolama ve taşıma fonksiyonlarına ait yapılar, hidrojen enerjisi akışı doğrultusunda yerleştirilmez ise operasyonel verim kaybına neden olabilir. Uygunsuz yerleşim düzenine bağlı olarak süreçlerde aksama ve ek maliyetler ortaya çıkabilir.
- **R25. Bileşenler Arası Bağlantının Düzgün Tasarlanmaması:** Hidrojen molekülleri, atomik düzeyde küçük bir yapıya sahip olduğundan inşaat sırasında bileşenlerin montajı düzgün tasarlanmaz ise operasyon sırasında bağlantı noktalarından sızıntı ortaya çıkabilir. Bu kapsamda parçaların birbiri ile bağlanmasını sağlayan menteşe ve vana gibi bağlantı elemanlarının ve kaynak yöntemlerinin yüksek kalitede ve standartlara uygun olması gerekmektedir.
- **R26. Yeterli Havalandırma Sisteminin Bulunmaması:** Herhangi bir sızıntı durumunda hidrojen gazı birikimini önlemek ve buna bağlı olarak ortaya çıkabilecek patlama, yangın ve boğulma tehlikelerinin önüne geçmek

için uygun havalandırma sistemi tasarlanmalı ve doğru şekilde monte edilmelidir.

- **R27. Hidrojen Tespit Sisteminin Yeterli Olmaması:** Hidrojen gazının renksiz ve kokusuz bir gaz olmasından dolayı sızıntı durumunda tespit edilmesi oldukça zordur. Gaz birikintisinin ateş kaynağıyla birleşmesi sonucu yangın ve patlamaya sebep olması ve/veya çalışanların gazdan etkilenerek zehirlenme ve boğulma tehlikesine yol açar. Bu sebeple hidrojen vadisi tasarım sürecinde standartlara uygun hidrojen tespit sistemi bulunmalıdır.
- **R28. Isı ve Basınç Uyarı Sisteminin Yetersiz Olması**: Hidrojen üretimi ve depolaması sırasında ortaya çıkacak yüksek ısı ve basınç faktörlerinin ölçülerek ekipmana zarar verecek riskli seviyeye çıkmasını önlemek amacıyla tasarım sırasında uygun uyarı sistemleri yerleştirilerek ilgili riskler engellenmelidir.
- **R29. Yangın Karşıtı Önlemlerin Alınmaması:** Hidrojen, yanıcı bir element olup düşük yoğunluklu gaz karışımları dahi yanıcı olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle hidrojen vadisi tasarım aşamasında yangın algılama ve söndürme için gerekli önlemler alınmalı ve prosedürler oluşturulmalıdır.
- **R30. Acil Kapatma Valfinin Eksik Olması:** Operasyon sırasında beklenmedik bir durum veya riskin ortaya çıkması durumunda ciddi sonuçları engellemek için hidrojen vadisi tasarımı aşamasında operasyonu tamamen durduracak bir acil kapatma valfi veya sisteminin eklenmemesi durumudur.

Risklerin tanımlanmasının ardından bu risklerin geliştirilmiş CREAM metodoloji kapsamında değerlendirileceği boyutların ve OPK'ların belirlenmesi gerekmektedir. Literatür analizi sonucu risklerin değerlendirileceği boyutlar Finansal (B1), Çevresel (B2), Altyapısal (B3), Yönetimsel (B4) ve Teknik (B5) olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar kapsamında belirlenen risklerin değerlendirebilmesi için Hollnagel tarafından belirlenen 9 orijinal OPK'nin düzenlenmesi ve literatür çalışmasına göre yenilerinin tanımlanması yoluyla önerilen metodoloji için belirlenen OPK'lar Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Önerilen yöntem kapsamında belirlenen OPK'lar

Belirlenen risk boyutları, risklerin farklı bakış açıları ile değerlendirilmesini sağlayarak bütüncül bir değerlendirme ortamı sunmaktadır. Uzman görüşlerinin risk değerlendirme sistemine aktarılabilmesi için hidrojen vadisi tarımında karşılaşılabilecek risklerin değerlendirilmesinde kullanılacak dilsel ölçeklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tablo 4.2, finansal boyut kapsamında kullanılmak üzere belirlenen OPK'ların açıklamalarını ve değerlendirme sürecinde kullanılacak dilsel tanımlayıcılarını göstermektedir.

Tablo 4.2 Finansal OPK'lar

Ortak Performans Koşulu	Açıklama	Dilsel Tanımlayıcı
F1. Yatırımcıların tutumu	Yatırımcıların hidrojen vadisi projesine yaklaşımı ve finansal katılım isteği.	Etkisiz (E.)
		Çekingen (Ç)
		Nötr (N)
		Olumlu (Oml)
F2. Tahmini maliyet	Hidrojen vadisi kurulumu için öngörülen bütçe.	Etkisiz (E)
		Yüksek (Ysk)
		Orta (O)
		Düşük (D)
F3. Teşvik imkânı	Hidrojen vadisi kurulumu için kamudan sağlanabilecek mali teşviklerin varlığı.	Etkisiz (E)
		Düşük (D)
		Orta (O)
		Yüksek (Ysk)
F4. Organizasyonun yeterliliği	Proje sırasında finansal kaynağın doğru dağıtımı için gerekli organizasyonun yeterli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)
F5. Kaynakların yeterliliği	Projeye tahsis edilen finansal kaynakların yeterli olup olmadığı.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
F6. Prosedürlerin/ planların mevcudiyeti	Hidrojen vadisi kurulumu süresince gerekli finansal yönetim prosedürlerinin ve planların varlığı.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Kabul edilebilir (KE)
		Uygun (U)
F7. Eğitim ve deneyimin yeterliliği	Finansal risklerin yönetiminden sorumlu ekibin alanında yetkin, bilgi sahibi ve deneyimli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli Sınırlı (YS)
		Yeterli Yüksek (YY)
F8. İş birliği kalitesi	Kamu kuruluşları, özel sektör, yerel yönetim, yatırımcılar, personel olmak üzere paydaşların finansal konularda gerçekleştirdiği iş birliğinin etkinliği.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)

Tablo 4.3, çevresel boyut kapsamında kullanılmak üzere belirlenen OPK'ların açıklamalarını ve değerlendirme sürecinde kullanılacak dilsel tanımlayıcılarını göstermektedir.

Tablo 4.3 Çevresel OPK'lar

Ortak Performans Koşulu	Açıklama	Dilsel Tanımlayıcı
Ç1. Şiddet	Hidrojen vadisi operasyonel faaliyetlerine etki etmesi beklenen çevresel koşulların etki büyüklüğü.	Etkisiz (E)
		Düşük (D)
		Orta (O)
		Yüksek (Ysk)
Ç2. Sapma miktarı	Çevresel koşullarda meydana gelebilecek beklenmedik değişimlerin, öngörülen koşullardan sapma durumu.	Etkisiz (E)
		Düşük (D)
		Orta (O)
		Yüksek (Ysk)
Ç3. Maruziyet	Hidrojen vadisi kurulumu ve operasyonu süresince çevresel faktörlere maruz kalma olasılığı.	Etkisiz (E)
		Düşük (D)
		Orta (O)
		Yüksek (Ysk)
Ç4. Organizasyonun yeterliliği	Proje sırasında karşılaşılabilecek ve proje faaliyetleri sonucu ortaya çıkabilecek çevresel faktörlerin yönetimi için gerekli organizasyonun yeterli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)
Ç5. Kaynakların yeterliliği	Çevresel risklerin yönetimi için gerekli personel, ekipman ve diğer kaynakların mevcudiyeti.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
Ç6. Prosedürlerin/ planların mevcudiyeti	Çevresel risklerin ortaya çıkması durumunda uygulanacak prosedürlerin tasarlanması.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Kabul edilebilir (KE)
		Uygun (U)
Ç7. Eğitim ve deneyimin yeterliliği	Çevresel risklerin yönetiminden sorumlu ekibin alanında yetkin, bilgi sahibi ve deneyimli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli Sınırlı (YS)
		Yeterli Yüksek (YY)

Tablo 4.4, altyapısal boyut kapsamında kullanılmak üzere belirlenen OPK'ların açıklamalarını ve değerlendirme sürecinde kullanılacak dilsel tanımlayıcılarını göstermektedir.

Tablo 4.4 Altyapısal OPK'lar

Ortak Performans Koşulu	Açıklama	Dilsel Tanımlayıcı
A1. Uzaklık	Hidrojen vadisi kurulumu ve operasyonu için gerekli altyapı ve dağıtım merkezlerine olan mesafesi.	Etkisiz (E)
		Uzak (Uzk)
		Orta (O)
		Yakın (Ykn)
A2. Kapasite	Hidrojen vadisi kurulumu ve operasyonu için gerekli tesislerin teknik ve fiziksel kapasitesi.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
A3. Organizasyonun yeterliliği	Sürdürülebilir altyapı sisteminin tasarlanması ve yönetimi için gerekli organizasyonun yeterli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)
A4. Kaynakların yeterliliği	Altyapı geliştirme için tahsis edilen insan, finansal ve teknik kaynakların yeterliliği.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
A5. Prosedürlerin/ planların mevcudiyeti	Hidrojen vadisi tasarım sürecinde ihtiyaç duyulan altyapı sistemi için gerekli süreç ve planların varlığı.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Kabul edilebilir (KE)
		Uygun (U)
A6. Eğitim ve deneyimin yeterliliği	Altyapı risklerinin yönetiminden sorumlu ekibin alanında yetkin, bilgi sahibi ve deneyimli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli Sınırlı (YS)
		Yeterli Yüksek (YY)

Tablo 4.5, yönetimsel boyut kapsamında kullanılmak üzere belirlenen OPK'ların açıklamalarını ve değerlendirme sürecinde kullanılacak dilsel tanımlayıcılarını göstermektedir.

Tablo 4.5 Yönetimsel OPK'lar

Ortak Performans Koşulu	Açıklama	Dilsel Tanımlayıcı
Y1. Organizasyonun yeterliliği	Projenin yönetiminde yer alan organizasyonun koordinasyon kapasitesi.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)
Y2. Çalışma Koşulları	Hidrojen vadisi kurulumu süresince iş ortamının personel verimliliği ve motivasyonu üzerindeki etkileri.	Etkisiz (E)
		Uyumsuz (Uyz)
		Uyumlu (Uyl)
		Avantajlı (A)
Y3. Kaynakların yeterliliği	Yönetim süreçlerinde kullanılacak kaynakların yeterli düzeyde olması.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
Y4. Prosedürlerin/ planların mevcudiyeti	Hidrojen vadisi kurulumu sırasında yönetim için gerekli süreç ve planların varlığı.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Kabul edilebilir (KE)
		Uygun (U)
Y5. Eş zamanlı karar sayısı	Hidrojen vadisi kurulumu esnasında meydana çıkan dinamik, karmaşık ve çok sayıda faktör bağlı olarak değişen karar verme ortamında yönetimin eş zamanlı birden fazla karar alabilme kapasitesi.	Etkisiz (E)
		Daha fazlası... (DF)
		Eşleşen... (Eşn)
		Daha az... (DA)
Y6. Eğitim ve deneyimin yeterliliği	Yönetim kadrosunun alanında yetkin, bilgi sahibi ve deneyimli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli Sınırlı (YS)
		Yeterli Yüksek (YY)
Y7. İş birliği kalitesi	Farklı yönetim birimleri arasındaki koordinasyonun etkinliği.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)

Tablo 4.6, teknik boyut kapsamında kullanılmak üzere belirlenen OPK'ların açıklamalarını ve değerlendirme sürecinde kullanılacak dilsel tanımlayıcılarını göstermektedir.

Tablo 4.6 Teknik OPK'lar

Ortak Performans Koşulu	Açıklama	Dilsel Tanımlayıcı
T1. Tasarım	Hidrojen vadisi kapsamında gerçekleştirilen tasarımların teknik yeterliliği, mühendislik standartlarına, güvenlik gereksinimlerine uygun ve verimli şekilde tasarlanması.	Etkisiz (E)
		Uygun Değil (UD)
		Kabul Edilebilir (KE)
		Uygun (U)
T2. Organizasyonun yeterliliği	Hidrojen vadisi kurulumunda yer alan teknik süreçlerin etkin yönetilmesi için gerekli olan uzmanlık, kaynaklar, planlama, koordinasyon ve risk yönetimi gibi organizasyonel unsurların yeterli olmasını ifade eder.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)
T3. Çalışma Koşulları	Sıcaklık, nem, rüzgâr gibi çalışma koşullarını hidrojen vadisi kurulum sırasında teknik özelliklere olabilecek etkisi.	Etkisiz (E)
		Uyumsuz (Uyz)
		Uyumlu (Uyl)
		Avantajlı (A)
T4. İş Gücünün Yeterliliği	Teknik süreçlerde yeterli iş gücünün sağlanması.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
T5. Malzemenin Yeterliliği	Teknik süreçlerde kullanılacak malzemelerin teknik spesifikasyon uygunluğu ve kalitesi.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Tolere edilebilir (TE)
		Yeterli (Y)
		Destekleyici (Dtc)
T6. Prosedürlerin/ planların mevcudiyeti	Hidrojen vadisi kurulumu süresince gerekli teknik prosedürlerin ve planların varlığı.	Etkisiz (E)
		Uygunsuz (Ugz)
		Kabul edilebilir (KE)
		Uygun (U)
T7. Eğitim ve deneyimin yeterliliği	Teknik süreçlerde görev alan personelin alanında yetkin, bilgi sahibi ve deneyimli olması.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Yeterli Sınırlı (YS)
		Yeterli Yüksek (YY)
T8. İş birliği kalitesi	Teknik gereksinimleri sağlamak için ekip içi ve dışı iş birliğinin etkinliği.	Etkisiz (E)
		Yetersiz (Ysz)
		Verimsiz (Vsz)
		Verimli (V)
		Çok Verimli (ÇV)

Önerilen yönteme ilişkin risklerin ve risk değerlendirme koşullarının tanımlanmasının ardından uygulama için veri toplama sürecine geçilir. İlk aşamada, her bir boyut için bütünleşmiş bulanık DEMATEL ve BBH uygulaması yoluyla problem ortamının yapısal modelin oluşturulması ve sistemdeki nedensel ilişkilerin tanımlanması için veri toplanır. Bu amaç doğrultusunda Tablo 4.7'de gösterilen dilsel ölçek, uzman bağımlılığını azaltmak amacıyla hem Bulanık DEMATEL hem de BBH yöntemleri için girdi toplamak için kullanılır.

Bulanık DEMATEL yöntemi için girdi olarak OPK'ların ilişkin ikili karşılaştırmaları kullanılırken, BBH için OPK'ların korelasyonuna dair ilişkin ikili karşılaştırmalar ve bulanık DEMATEL'den elde edilen çıktı toplam ilişki matrisi kullanılmaktadır. Böylece BBH haritalama yönteminde girdi kullanılan nedensellik ilişkilerin şiddetinin belirlenmesi kantitatif bir yöntemle gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu sebeple Tablo 4.7 ile gerçekleştirilen değerlendirme OPK'lar arasındaki etki ve korelasyon ilişkilerini kapsamaktadır.

Tablo 4.7 OPK'ların ikili karşılaştırması için kullanılan dilsel ölçek

Dilsel Ölçek	Etki Skoru	Bulanık Ölçek
Çok yüksek etki, Negatif Korelasyon	-4	-(0,75;1;1)
Yüksek etki, Negatif Korelasyon	-3	-(0,50;0,75;1)
Orta düzeyde etki, Negatif Korelasyon	-2	-(0,25;0,50;0,75)
Çok düşük etki, Negatif Korelasyon	-1	-(0;0,25;0,50)
Etki yok, Korelasyon yok	0	-(0;0;0,25)
Çok düşük etki, Pozitif Korelasyon	1	(0;0,25;0,50)
Orta düzeyde etki, Pozitif Korelasyon	2	(0,25;0,50;0,75)
Yüksek etki, Pozitif Korelasyon	3	(0,50;0,75;1)
Çok yüksek etki, Pozitif Korelasyon	4	(0,75;1;1)

Risk değerlendirme boyutlarının yapısal modelinin ortaya çıkarılması amacıyla hidrojen enerjisi, bulanık mantık ve karar verme konularında deneyime sahip üç karar vericinin ortak görüşleri doğrultusunda OPK'ların ikili değerlendirmeleri Tablo 4.7'deki dilsel ölçek kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Tablo 4.8 söz konusu karar vericilerin Şekil 4.1'de tanımlanan risk boyutları kapsamındaki OPK'lar için gerçekleştirdiği ikili karşılaştırmaları göstermektedir.

Tablo 4.8 OPK'ların ikili karşılaştırması

B1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
F1	0	2	3	1	2	1	0	-1
F2	-4	0	1	0	-1	-2	0	0
F3	2	-1	0	2	3	2	-1	-2
F4	1	0	1	0	2	1	-1	-1
F5	1	-1	3	2	0	2	-2	-2
F6	1	-2	2	1	1	0	-1	-1
F7	0	0	-1	-2	-3	-1	0	1
F8	-1	0	-2	-1	-2	-1	0	0
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
Ç1	0	4	2	-1	1	2	-1	
Ç2	2	0	2	0	-1	2	0	
Ç3	2	-1	0	-3	2	1	1	
Ç4	-2	0	1	0	2	3	2	
Ç5	1	-1	2	1	0	2	1	
Ç6	2	1	-1	2	1	0	-1	
Ç7	-1	0	1	3	1	-1	0	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
A1	0	3	-1	1	1	0		
A2	-2	0	3	2	1	0		
A3	-1	2	0	4	2	2		
A4	1	2	3	0	2	1		
A5	1	1	2	2	0	-1		
A6	0	1	2	1	-1	0		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
Y1	0	2	3	2	1	2	1	
Y2	3	0	1	1	-1	2	1	
Y3	2	1	0	2	2	2	2	
Y4	1	1	1	0	2	2	1	
Y5	-1	-1	2	2	0	2	1	
Y6	2	1	1	2	1	0	2	
Y7	2	2	2	2	1	2	0	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0	2	1	2	4	2	1	0
T2	1	0	2	3	1	2	2	2
T3	1	1	0	2	1	2	1	2
T4	2	2	1	0	1	2	2	2
T5	3	1	1	1	0	1	2	0
T6	1	2	2	3	1	0	1	2
T7	1	3	1	2	1	1	0	2
T8	0	2	-1	2	0	2	2	0

BBH'nın her bir boyut için uygulanmasının çıktısı olarak, OPK'lara atanan normalize edilmiş ağırlıklar elde edilmektedir. Bu ağırlıklar, YSA modeline başlangıç ağırlık vektörleri olarak entegre edilmektedir. Bu aşamada her bir boyutun değerlendirmesi bağımsız olarak yapılmakta olup, her bir boyuta karşılık gelen toplamda beş ayrı model bulunmaktadır. Ayrıca, her bir boyut için eğitim ve test kümeleri, problemin karar verme yapısını oluşturan karar verici grubu tarafından oluşturulmaktadır. Tam olarak gözlemlenebilir bir problem ortamında tüm risk değerlendirme boyutları göz önünde bulundurulduğunda 352.000 gözlem

bulunmaktadır. Ancak YSA kullanılarak toplamda yalnızca 1.000 gözlem ile kabul edilebilir sonuçlara ulaşabilmektedir.

Tablo 4.1'de tanımlanan hidrojen vadisi tasarım risklerini değerlendirmek dokuz katılımcı ile bir anket gerçekleştirilmiştir. Anket katılımcılarına ilişkin detaylı bilgiler Tablo 4.9'da sunulmuştur. Bu risk değerlendirmeleri, daha önce belirtilen eğitim ve test setleri ile eğitilen yapay sinir ağı (YSA) modellerine veri olarak aktarılmıştır.

Tablo 4.9 Anket katılımcıları

Katılımcı	Katılımcının yenilenebilir enerji kapsamında deneyimi	Katılımcının hidrojen enerjisi kapsamında çalıştığı proje sayısı	Katılımcının hidrojen enerjisi kapsamında çıkardığı akademik yayın sayısı
1	10 yıl ve üzeri	1-3	1-3
2	10 yıl ve üzeri	1-3	4-6
3	10 yıl ve üzeri	0	0
4	10 yıl ve üzeri	10 ve üzeri	10 ve üzeri
5	10 yıl ve üzeri	1-3	7-9
6	10 yıl ve üzeri	10 ve üzeri	10 ve üzeri
7	10 yıl ve üzeri	1-3	1-3
8	10 yıl ve üzeri	1-3	4-6
9	10 yıl ve üzeri	10 ve üzeri	10 ve üzeri

YSA modellerinin çıktısı, her bir boyut için belirlenen risklerin Karmaşık, Fırsatçı, Taktiksel ve Stratejik sınıflarına ait olarak sınıflandırılması ve bu sınıflara ait üyelik olasılıklarının belirlenmesidir.

Tablo 4.10, Türkiye'de kurulacak bir hidrojen vadisi için tasarım aşamasında karşılaşılabilecek risklerin, belirlenen OPK'lar doğrultusunda gerçekleştirilen anket değerlendirmelerinin sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.10 Risklerin OPK'lara göre değerlendirilmesi

Risk	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
R1	Ç	Ysk	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	Ysz	E	E	E	E	Vsz	Uyl	Y	KE	Eşn	Ysz	V	KE	Vsz	Uyz	TE	TE	KE	YS	E
R2	Ç	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	D	D	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	E	E	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	V	Uyl	Y	KE	Eşn	Ysz	V	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	E
R3	Ç	O	O	Vsz	TE	KE	YS	Vsz	O	O	O	Vsz	TE	KE	YS	O	E	Vsz	TE	KE	YY	ÇV	Uyl	Y	KE	DA	YS	V	KE	Vsz	Uyz	TE	TE	KE	Ysz	E
R4	N	D	Ysk	V	Y	U	YY	V	Ysk	Ysk	Ysk	V	Y	U	YY	Ykn	Ysz	V	TE	U	YY	V	Uyl	Y	KE	Eşn	YS	V	KE	Vsz	Uyz	TE	TE	KE	YS	E
R5	Ç	Ysk	D	ÇV	E	E	E	ÇV	E	E	E	ÇV	Dtc	Ugz	Ysz	E	E	ÇV	Y	KE	Ysz	V	Uyl	Y	KE	Eşn	Ysz	V	KE	Vsz	Uyz	TE	TE	Ugz	Ysz	E
R6	Ç	O	O	Ysz	TE	KE	YS	Ysz	O	O	O	Ysz	TE	KE	YS	E	E	Vsz	TE	U	YY	V	Uyl	Y	KE	Eşn	Ysz	V	KE	V	Uyl	TE	Y	KE	YS	V
R7	Ç	Ysk	D	Vsz	Ugz	Ugz	Ysz	Vsz	Ysk	Ysk	Ysk	Vsz	Ugz	Ugz	Ysz	E	E	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	ÇV	A	Dtc	KE	Eşn	Ysz	V	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R8	N	Ysk	E	Vsz	Ugz	E	YS	ÇV	Ysk	Ysk	O	Ysz	E	U	YS	O	E	Vsz	TE	KE	Ysz	E	E	Dtc	KE	Eşn	YS	Vsz	E	E	E	E	E	E	E	E
R9	N	O	E	Vsz	Ugz	E	YS	ÇV	Ysk	O	O	Ysz	Ugz	KE	YS	O	Dtc	Ysz	Y	KE	Ysz	E	E	TE	Ugz	E	E	E	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R10	E	E	E	Vsz	Ugz	E	YS	E	Ysk	Ysk	O	Vsz	TE	KE	Ysz	Uzk	Ysz	Ysz	TE	KE	Ysz	V	Uyl	Y	U	Eşn	YY	E	KE	Vsz	Uyl	TE	TE	KE	YS	Vsz
R11	E	E	E	Vsz	Ugz	E	YS	E	D	Ysk	O	V	Y	KE	Ysz	Uzk	Ysz	Ysz	Y	Ugz	Ysz	E	Uyl	Ugz	U	Eşn	YS	E	U	V	A	Y	Y	U	YY	V
R12	Oml	D	E	Vsz	Ugz	E	YS	E	O	O	Ysk	ÇV	Dtc	U	YS	Ykn	Dtc	Ysz	TE	KE	Ysz	Vsz	E	TE	KE	Eşn	YS	Vsz	KE	ÇV	Uyl	Dtc	Dtc	KE	YS	ÇV
R13	N	D	E	Vsz	Ugz	E	YS	V	O	O	O	Ysz	Ugz	KE	YS	Ykn	Dtc	Vsz	TE	KE	Ysz	V	E	Y	U	Eşn	YY	V	UD	Ysz	Uyz	Ugz	TE	Ugz	Ysz	Ysz
R14	N	D	Ysk	Vsz	Ugz	E	YS	V	Ysk	Ysk	O	Vsz	TE	U	YS	Ykn	Dtc	E	Y	KE	Ysz	V	E	Y	KE	Eşn	YY	V	U	V	A	TE	Y	U	YS	V
R15	Oml	D	Ysk	Vsz	Ugz	E	YS	V	O	Ysk	Ysk	Ysz	Ugz	KE	Ysz	O	Dtc	Ysz	TE	KE	Ysz	Vsz	E	TE	Ugz	Eşn	YS	V	UD	Vsz	Uyl	Y	Ugz	KE	YY	Vsz
R16	Oml	D	Ysk	Vsz	Ugz	E	YS	E	Ysk	Ysk	Ysk	Vsz	Ugz	U	YS	Uzk	Dtc	Ysz	Y	KE	Ysz	V	E	Y	KE	Eşn	YY	V	KE	Ysz	Uyz	Ugz	Y	Ugz	Ysz	Ysz
R17	Ç	E	Ysk	Vsz	Ugz	E	YS	E	O	Ysk	O	V	Y	KE	YS	O	Ysz	Ysz	TE	KE	Ysz	Vsz	Uyl	Y	U	Eşn	YY	V	U	V	Uyl	TE	TE	U	YS	V
R18	Ç	D	Ysk	Vsz	Ugz	E	YS	E	O	O	O	Ysz	Ugz	KE	YS	O	Dtc	Vsz	Y	KE	Ysz	Vsz	Uyl	Y	U	Eşn	YY	V	KE	Vsz	E	TE	E	KE	E	Vsz
R19	E	D	O	V	Y	U	YY	V	D	E	D	V	Y	U	YY	E	E	Vsz	Y	KE	Ysz	ÇV	A	Dtc	U	DA	Ysz	ÇV	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R20	N	O	O	Ysz	TE	KE	YS	Ysz	O	O	O	Ysz	TE	KE	YS	E	E	Ysz	Ugz	Ugz	YS	ÇV	A	Dtc	U	DA	Ysz	ÇV	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R21	Ç	Ysk	E	Vsz	E	E	Ysz	Vsz	Ysk	Ysk	Ysk	Vsz	Ugz	Ugz	Ysz	E	E	Vsz	Ugz	KE	YS	V	Uyl	Y	KE	Eşn	Ysz	V	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R22	Ç	O	O	Vsz	TE	KE	YS	Vsz	O	O	O	Vsz	TE	KE	YS	O	E	Vsz	Dtc	U	YY	V	Uyl	Y	U	DA	Ysz	V	UD	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz
R23	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	Ysk	Ysk	ÇV	Dtc	U	YY	E	Ysz	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	KE	V	E	TE	Dtc	E	YY	V
R24	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	O	O	D	Vsz	TE	KE	YS	E	Ysz	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Uyz	Ugz	Ugz	DF	Ysz	Ysz	KE	V	E	Y	Y	KE	YY	V
R25	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	Ysk	Ysk	ÇV	Dtc	U	YY	E	Y	Vsz	TE	KE	YS	Vsz	Uyl	TE	KE	Eşn	YS	Vsz	KE	V	E	Y	Y	U	YY	V
R26	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	E	Dtc	V	Y	U	YY	V	A	Y	U	DA	YY	V	KE	ÇV	E	Y	Y	U	YY	ÇV
R27	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	O	D	Ysz	TE	KE	YS	Ykn	Ysz	ÇV	Dtc	KE	Ysz	ÇV	Uyz	Dtc	KE	DF	YS	ÇV	KE	V	E	Y	Y	U	YY	ÇV
R28	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	Ysk	Ysk	ÇV	Dtc	U	YY	Uzk	Y	Vsz	TE	Ugz	YS	Vsz	Uyl	TE	Ugz	Eşn	Ysz	Ysz	U	ÇV	E	Y	Y	U	YY	ÇV
R29	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	O	O	D	Vsz	Ugz	Ugz	YS	Ykn	Ysz	Ysz	Ugz	KE	Ysz	Ysz	Uyz	Ugz	KE	DF	YS	Vsz	U	ÇV	E	Dtc	Y	U	YY	ÇV
R30	Oml	Ysk	D	Ysz	Ugz	Ugz	Ysz	Ysz	Ysk	O	D	ÇV	Dtc	U	YY	Ykn	Ysz	Ysz	TE	U	YS	V	E	Y	KE	DA	YY	V	U	ÇV	E	Dtc	Y	U	YY	ÇV

Farklı boyutlara ilişkin risk değerlendirmeleri birleştirmek amacıyla, hidrojen enerjisi, bulanık mantık ve karar verme konularında deneyime sahip üç karar vericinin görüşü ile 1024 kural içeren kural tabanlı bir BÇS modeli oluşturulmuştur. YSA modellerinden elde edilen Karmaşık, Fırsatçı, Taktiksel ve Stratejik sınıflarına ait üye olma olasılık değerleri bulanık çıkarım sisteminin girdi değeri olarak kullanılarak hidrojen vadisi tasarımı riskleri için Risk Değerlendirme İndeksi (RDİ) hesaplanır.

			Çevresel															
			Kr				Fr				Tk				St			
			Yönetimsel															
Finansal	**Teknik**	**Altyapısal**	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St
Kr	Kr	Kr	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY	ÇY	Y	O	ÇY	Y	O	O
		Fr	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY	ÇY	Y	Y	ÇY	Y	O	O	Y	O	O	O
		Tk	ÇY	ÇY	Y	Y	ÇY	Y	Y	O	Y	O	O	O	O	O	O	D
		St	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	O	O	O	O	O	O	O	D	D
	Fr	Kr	Y	Y	Y	O	Y	Y	O	D	O	O	O	D	O	D	D	D
		Fr	Y	Y	O	O	Y	O	D	D	O	O	D	D	O	D	D	ÇD
		Tk	Y	O	O	O	Y	O	D	D	O	D	D	D	D	D	D	ÇD
		St	Y	O	O	D	O	O	D	D	O	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD
	Tk	Kr	O	O	O	D	O	O	D	ÇD	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	O	O	D	D	O	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	O	D	D	D	O	D	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	O	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
	St	Kr	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
Fr	Kr	Kr	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY	ÇY	Y	Y	ÇY	Y	Y	O	Y	O	O	O
		Fr	ÇY	ÇY	Y	Y	ÇY	Y	Y	Y	Y	Y	O	O	O	O	O	O
		Tk	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	O	Y	O	O	O	O	O	O	D
		St	Y	Y	Y	O	Y	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	D	D
	Fr	Kr	Y	Y	O	O	Y	O	O	O	O	O	O	D	O	D	D	D
		D	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	O	D	D	D	D	D	D
		Tk	O	O	O	O	O	O	O	D	O	D	D	D	D	D	D	ÇD
		St	O	O	O	D	O	O	D	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	ÇD
	Tk	Kr	O	O	D	D	O	D	D	D	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD
		D	O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	D	D	ÇD	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
	St	Kr	D	ÇD	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
Tk	Kr	Kr	ÇY	ÇY	Y	O	ÇY	Y	Y	O	Y	Y	O	O	O	O	O	O
		Fr	ÇY	Y	O	O	Y	Y	O	O	Y	O	O	O	O	O	O	D
		Tk	Y	Y	O	O	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	O	D	D
		St	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	D	O	D	D	D
	Fr	Kr	Y	O	O	D	O	O	O	D	O	O	D	D	D	D	D	D
		Fr	O	O	O	D	O	O	D	D	O	D	D	D	D	D	D	ÇD
		Tk	O	O	D	D	O	O	D	ÇD	D	D	D	D	D	D	ÇD	ÇD
		St	O	O	D	ÇD	O	D	D	ÇD	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD
	Tk	Kr	O	D	D	ÇD	D	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	O	D	ÇD	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	D	D	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
	St	Kr	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
St	Kr	Kr	ÇY	Y	Y	O	Y	Y	O	O	Y	O	O	O	O	O	O	D
		Fr	Y	Y	O	O	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	O	D	D
		Tk	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	D	O	D	D	D
		St	O	O	O	O	O	O	O	D	O	O	D	D	D	D	D	D
	Fr	Kr	O	O	O	D	O	O	D	D	O	D	D	D	D	D	D	ÇD
		Fr	O	O	D	D	O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	ÇD
		Tk	O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD
		St	D	D	D	D	D	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
	Tk	Kr	D	D	D	ÇD	D	D	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	D	D	ÇD	ÇD	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	D	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
	St	Kr	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Fr	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		Tk	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
		St	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD

Kr: Karmaşık, Fr: Fırsatçı, Tk: Taktiksel, St: Stratejik

Şekil 4.2 Önerilen yöntem kapsamında oluşturulan kural tabanı

4.3 Önerilen Metodolojinin Uygulanması

Verilerin toparlanmasının ardından önerilen metodolojide uygulanması gereken ilk adım karar verme ortamının yapısal modelinin oluşturulmasıdır. Bunun için Tablo 4.8'de verilen ikili karşılaştırmalar Bulanık DEMATEL yönteminin doğrudan ilişki matrisi (T) olarak kullanılır.

Tablo 4.11 Bulanık başlangıç-doğrudan ilişki matrisi (***F***)

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
F1	0	0,500	0,733	0,266	0,500	0,266	0,033	0,266
F2	0,966	0	0,266	0,033	0,266	0,500	0,033	0,033
F3	0,500	0,266	0	0,500	0,733	0,500	0,266	0,500
F4	0,266	0,033	0,266	0	0,500	0,266	0,266	0,266
F5	0,266	0,266	0,733	0,500	0	0,500	0,500	0,500
F6	0,266	0,500	0,500	0,266	0,266	0	0,266	0,266
F7	0,033	0,033	0,266	0,500	0,733	0,266	0	0,266
F8	0,266	0,033	0,500	0,266	0,500	0,266	0,033	0
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
Ç1	0	0,966	0,500	0,266	0,266	0,500	0,266	
Ç2	0,500	0	0,500	0,033	0,266	0,500	0,033	
Ç3	0,500	0,266	0	0,733	0,500	0,266	0,266	
Ç4	0,500	0,033	0,266	0	0,500	0,733	0,500	
Ç5	0,266	0,266	0,500	0,266	0	0,500	0,266	
Ç6	0,500	0,266	0,266	0,500	0,266	0	0,266	
Ç7	0,266	0,033	0,266	0,733	0,266	0,266	0	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
A1	0	0,733	0,266	0,266	0,266	0,033		
A2	0,500	0	0,733	0,500	0,266	0,033		
A3	0,266	0,500	0	0,966	0,500	0,500		
A4	0,266	0,500	0,733	0	0,500	0,266		
A5	0,266	0,266	0,500	0,500	0	0,266		
A6	0,033	0,266	0,500	0,266	0,266	0		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
Y1	0	0,500	0,733	0,500	0,266	0,500	0,266	
Y2	0,733	0	0,266	0,266	0,266	0,500	0,266	
Y3	0,500	0,266	0	0,500	0,500	0,500	0,500	
Y4	0,266	0,266	0,266	0	0,500	0,500	0,266	
Y5	0,266	0,266	0,500	0,500	0	0,500	0,266	
Y6	0,500	0,266	0,266	0,500	0,266	0	0,500	
Y7	0,500	0,500	0,500	0,500	0,266	0,500	0	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0	0,500	0,266	0,500	0,966	0,500	0,266	0,033
T2	0,266	0	0,500	0,733	0,266	0,500	0,500	0,500
T3	0,266	0,266	0	0,500	0,266	0,500	0,266	0,500
T4	0,500	0,500	0,266	0	0,266	0,500	0,500	0,500
T5	0,733	0,266	0,266	0,266	0	0,266	0,500	0,033
T6	0,266	0,500	0,500	0,733	0,266	0	0,266	0,500
T7	0,266	0,733	0,266	0,500	0,266	0,266	0	0,500
T8	0,033	0,500	0,266	0,500	0,033	0,500	0,500	0

Tablo 4.7'de oluşturulan ölçek kullanılarak bulanık sayı formuna dönüştürülen ikili karşılaştırma değerleri, Denklem (3.9) -(3.14) aracılığıyla Tablo 4.11'de gösterilen bulanık başlangıç-doğrudan ilişki matrisi (F) elde edilmesi için kullanır. Ardından her bir risk değerlendirme boyutu için Denklem (3.16) -(3.17) kullanılarak Tablo 4.12'de görülen normalleştirilmiş doğrudan başlangıç ilişki matrisi oluşturulur.

Tablo 4.12 Normalleştirilmiş doğrudan başlangıç ilişki matrisi (***D***)

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
F1	0	0,153	0,224	0,081	0,153	0,081	0,010	0,081
F2	0,295	0	0,081	0,010	0,081	0,153	0,010	0,010
F3	0,153	0,081	0	0,153	0,224	0,153	0,081	0,153
F4	0,081	0,010	0,081	0	0,153	0,081	0,081	0,081
F5	0,081	0,081	0,224	0,153	0	0,153	0,153	0,153
F6	0,081	0,153	0,153	0,081	0,081	0	0,081	0,081
F7	0,010	0,010	0,081	0,153	0,224	0,081	0	0,081
F8	0,081	0,010	0,153	0,081	0,153	0,081	0,010	0
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
Ç1	0	0,349	0,180	0,096	0,096	0,180	0,096	
Ç2	0,180	0	0,180	0,012	0,096	0,180	0,012	
Ç3	0,180	0,096	0	0,265	0,180	0,096	0,096	
Ç4	0,180	0,012	0,096	0	0,180	0,265	0,180	
Ç5	0,096	0,096	0,180	0,096	0	0,180	0,096	
Ç6	0,180	0,096	0,096	0,180	0,096	0	0,096	
Ç7	0,096	0,012	0,096	0,265	0,096	0,096	0	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
A1	0	0,268	0,097	0,097	0,097	0,012		
A2	0,182	0	0,268	0,182	0,097	0,012		
A3	0,097	0,182	0	0,353	0,182	0,182		
A4	0,097	0,182	0,268	0	0,182	0,097		
A5	0,097	0,097	0,182	0,182	0	0,097		
A6	0,012	0,097	0,182	0,097	0,097	0		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
Y1	0	0,180	0,265	0,180	0,096	0,180	0,096	
Y2	0,265	0	0,096	0,096	0,096	0,180	0,096	
Y3	0,180	0,096	0	0,180	0,180	0,180	0,180	
Y4	0,096	0,096	0,096	0	0,180	0,180	0,096	
Y5	0,096	0,096	0,180	0,180	0	0,180	0,096	
Y6	0,180	0,096	0,096	0,180	0,096	0	0,180	
Y7	0,180	0,180	0,180	0,180	0,096	0,180	0	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0	0,153	0,081	0,153	0,295	0,153	0,081	0,010
T2	0,081	0	0,153	0,224	0,081	0,153	0,153	0,153
T3	0,081	0,081	0	0,153	0,081	0,153	0,081	0,153
T4	0,153	0,153	0,081	0	0,081	0,153	0,153	0,153
T5	0,224	0,081	0,081	0,081	0	0,081	0,153	0,010
T6	0,081	0,153	0,153	0,224	0,081	0	0,081	0,153
T7	0,081	0,224	0,081	0,153	0,081	0,081	0	0,153
T8	0,010	0,153	0,081	0,153	0,010	0,153	0,153	0

Normalleştirilmiş değerler ve Denklem (3.19) kullanılarak toplam ilişki matrisi (M) oluşturulur. Her bir boyut için ilişki değerleri Tablo 4.13'te görülebilir.

Tablo 4.13 Toplam ilişki matrisi (***M***)

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
F1	0,373	0,393	0,660	0,416	0,606	0,452	0,239	0,400
F2	0,561	0,238	0,479	0,290	0,460	0,441	0,190	0,277
F3	0,550	0,376	0,565	0,547	0,755	0,573	0,349	0,524
F4	0,320	0,194	0,420	0,258	0,484	0,343	0,247	0,317
F5	0,486	0,365	0,736	0,547	0,570	0,569	0,405	0,520
F6	0,398	0,358	0,538	0,372	0,491	0,326	0,269	0,354
F7	0,283	0,205	0,453	0,425	0,579	0,373	0,199	0,346
F8	0,338	0,205	0,494	0,342	0,495	0,356	0,191	0,253
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
Ç1	0,716	0,844	0,797	0,760	0,668	0,914	0,542	
Ç2	0,671	0,421	0,621	0,515	0,508	0,700	0,351	
Ç3	0,836	0,615	0,612	0,883	0,725	0,836	0,553	
Ç4	0,817	0,536	0,681	0,664	0,703	0,937	0,610	
Ç5	0,649	0,516	0,654	0,641	0,463	0,752	0,461	
Ç6	0,723	0,534	0,597	0,705	0,558	0,618	0,471	
Ç7	0,603	0,401	0,541	0,735	0,521	0,654	0,361	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
A1	0,245	0,577	0,518	0,500	0,384	0,203		
A2	0,461	0,466	0,765	0,699	0,483	0,279		
A3	0,455	0,712	0,691	0,936	0,641	0,477		
A4	0,412	0,642	0,812	0,587	0,578	0,372		
A5	0,346	0,485	0,635	0,623	0,342	0,318		
A6	0,217	0,390	0,531	0,461	0,356	0,184		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
Y1	1,273	1,136	1,396	1,445	1,095	1,527	1,102	
Y2	1,311	0,851	1,113	1,200	0,943	1,332	0,953	
Y3	1,416	1,074	1,184	1,448	1,155	1,525	1,161	
Y4	1,050	0,835	0,986	0,985	0,916	1,198	0,856	
Y5	1,151	0,911	1,142	1,242	0,846	1,307	0,939	
Y6	1,232	0,932	1,099	1,256	0,941	1,170	1,011	
Y7	1,427	1,141	1,335	1,445	1,091	1,527	1,009	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0,660	0,999	0,723	1,112	0,875	0,940	0,841	0,732
T2	0,748	0,943	0,827	1,251	0,719	1,009	0,952	0,930
T3	0,613	0,829	0,555	0,983	0,592	0,835	0,730	0,767
T4	0,766	1,023	0,730	1,002	0,694	0,956	0,903	0,874
T5	0,711	0,781	0,592	0,865	0,519	0,726	0,740	0,590
T6	0,707	1,012	0,785	1,184	0,679	0,824	0,845	0,879
T7	0,666	1,018	0,688	1,070	0,642	0,847	0,725	0,832
T8	0,516	0,850	0,604	0,943	0,491	0,795	0,753	0,614

Bulanık DEMATEL yönteminin uygulanması sonucu, Denklem (3.22) ve (3.23) aracılığıyla satır ve sütun değerleri toplanmış, böylece ortaya çıkan ilişki ve belirginlik değerleri Tablo 4.14'te gösterilmiştir.

Tablo 4.14 İlişki ve belirginlik değerleri

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
D	3,543	2,939	4,241	2,586	4,201	3,109	2,866	2,677
R	3,312	2,335	4,348	3,199	4,444	3,436	2,093	2,995
D+R	6,856	5,274	8,589	5,786	8,645	6,545	4,960	5,672
D-R	0,230	0,604	-0,107	-0,613	-0,242	-0,326	0,773	-0,318
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
D	5,244	3,791	5,063	4,951	4,139	4,210	3,819	
R	5,018	3,871	4,505	4,907	4,149	5,414	3,351	
D+R	10,262	7,662	9,569	9,858	8,289	9,624	7,170	
D-R	0,226	-0,080	0,557	0,044	-0,010	-1,204	0,467	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
D	2,428	3,155	3,913	3,405	2,751	2,141		
R	2,138	3,273	3,954	3,809	2,78	1,835		
D+R	4,566	6,429	7,868	7,214	5,537	3,977		
D-R	0,290	-0,118	-0,040	-0,403	-0,034	0,306		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
D	8,977	7,706	8,966	6,829	7,540	7,644	8,978	
R	8,864	6,883	8,257	9,025	6,990	9,588	7,033	
D+R	17,841	14,590	17,223	15,854	14,531	17,232	16,011	
D-R	0,112	0,823	0,709	-2,196	0,550	-1,943	1,944	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
D	6,886	7,383	5,907	6,951	5,528	6,919	6,491	5,570
R	5,391	7,459	5,508	8,414	5,214	6,934	6,493	6,222
D+R	12,278	14,843	11,415	15,366	10,743	13,854	12,985	11,792
D-R	1,495	-0,076	0,399	-1,462	0,313	-0,015	-0,001	-0,652

Her bir risk değerlendirme boyutu için oluşturulan toplam ilişki matrisine ait eşik değerler Denklem (3.21) kullanılarak hesaplanır. Bu değerlerin altında bulunan ilişkiler etkisiz sayıldığında elde edilen sadeleştirilmiş ilişki matrisi Tablo 4.15'te görülmektedir.

Tablo 4.15 Sadeleştirilmiş ilişki matrisi

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
F1	0	0	0,660	0,4164	0,6065	0,452	0	0
F2	0,561	0	0,479	0	0,4605	0,441	0	0
F3	0,550	0	0	0,5471	0,7555	0,573	0	0,524
F4	0	0	0,420	0	0,4842	0	0	0
F5	0,486	0	0,736	0,5476	0	0,569	0	0,520
F6	0	0	0,538	0	0,4912	0	0	0
F7	0	0	0,453	0,4257	0,5798	0	0	0
F8	0	0	0,494	0	0,4958	0	0	0

Tablo 4.15 Sadeleştirilmiş ilişki matrisi (devamı)

B2	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7
Ç1	0	0,844	0,797	0,760	0,668	0,914	0
Ç2	0,671	0	0	0	0	0,706	0
Ç3	0,836	0	0	0,883	0,725	0,836	0
Ç4	0,817	0	0,681	0	0,703	0,937	0
Ç5	0,649	0	0,654	0,641	0	0,752	0
Ç6	0,723	0	0	0,705	0	0	0
Ç7	0	0	0	0,735	0	0,654	0
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	
A1	0	0,577	0,518	0,504	0	0	
A2	0	0	0,765	0,699	0	0	
A3	0	0,712	0	0,936	0,641	0	
A4	0	0,642	0,812	0	0,578	0	
A5	0	0	0,635	0,623	0	0	
A6	0	0	0,531	0	0	0	
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**
Y1	0	0	1,396	1,445	0	1,527	0
Y2	1,311	0	0	1,204	0	1,332	0
Y3	1,416	0	0	1,448	0	1,525	1,161
Y4	0	0	0	0	0	1,198	0
Y5	0	0	0	1,242	0	1,307	0
Y6	1,232	0	0	1,256	0	0	0
Y7	1,427	0	1,335	1,445	0	1,527	0
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0	0,999	0	1,112	0,875	0,940	0,841	0
T2	0	0	0,827	1,251	0	1,093	0,952	0,930
T3	0	0,829	0	0,983	0	0,835	0	0
T4	0	1,023	0	0	0	0,956	0,903	0,874
T5	0	0	0	0,865	0	0	0	0
T6	0	1,012	0	1,184	0	0	0,845	0,879
T7	0	1,018	0	1,070	0	0,847	0	0,832
T8	0	0,850	0	0,943	0	0	0	0

Sadeleştirilmiş ilişki değerleri, Tablo 4.8'de verilen korelasyon değerlendirmeleri de dahil edilerek bulanık DEMATEL ile entegre edilmiş BBH'nin girdi değerleri Tablo 4.16'da sunulmaktadır.

Tablo 4.16 BBH ilişki matrisi

B1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
F1	0	0	0,660	0,416	0,606	0,452	0	0
F2	-0,561	0	0,479	0	-0,460	-0,441	0	0
F3	0,550	0	0	0,547	0,755	0,573	0	-0,524
F4	0	0	0,420	0	0,484	0	0	0
F5	0,486	0	0,736	0,547	0	0,569	0	-0,520
F6	0	0	0,538	0	0,491	0	0	0
F7	0	0	-0,453	-0,425	-0,579	0	0	0
F8	0	0	-0,494	0	-0,495	0	0	0

Tablo 4.16 BBH ilişki matrisi (devamı)

B2	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7
Ç1	0	0,844	0,797	-0,760	0,668	0,914	0
Ç2	0,671	0	0	0	0	0,707	0
Ç3	0,836	0	0	-0,883	0,725	0,836	0
Ç4	-0,817	0	0,681	0	0,703	0,937	0
Ç5	0,649	0	0,654	0,641	0	0,752	0
Ç6	0,723	0	0	0,705	0	0	0
Ç7	0	0	0	0,735	0	-0,654	0
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	
A1	0	0,577	-0,518	0,504	0	0	
A2	0	0	0,765	0,699	0	0	
A3	0	0,712	0	0,936	0,641	0	
A4	0	0,642	0,812	0	0,578	0	
A5	0	0	0,635	0,623	0	0	
A6	0	0	0,531	0	0	0	
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**
Y1	0	0	1,396	1,445	0	1,527	0
Y2	1,311	0	0	1,204	0	1,332	0
Y3	1,416	0	0	1,448	0	1,525	1,161
Y4	0	0	0	0	0	1,198	0
Y5	0	0	0	1,242	0	1,307	0
Y6	1,232	0	0	1,256	0	0	0
Y7	1,427	0	1,335	1,445	0	1,527	0
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
T1	0	0,999	0	1,112	0,875	0,940	0,841	0
T2	0	0	0,827	1,251	0	1,093	0,952	0,930
T3	0	0,829	0	0,983	0	0,835	0	0
T4	0	1,023	0	0	0	0,956	0,903	0,874
T5	0	0	0	0,865	0	0	0	0
T6	0	1,012	0	1,184	0	0	0,845	0,879
T7	0	1,018	0	1,070	0	0,847	0	0,832
T8	0	0,850	0	0,943	0	0	0	0

Bulanık bilişsel haritalama yönteminin uygulanması için gerekli ilişki matrisi oluşturulmuş olur. OPK'ların ağırlık vektörünün belirlenebilmesi için BBH uygulamasının bir sonraki adımı başlangıç vektörünün belirlenmesidir. Başlangıç vektörü, tüm elemanları 1 olan ve ilgili boyutlara uygun şekilde tanımlanmış bir vektör olarak atanmıştır. Böylece başlangıç durumunda tüm OPK'ların önem derecesi eşit olarak alınmıştır.

Tablo 4.17, Denklem (3.26) kullanılarak 8 iterasyon boyunca gerçekleştirilen etki hesabının sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.17 Güncellenen etki hesabı

	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
F1	2,136	1,655	1,564	1,541	1,535	1,533	1,532	1,532
F2	-0,984	-0,770	-0,721	-0,710	-0,707	-0,706	-0,706	-0,706
F3	1,903	1,616	1,524	1,498	1,490	1,488	1,487	1,487
F4	0,905	0,730	0,694	0,684	0,681	0,680	0,679	0,679
F5	1,819	1,551	1,464	1,438	1,431	1,429	1,428	1,428
F6	1,030	0,831	0,791	0,779	0,775	0,774	0,774	0,774
F7	-1,459	-1,141	-1,080	-1,064	-1,059	-1,058	-1,057	-1,057
F8	-0,990	-0,799	-0,760	-0,748	-0,745	-0,744	-0,743	-0,743
Ç1	2,465	1,960	1,854	1,825	1,818	1,816	1,815	1,815
Ç2	1,373	1,111	1,047	1,031	1,026	1,025	1,025	1,025
Ç3	1,515	1,295	1,230	1,211	1,205	1,204	1,204	1,204
Ç4	1,506	1,167	1,102	1,085	1,080	1,079	1,079	1,079
Ç5	2,697	2,140	2,015	1,984	1,975	1,973	1,973	1,973
Ç6	1,430	1,164	1,093	1,076	1,072	1,070	1,070	1,070
Ç7	0,082	0,068	0,060	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
A1	0,560	0,423	0,399	0,393	0,391	0,391	0,390	0,390
A2	1,465	1,215	1,144	1,125	1,120	1,119	1,118	1,118
A3	2,290	1,804	1,698	1,671	1,664	1,662	1,661	1,661
A4	2,033	1,615	1,521	1,497	1,490	1,489	1,488	1,488
A5	1,259	1,044	0,983	0,966	0,962	0,961	0,961	0,960
A6	0,532	0,446	0,420	0,413	0,411	0,410	0,410	0,410
Y1	4,369	3,730	3,589	3,555	3,547	3,545	3,544	3,544
Y2	3,845	3,263	3,130	3,098	3,090	3,088	3,087	3,087
Y3	5,552	4,834	4,663	4,621	4,610	4,608	4,607	4,607
Y4	1,198	1,020	0,975	0,964	0,961	0,960	0,960	0,960
Y5	2,549	2,045	1,943	1,919	1,914	1,912	1,912	1,912
Y6	2,489	2,096	2,013	1,993	1,988	1,987	1,987	1,987
Y7	5,736	5,008	4,833	4,789	4,778	4,776	4,775	4,775
T1	4,770	4,236	4,131	4,109	4,104	4,103	4,103	4,103
T2	4,972	4,406	4,302	4,279	4,274	4,273	4,273	4,273
T3	2,647	2,459	2,410	2,399	2,396	2,396	2,396	2,396
T4	3,758	3,384	3,309	3,292	3,288	3,287	3,287	3,287
T5	0,866	0,792	0,776	0,772	0,771	0,771	0,770	0,770
T6	3,923	3,528	3,449	3,431	3,427	3,427	3,426	3,426
T7	3,769	3,398	3,322	3,306	3,302	3,301	3,301	3,301
T8	1,795	1,674	1,641	1,634	1,632	1,632	1,632	1,632

Etki hesabı ve Denklem (3.25)'te verilen yakınsama fonksiyonu yardımıyla her bir OPK'nın ilgili boyut üzerindeki toplam etkisi a $s^{(t)}$ hesaplanır. 8 iterasyon boyunca güncellenen a $s^{(t)}$ değerleri Tablo 4.18'de görülmektedir. $s^{(t)}$ vektörü, her bir risk

değerlendirme boyutu kapsamında OPK'nın toplam ağırlığını temsil etmektedir. Yinelemeli hesaplama süreci sonunda, bu vektörün bileşenlerinin kararlı bir değere ulaşarak yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.18 Güncellenen ağırlık vektörü

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
F1	1	0,828	0,776	0,763	0,760	0,759	0,759	0,759	0,759
F2	1	0,502	0,467	0,468	0,470	0,470	0,471	0,471	0,471
F3	1	0,810	0,771	0,759	0,756	0,755	0,754	0,754	0,754
F4	1	0,722	0,674	0,665	0,662	0,662	0,662	0,662	0,662
F5	1	0,804	0,764	0,753	0,749	0,748	0,748	0,748	0,748
F6	1	0,734	0,686	0,677	0,674	0,674	0,673	0,673	0,673
F7	1	0,443	0,414	0,418	0,420	0,421	0,421	0,421	0,421
F8	1	0,501	0,463	0,463	0,464	0,465	0,465	0,465	0,465
Ç1	1	0,850	0,803	0,791	0,787	0,786	0,786	0,786	0,786
Ç2	1	0,766	0,719	0,707	0,705	0,704	0,704	0,704	0,704
Ç3	1	0,779	0,738	0,728	0,725	0,724	0,724	0,724	0,724
Ç4	1	0,778	0,726	0,714	0,711	0,710	0,710	0,710	0,710
Ç5	1	0,864	0,818	0,805	0,801	0,800	0,800	0,800	0,800
Ç6	1	0,771	0,725	0,713	0,710	0,709	0,709	0,709	0,709
Ç7	1	0,632	0,587	0,580	0,579	0,579	0,579	0,579	0,579
A1	1	0,686	0,635	0,626	0,625	0,624	0,624	0,624	0,624
A2	1	0,774	0,730	0,719	0,715	0,715	0,714	0,714	0,714
A3	1	0,838	0,789	0,776	0,773	0,772	0,772	0,771	0,771
A4	1	0,820	0,772	0,759	0,755	0,755	0,754	0,754	0,754
A5	1	0,756	0,711	0,700	0,697	0,696	0,696	0,696	0,696
A6	1	0,683	0,637	0,629	0,627	0,627	0,627	0,627	0,627
Y1	1	0,936	0,912	0,905	0,903	0,902	0,902	0,902	0,902
Y2	1	0,919	0,890	0,882	0,880	0,879	0,879	0,879	0,879
Y3	1	0,964	0,948	0,943	0,942	0,941	0,941	0,941	0,941
Y4	1	0,750	0,708	0,699	0,697	0,696	0,696	0,696	0,696
Y5	1	0,855	0,810	0,798	0,796	0,795	0,795	0,795	0,795
Y6	1	0,851	0,814	0,804	0,802	0,801	0,801	0,801	0,801
Y7	1	0,967	0,952	0,947	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946
T1	1	0,947	0,930	0,926	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925
T2	1	0,952	0,936	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
T3	1	0,861	0,840	0,836	0,834	0,834	0,834	0,834	0,834
T4	1	0,915	0,896	0,891	0,890	0,890	0,890	0,890	0,890
T5	1	0,718	0,680	0,674	0,673	0,673	0,673	0,673	0,673
T6	1	0,921	0,902	0,898	0,897	0,897	0,897	0,897	0,897
T7	1	0,916	0,896	0,892	0,891	0,891	0,891	0,890	0,890
T8	1	0,802	0,775	0,770	0,769	0,769	0,769	0,769	0,769

$s^{(t)}$ vektöründe değerler [0,1] aralığındadır. Yakınsanan ağırlık değerlerinin normalize edilmiş hali Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19 Normalize edilmiş ağırlıklar

B1. Finansal		**B2. Çevresel**		**B3. Altyapısal**		**B4. Yönetimsel**		**B5. Teknik**	
F1	0,153	Ç1	0,157	A1	0,149	Y1	0,151	T1	0,136
F2	0,095	Ç2	0,140	A2	0,171	Y2	0,147	T2	0,137
F3	0,152	Ç3	0,144	A3	0,184	Y3	0,158	T3	0,123
F4	0,134	Ç4	0,142	A4	0,180	Y4	0,117	T4	0,131
F5	0,151	Ç5	0,160	A5	0,166	Y5	0,133	T5	0,099
F6	0,136	Ç6	0,141	A6	0,150	Y6	0,134	T6	0,132
F7	0,085	Ç7	0,116			Y7	0,159	T7	0,131
F8	0,094							T8	0,113

BBH çıktısı ile elde edilen ağırlıklar, uzmanların risk değerlendirme boyutları kapsamında performans koşullarının yapısal model içerisindeki etkisini ifade etmektedir. Bu değerler, belirlenen risklerin bağlamsal kontrol moduna göre sınıflandırılması için oluşturulan YSA modellerinde ilk ağırlık olarak kullanılarak uzman yargılarının risk değerlendirme sürecine sistematik biçimde entegre edilmesi ve model çıktıları üzerindeki etkisinin korunması hedeflenmiştir. ÇKA modelleri Python yazılım dili kullanılarak Keras kütüphanesi aracılığıyla oluşturulmuştur.

Tablo 4.20 ÇKA modellerine ait metrikler

	B1			**B2**			**B3**			**B4**			**B5**		
Eğitim Seti	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**
Karmaşık	0,91	1,00	0,95	0,98	1,00	0,99	0,93	1,00	0,96	0,91	1,00	0,95	0,95	1,00	0,98
Fırsatçı	0,97	0,93	0,95	0,97	0,97	0,97	0,97	0,93	0,95	0,97	0,82	0,89	1,00	0,93	0,96
Taktiksel	0,92	0,85	0,88	1,00	0,85	0,92	1,00	0,88	0,93	0,87	0,82	0,85	0,97	0,93	0,95
Stratejik	0,90	0,93	0,91	0,89	1,00	0,94	0,91	1,00	0,95	0,86	0,95	0,90	0,93	1,00	0,96
Doğruluk			0,93			0,96			0,95			0,90			0,96
Makro Ortalama	0,93	0,93	0,92	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90	0,96	0,96	0,96
Ağırlıklı Ortalama	0,93	0,93	0,92	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90	0,96	0,96	0,96
Test Seti	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**	**K**	**D**	**F1**
Karmaşık	0,91	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	0,83	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fırsatçı	0,90	0,90	0,90	0,83	1,00	0,91	0,88	0,70	0,78	1,00	0,80	0,89	1,00	0,80	0,89
Taktiksel	0,89	0,80	0,84	1,00	0,70	0,82	0,80	0,80	0,80	0,75	0,60	0,67	0,83	1,00	0,91
Stratejik	0,90	0,90	0,90	0,91	1,00	0,95	0,90	0,90	0,90	0,71	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00
Doğruluk			0,90			0,93			0,85			0,85			0,95
Makro Ortalama	0,90	0,90	0,90	0,94	0,93	0,92	0,85	0,85	0,85	0,87	0,85	0,85	0,96	0,95	0,95
Ağırlıklı Ortalama	0,90	0,90	0,90	0,94	0,93	0,92	0,85	0,85	0,85	0,87	0,85	0,85	0,96	0,95	0,95

K: Kesinlik, D: Duyarlılık, F1: F1-Skoru

Tablo 4.20, ÇKA algoritması ve Tablo 4.19'daki ağırlıklar kullanılarak oluşturulan ve hiperparametre optimizasyonu sonucu elde edilen modellerin eğitim ve test setlerine ilişkin performans metriklerini göstermektedir.

İlgili modellerin eğitim ve test veri setleri, Bölüm 4.2'de toplanan uzman görüşleri ile oluşturulmuş olup K, D ve F1 sırasıyla Kesinlik, Duyarlılık ve F1 skorunu ifade etmektedir. Eğitim setlerinin her biri 160, test setlerinin ise her biri 40'ar satırdan oluşmakta olup her bir sınıfa ait gözlem sayısı eşit olarak dağıtılmıştır. Tablo 4.21, hiperparametre optimizasyonu sonucu elde edilen parametreleri göstermektedir.

Tablo 4.21 ÇKA modellerine ait parametreler

Parametreler	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**
units1	32	32	128	16	32
activation1	relu	relu	sigmoid	relu	relu
l2	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
dropout1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
units2	16	16	48	16	16
activation2	relu	relu	tanh	relu	relu
dropout2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
optimizer	adam	adam	adam	adam	adam
adam_lr	0,001	0,001	0,01	0,001	0,001

Burada units1 ve units2 sırasıyla 1. ve 2. gizli katmanda bulunan nöron sayısını, activation1 ve activation2 sırasıyla 1. ve 2. gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonunu, dropout1 ve dropout2 aşırı öğrenmeyi engellemek için rastgele devre dışı bırakılan nöron oranını, optimizer kullanılan optimizasyon algoritmasını ve adam_lr öğrenme oranını ve l2 aşırı öğrenmeyi azaltmak için kullanılan regülarizasyon katsayısını ifade eder.

Oluşturulan YSA modelleri, hidrojen vadisi tasarım risklerinin CREAM'de tanımlanan bağlamsal kontrol moduna ait sınıflandırılmasını ilişkin olasılık dağılımlarını elde etmek için kullanılır. Bu bağlamda Tablo 4.22 risklerin Karmaşık, Fırsatçı, Taktiksel ve Stratejik modlarına ait olma olasılıklarını göstermektedir.

Tablo 4.22 Risklerin bağlamsal kontrol modeline göre olasılık dağılımları

Risk	B1				B2				B3				B4				B5			
	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St
R1	0,67	0,29	0,03	0,02	0,48	0,39	0,05	0,08	0,48	0,51	0,01	0,00	0,04	0,53	0,40	0,04	0,15	0,71	0,14	0,00
R2	0,75	0,24	0,00	0,00	0,89	0,11	0,00	0,00	0,97	0,03	0,00	0,00	0,03	0,45	0,40	0,11	0,98	0,02	0,00	0,00
R3	0,00	0,39	0,56	0,05	0,00	0,09	0,84	0,07	0,00	0,19	0,80	0,01	0,00	0,14	0,49	0,37	0,20	0,70	0,10	0,00
R4	0,00	0,02	0,32	0,66	0,00	0,00	0,12	0,87	0,00	0,01	0,94	0,05	0,01	0,30	0,52	0,17	0,15	0,71	0,14	0,00
R5	0,16	0,70	0,06	0,08	0,10	0,55	0,18	0,17	0,00	0,05	0,84	0,10	0,03	0,45	0,40	0,11	0,39	0,56	0,05	0,00
R6	0,01	0,77	0,19	0,02	0,00	0,17	0,77	0,05	0,00	0,14	0,81	0,05	0,03	0,45	0,40	0,11	0,03	0,29	0,66	0,02
R7	0,33	0,64	0,02	0,01	0,01	0,23	0,59	0,17	0,97	0,03	0,00	0,00	0,01	0,14	0,47	0,38	0,98	0,02	0,00	0,00
R8	0,04	0,64	0,23	0,09	0,00	0,03	0,38	0,59	0,01	0,95	0,04	0,00	0,04	0,36	0,50	0,11	0,12	0,07	0,13	0,67
R9	0,01	0,36	0,48	0,15	0,00	0,20	0,68	0,11	0,00	0,18	0,82	0,00	0,68	0,25	0,04	0,03	0,98	0,02	0,00	0,00
R10	0,48	0,35	0,11	0,06	0,00	0,05	0,82	0,12	0,91	0,09	0,00	0,00	0,00	0,12	0,23	0,65	0,07	0,55	0,38	0,00
R11	0,48	0,35	0,11	0,06	0,00	0,05	0,81	0,14	0,96	0,04	0,00	0,00	0,04	0,44	0,29	0,23	0,00	0,00	0,19	0,80
R12	0,06	0,19	0,43	0,32	0,00	0,01	0,12	0,87	0,00	0,06	0,93	0,01	0,08	0,64	0,27	0,01	0,00	0,02	0,57	0,40
R13	0,01	0,40	0,42	0,18	0,01	0,30	0,64	0,05	0,00	0,03	0,96	0,01	0,01	0,10	0,31	0,58	0,97	0,03	0,00	0,00
R14	0,00	0,19	0,56	0,25	0,00	0,03	0,54	0,43	0,00	0,00	0,14	0,86	0,01	0,20	0,41	0,38	0,01	0,05	0,55	0,39
R15	0,00	0,13	0,51	0,36	0,01	0,23	0,65	0,11	0,00	0,61	0,39	0,00	0,14	0,64	0,21	0,02	0,08	0,51	0,41	0,01
R16	0,01	0,09	0,51	0,39	0,00	0,02	0,32	0,66	0,01	0,96	0,03	0,00	0,01	0,20	0,41	0,38	0,84	0,16	0,01	0,00
R17	0,15	0,55	0,22	0,08	0,00	0,02	0,58	0,40	0,05	0,94	0,01	0,00	0,00	0,17	0,58	0,26	0,02	0,14	0,74	0,10
R18	0,05	0,42	0,35	0,17	0,01	0,30	0,64	0,05	0,00	0,07	0,92	0,01	0,00	0,17	0,58	0,26	0,05	0,43	0,49	0,02
R19	0,00	0,09	0,42	0,48	0,00	0,06	0,75	0,19	0,02	0,95	0,03	0,00	0,00	0,04	0,22	0,74	0,98	0,02	0,00	0,00
R20	0,00	0,37	0,58	0,05	0,00	0,17	0,77	0,05	0,97	0,03	0,00	0,00	0,00	0,04	0,22	0,74	0,98	0,02	0,00	0,00
R21	0,40	0,50	0,07	0,03	0,01	0,23	0,59	0,17	0,61	0,39	0,00	0,00	0,03	0,45	0,40	0,11	0,98	0,02	0,00	0,00
R22	0,00	0,39	0,56	0,05	0,00	0,09	0,84	0,07	0,00	0,01	0,72	0,27	0,01	0,21	0,42	0,36	0,98	0,02	0,00	0,00
R23	0,74	0,24	0,02	0,01	0,00	0,00	0,08	0,92	0,48	0,51	0,01	0,00	0,44	0,24	0,07	0,25	0,01	0,09	0,60	0,29
R24	0,74	0,24	0,02	0,01	0,01	0,26	0,70	0,03	0,97	0,03	0,00	0,00	0,86	0,13	0,01	0,00	0,01	0,12	0,67	0,19
R25	0,74	0,24	0,02	0,01	0,00	0,00	0,08	0,92	0,00	0,53	0,46	0,00	0,03	0,61	0,35	0,01	0,01	0,04	0,47	0,48
R26	0,74	0,24	0,02	0,01	0,33	0,55	0,11	0,01	0,00	0,00	0,04	0,96	0,00	0,04	0,27	0,70	0,00	0,01	0,28	0,71
R27	0,74	0,24	0,02	0,01	0,01	0,34	0,60	0,05	0,00	0,02	0,89	0,09	0,03	0,34	0,47	0,16	0,00	0,02	0,43	0,55
R28	0,74	0,24	0,02	0,01	0,00	0,00	0,08	0,92	0,03	0,95	0,02	0,00	0,41	0,53	0,07	0,00	0,00	0,00	0,13	0,87

Tablo 4.22 Risklerin bağlamsal kontrol modeline göre olasılık dağılımları (devamı)

Risk	B1				B2				B3				B4				B5			
	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St	Kr	Fr	Tk	St
R29	0,74	0,24	0,02	0,01	0,15	0,67	0,17	0,01	0,61	0,39	0,00	0,00	0,43	0,51	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10	0,90
R30	0,74	0,24	0,02	0,01	0,00	0,01	0,14	0,85	0,00	0,56	0,43	0,00	0,01	0,11	0,36	0,53	0,00	0,00	0,10	0,90

Kr: Karmaşık, Fr: Fırsatçı; Tk: Taktiksel; St: Stratejik

Hidrojen vadisi tasarım süreci için belirlenen riskler Tablo 4.22'de verilen olasılık dağılımları dikkate alınarak, en yüksek olasılık değerine sahip kontrol moduna atanır. Sınıflandırma sonuçları Tablo 4.23'te verilmektedir.

Tablo 4.23 Risklerin bağlamsal kontrol modeline göre sınıflandırılması

Risk	B1	B2	B3	B4	B5	Risk	B1	B2	B3	B4	B5
R1	Karmaşık	Karmaşık	Fırsatçı	Fırsatçı	Fırsatçı	R16	Taktiksel	Stratejik	Fırsatçı	Taktiksel	Karmaşık
R2	Karmaşık	Karmaşık	Karmaşık	Fırsatçı	Karmaşık	R17	Fırsatçı	Taktiksel	Fırsatçı	Taktiksel	Taktiksel
R3	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Fırsatçı	R18	Fırsatçı	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel
R4	Stratejik	Stratejik	Taktiksel	Taktiksel	Fırsatçı	R19	Stratejik	Taktiksel	Fırsatçı	Stratejik	Karmaşık
R5	Fırsatçı	Fırsatçı	Taktiksel	Fırsatçı	Fırsatçı	R20	Taktiksel	Taktiksel	Karmaşık	Stratejik	Karmaşık
R6	Fırsatçı	Taktiksel	Taktiksel	Fırsatçı	Taktiksel	R21	Fırsatçı	Taktiksel	Karmaşık	Fırsatçı	Karmaşık
R7	Fırsatçı	Taktiksel	Karmaşık	Taktiksel	Karmaşık	R22	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Karmaşık
R8	Fırsatçı	Stratejik	Fırsatçı	Taktiksel	Stratejik	R23	Karmaşık	Stratejik	Fırsatçı	Karmaşık	Taktiksel
R9	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Karmaşık	Karmaşık	R24	Karmaşık	Taktiksel	Karmaşık	Karmaşık	Taktiksel
R10	Karmaşık	Taktiksel	Karmaşık	Stratejik	Fırsatçı	R25	Karmaşık	Stratejik	Fırsatçı	Fırsatçı	Stratejik
R11	Karmaşık	Taktiksel	Karmaşık	Fırsatçı	Stratejik	R26	Karmaşık	Fırsatçı	Stratejik	Stratejik	Stratejik
R12	Taktiksel	Stratejik	Taktiksel	Fırsatçı	Taktiksel	R27	Karmaşık	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Stratejik
R13	Taktiksel	Taktiksel	Taktiksel	Stratejik	Karmaşık	R28	Karmaşık	Stratejik	Fırsatçı	Fırsatçı	Stratejik
R14	Taktiksel	Taktiksel	Stratejik	Taktiksel	Taktiksel	R29	Karmaşık	Fırsatçı	Karmaşık	Fırsatçı	Stratejik
R15	Taktiksel	Taktiksel	Fırsatçı	Fırsatçı	Fırsatçı	R30	Karmaşık	Stratejik	Fırsatçı	Stratejik	Stratejik

Farklı boyutlar kapsamında gerçekleştirilen risk değerlendirmelerinin birleştirilmesi ve nihai bir risk değerlendirme indeksinin (RDİ) hesaplanabilmesi için BÇS kullanılır. Bu doğrultuda Mamdani çıkarım sistemine Şekil 4.2'de oluşturulan kural tabanı ile Tablo 4.22'de gösterilen olasılık değerleri girdi olarak kullanılır. BÇS, riskleri Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek veya Çok Yüksek kümelerine aitlik derecelerini hesaplamaktadır. Bu değerler Denklem (3.39) kullanılarak RDİ değerlerine dönüştürülmektedir.

Tablo 4.24 BÇS çıktı değerleri

Risk	ÇD	D	O	Y	ÇY	RDİ
R1	0,079	0,394	0,398	0,479	0,153	53,929
R2	0,000	0,021	0,021	0,110	0,451	90,877
R3	0,099	0,488	0,203	0,135	0,002	35,402
R4	0,524	0,303	0,153	0,013	0,002	17,072
R5	0,110	0,179	0,451	0,393	0,099	53,950
R6	0,451	0,289	0,172	0,034	0,033	22,688
R7	0,017	0,019	0,376	0,470	0,227	69,610
R8	0,498	0,132	0,123	0,123	0,036	25,036
R9	0,017	0,112	0,480	0,358	0,177	62,380
R10	0,379	0,482	0,231	0,071	0,071	29,535
R11	0,437	0,194	0,050	0,004	0,000	11,975
R12	0,425	0,080	0,024	0,008	0,003	8,607
R13	0,033	0,176	0,415	0,299	0,012	52,193
R14	0,409	0,048	0,028	0,006	0,002	7,545
R15	0,405	0,507	0,232	0,081	0,081	29,746
R16	0,158	0,388	0,409	0,088	0,013	36,182
R17	0,553	0,166	0,137	0,020	0,017	16,636
R18	0,424	0,424	0,299	0,048	0,048	27,693
R19	0,017	0,190	0,484	0,061	0,022	46,182
R20	0,017	0,049	0,577	0,219	0,036	55,789
R21	0,017	0,069	0,389	0,451	0,403	71,707
R22	0,017	0,271	0,418	0,090	0,012	44,126
R23	0,440	0,440	0,092	0,011	0,011	18,152
R24	0,194	0,670	0,261	0,121	0,014	32,132
R25	0,483	0,077	0,040	0,005	0,005	8,719
R26	0,548	0,265	0,010	0,001	0,0016	9,6682
R27	0,468	0,336	0,033	0,021	0,0029	14,4230
R28	0,526	0,077	0,002	0,002	0,0005	4,6216
R29	0,506	0,433	0,098	0,001	0,0003	15,7700
R30	0,525	0,098	0,008	0,001	0,0003	5,5579

ÇD: Çok Düşük, D: Düşük, O:Orta, Y: Yüksek, ÇY: Çok Yüksek

Tablo 4.24 hidrojen vadisi tasarım süreci risk değerlendirmesi için tasarlanan BÇS modelinin çıktısını göstermektedir. Risk değerlendirme sürecinin sonucunda her bir risk için BÇS'nin çıktı katmanında belirlenen bulanık küme setlerine üyelik derecesi ve bu üyelik derecelerinin Denklem (3.39)'da kullanılması ile hesaplanan RDİ elde edilmiştir. Bu değerler, uzmanların farklı boyutlardaki değerlendirmelerinin bütüncül biçimde ifade edilmesini sağlar ve risklerin nicel olarak karşılaştırılabilmesine olanak tanır.

5
SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

5.1 Uygulama Sonuçlarının Anlamlandırılması

Elde edilen RDİ değerleri Tablo 3.10'da verilen öncelik ölçeğinde değerlendirildiğinde Türkiye'de kurulacak bir hidrojen vadisinin tasarım süreci için gerçekleştirilen risk değerlendirmesinde acil olarak önleyici düzeltici önlem alınması gereken 1, orta vadede risk önleyici ve azaltıcı strateji geliştirilmesi gereken 3, yakın olarak gözlemlenmesi ve uzun vadede ilgili stratejilerin geliştirilmesi gereken 6, periyodik olarak izlenmesi gereken 8 ve ihmal edilebilecek 12 risk olduğu gözlemlenmektedir. Önerilen metodolojinin uygulanması sonucunda tanımlanan risklerin RDİ değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanması ile belirlenen en yüksek önem derecesine sahip 5 risk Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1 En yüksek RDİ değerlerine sahip riskler

Risk	ÇD	D	O	Y	ÇY	RDİ
R2	0,000	0,021	0,021	0,110	0,451	90,877
R21	0,017	0,069	0,389	0,451	0,403	71,707
R7	0,017	0,019	0,376	0,470	0,227	69,610
R9	0,017	0,112	0,480	0,358	0,177	62,380
R20	0,017	0,049	0,577	0,219	0,036	55,789

Sonuçlar "R2. Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği" riski için acilen; "R21. Tedarik Süreçlerinin Planlanamaması", "R7. Politika ve Yasal Düzenlemelerdeki Belirsizlikler", "R9. İklim Değişikliği" için kısa vadede; "R20. Personele Gerekli Eğitimin Verilmemesi" için ise uzun dönemde önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Hidrojen vadileri, yüksek yatırım gerektiren büyük kapsamlı projelerdir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde enerji talebi ve transfer imkânı fazla olsa bile

finansal sürdürülebilirlik sağlanmadığı takdirde proje başarılı olarak tamamlanamaz. Tablo 5.2, son 10 yıl boyunca Türkiye'de bulunan piyasa katılımcılarının 12 ay sonrası yıllık enflasyon beklentilerini (%) göstermektedir (T.C. Merkez Bankası, 2025).

Tablo 5.2 Yıllık enflasyon beklentileri (T.C. Merkez Bankası, 2025)

Yıl	2015	2016	2017	2018	2019
Beklenen Enflasyon Oranı	7,0583	7,7750	8,4292	12,2783	13,5792
Yıl	2021	2022	2023	2024	2025
Beklenen Enflasyon Oranı	12,9583	33,7433	36,2450	31,8058	25,1620

Enflasyon oranındaki beklenen değişikliğin yüksek olması maliyet planlarının ve bütçe tahminlerinin gerçekleştirilmesini zorlaştırması sebebiyle paydaşlarda güvensizlik duygusu oluşturabilir. Bu sebeple anket katılımcıları R2. Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği" riskini tanımlanan riskler arasında en yüksek önem derecesine sahip olacak biçimde değerlendirmiştir. Enflasyon, nakit akışlarını doğrudan etkilemekte olduğu için hidrojen vadilerinin değer analizinde kritik bir göstergedir (Menezes vd., 2024). Enflasyon ve faiz oranı değişikliklerinden olabildiğince az etkilenebilmek için tasarım aşamasında farklı miktarlarına yanıt verebilen esnek üretim kapasitesi, çoklu ve esnek tedarik zinciri, yüksek değerli yan ürün üretiminin entegre edilmesi gibi stratejiler izlenebilir (Guillotin vd., 2025; Menezes vd., 2024; Rosén vd., 2024; Taghizadeh-Hesary vd., 2022).

"R21. Tedarik Süreçlerinin Planlanamaması" hidrojen vadisi tasarım sürecinin bütünlüğüne finansal, teknik ve zaman yönetimi açısından tehdit oluşturmaktadır. Tedarik süreçlerinin aksamaması için tasarım aşamasında malzeme ve ekipman akışı için uygun altyapının kurulması, hidrojen taşıma için kamyon, boru hattı vb. alternatiflerden en uygununun tespit edilmesi ve dayanıklı bir tedarik ağının geliştirilmesi gerekmektedir (Frankowska vd., 2022; Sabato vd., 2024). Hidrojen vadilerinin tasarım aşamasında "R7. Politika ve Yasal Düzenlemelerdeki Belirsizlikler" büyük öneme sahiptir, çünkü ulusal enerji politikaları, hidrojenin enerji türü olarak desteklenmesini ve ilgili teknolojilerin aktarımını doğrudan etkiler (Aditiya & Aziz, 2021; Kar vd., 2022). Alım garantisi, teşvikler, faiz sübvansiyonu hidrojen vadilerinin kurumunu teşvik eden ve finansal sürdürülebilirliğini destekleyen politikalardır (Rosén vd., 2024). Ek olarak hidrojen

politikaların net olarak belirlenmesi kamu-özel ve uluslararası düzeyde iş birliklerinin kurulması için karar vericileri teşvik etmektedir (Zhao vd., 2023).

Temiz enerjiye geçiş, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Ancak sürdürülebilir enerji ekosistemi olarak konumlanan hidrojen vadilerinin iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden bütünüyle kaçınması olanaksızdır. Hidrojen üretimi büyük miktarda enerji ve su kaynağında ihtiyaç duymaktadır. İklim değişikliğinin etkilerini minimize etmek ve hidrojen enerjisinin yeşil bir enerji olarak yaygınlaştırılabilmesi için hidrojen vadisi operasyonlarında kullanılacak enerji, yenilenebilir ve düşük karbonlu kaynaklardan tercih edilmelidir. Tasarım aşamasında bu kaynaklara sürdürülebilir erişimin sağlanması gerekmektedir. Ek olarak hidrojen sıvı ya da basınçlı gaz olarak depolanması için soğuk bir ortam gereklidir ve bu oldukça büyük bir enerji gerektirir (Perelli & Genna, 2022). Bu durum göz önünde bulundurularak enerji tüketimini azaltmak için iklim koşullarındaki değişim göz önünde bulundurularak uygun lokasyon ve cepheler kullanılmalıdır. Sürdürülebilir bir hidrojen vadisi projesi için insan faktörü de değerlendirmeye dahil edilmelidir. Uygulamanın sonucunda en yüksek RDİ değerine sahip beşinci risk "R20. Personele Gerekli Eğitimin Verilmemesi" olarak belirlenmiştir. Hidrojen vadisinin tasarım aşamasından başlayarak tüm personelin gerekli yetkinliklerinin tanımlanması, yalnızca ilgili yetkinliklere sahip kişilerin çalışması ve bu yetkinliklerin kazandırılması için personele gerekli eğitimin verilmesi gereklidir (Sun vd., 2023).

Tablo 5.3 En düşük RDİ değerlerine sahip riskler

Risk	ÇD	D	O	Y	ÇY	RDİ
R28	0,526	0,077	0,002	0,002	0,000	4,621
R30	0,525	0,098	0,008	0,001	0,000	5,557
R14	0,409	0,048	0,028	0,006	0,002	7,545
R12	0,425	0,080	0,024	0,008	0,003	8,607
R25	0,483	0,077	0,040	0,005	0,005	8,719

Tablo 5.3 hesaplanan RDİ değerlerinin en düşük olduğu 5 hidrojen vadisi tasarım riskini göstermektedir. "R28. Isı ve Basınç Uyarı Sisteminin Yetersiz Olması", "R30. Acil Kapatma Valfinin Eksik Olması" ve "R25. Bileşenler Arası Bağlantının Düzgün Yapılmaması" risklerinden herhangi biri hidrojen kaynaklı yangın veya

patlama gibi felaketlere yol açabilecek olmasına karşın, önerilen metodoloji kapsamında gerçekleştirilen uygulamada karar vericiler bu riskleri en düşük öncelikli riskler arasında değerlendirmiştir. Bunun temel nedeni olarak karar vericilerin teknik alandaki yetkinliklerine duydukları güven olabilir. Yani hidrojen vadisi tasarım sürecinde ilgili riskler karar vericilerin uzmanlık ve deneyimi ile zaten göz önünde bulundurulduğu için RDİ düşük olarak ortaya çıkmıştır. Benzer biçimde "R14. Sürdürülebilir Enerji Kaynağına Erişim" ve "R12. Sürdürülebilir Su Kaynağına Erişimin Sağlanmaması" riskleri de hidrojen vadisinin operasyonlarını etkileyecek kritik riskler olmasına karşın karar vericilerin uzmanlığı ile bu riskler tasarım aşamasında doğrudan ortadan kaldırılabilir.

5.2 Önerilen Yöntem İçin Duyarlılık Analizi

Bu bölümde önerilen metodolojinin uzman görüşlerinin değişimine karşı hassasiyeti incelenmiştir.

5.2.1 Yapısal Modelin Boyutsal Risk Değerlendirmelerine Etkisi

Önerilen yöntem, hidrojen vadisi kurulumu süresince karşılaşılabilecek risklerin değerlendirmesini finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik olmak üzere beş boyut üzerinden gerçekleştirir. Her bir boyut kapsamında risklerin sistematik biçimde değerlendirilebilmesi için ilk olarak entegre bulanık DEMATEL ve BBH ile yapısal model kurulur. Burada amaç, uzman görüşleri kullanılarak her bir boyut için belirlenen OPK'ların birbiri üzerine olan etkisinin ve göreli ağırlıklarının hesaplayarak risk değerlendirmesi aşamasında kantitatif bir biçimde ortaya koymaktır.

Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucu elde edilen OPK'lara ait göreli ağırlıklar, YSA modellerinde başlangıç ağırlık vektörü olarak kullanılmaktadır. Yöntemin sağlamlığını test etmek ve uzman görüşlerine dayalı başlangıç ağırlıklarının, YSA modelinin sınıflandırma performansı üzerinde olumlu etkisini ortaya koymak amacıyla, başlangıç vektörü olarak önerilen yöntem çıktısı ile rassal ağırlık ataması karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda her bir boyut için Tablo 5.4'te yer alan parametrelere sahip sekiz ÇKA modeli kurulmuştur.

Oluşturulan modeller kullanılan gizli katman sayısı, gizli katmanlarda bulunan nöron sayısı, kullanılan aktivasyon fonksiyonları ve öğrenme hızı gibi

parametrelerin değiştirilmesi sonucu oluşturulmuştur. Böylece başlangıç ağırlıklarının sınıflandırma gücü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Tablo 5.4 Duyarlılık analizi için belirlenen parametreler

Parametre	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
units1	32	32	32	16	32	32	32	32
units2	-	16	16	16	16	16	16	16
units3	-	-	8	-	-	-	-	-
activation1	relu	relu	relu	relu	relu	tanh	relu	relu
activation2	-	relu	relu	relu	tanh	relu	relu	relu
activation3	-		relu	-	-	-	-	-
dropout1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
dropout2	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2
dropout3	-	-	0,2	-	-	-	-	-
l2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
learning_rate	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01

M#: Model #

Tablo 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9 sırasıyla finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutlar için duyarlılık analizi kapsamında oluşturulan ÇKA modellerinin sınıflandırma performanslarını göstermektedir. Bu bağlamda modellerin değerlendirilebilmesi için Doğruluk (Doğ.), Kesinlik (K), Duyarlılık (D) ve F1-Skoru (F1) metrikleri ve bu metriklerin makro (M. Ort.) ve ağırlıklı (A. Ort.) ortalamaları kullanılmıştır.

Elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde rassal başlangıç ağırlığına sahip modellerin performans varyansının daha yüksek olduğu görülmektedir. Rassal ağırlık ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarında eğitim verilerine ait metrikler yüksek olarak gözlemlense dahi eğitim ve test setlerine ait metriklerin arasındaki fark yüksektir. Bu durum, aşırı öğrenmeye karşılık gelmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemden elde edilen uzman tabanlı ağırlıkların kullanıldığı sınıflandırma çalışmalarında eğitim-test metriklerinin daha dengeli olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, yöntem temelli başlangıç ağırlıklarının daha kararlı ve genellenebilir sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

İlgili modeller boyutlar arası incelendiğinde, özellikle altyapısal olmak üzere, bazı boyutlardaki modellerin genel olarak daha düşük performansa sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ilgili verilerin belirtilen parametreler ile sınıflandırılmak için uygun olmaması olabilir. Ancak gerçek bir uygulamada parametreler hiper parametre optimizasyonu ile belirlendiği için ilgili veri setleri ile sınıflandırma gücü daha yüksek modeller geliştirilebilir.

Tablo 5.5 Finansal boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması

		Model 1						**Model 2**						**Model 3**						**Model 4**					
		Eğitim Seti			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**		
		K	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,83	1,00	0,91	0,80	1,00	0,89	0,71	1,00	0,83	0,87	1,00	0,93	0,83	1,00	0,91	0,77	1,00	0,87	0,71	1,00	0,83
	Fr	0,97	0,85	0,91	0,86	0,60	0,71	1,00	0,75	0,86	0,86	0,60	0,71	1,00	0,55	0,71	1,00	0,30	0,46	0,89	0,62	0,74	0,80	0,40	0,53
	Tk	0,86	0,78	0,82	0,70	0,70	0,70	1,00	0,90	0,95	0,71	0,50	0,59	0,74	0,35	0,47	0,33	0,10	0,15	0,81	0,53	0,64	0,71	0,50	0,59
	St	0,84	0,93	0,88	0,82	0,90	0,86	0,91	1,00	0,95	0,67	0,80	0,73	0,53	0,97	0,69	0,45	1,00	0,62	0,70	0,95	0,81	0,64	0,90	0,75
	Doğ.			0,89			0,80			0,91			0,72			0,72			0,60			0,78			0,70
	M.Ort.	0,89	0,89	0,89	0,80	0,80	0,79	0,93	0,91	0,91	0,74	0,73	0,71	0,79	0,72	0,70	0,66	0,60	0,54	0,79	0,78	0,76	0,72	0,70	0,68
	A.Ort.	0,89	0,89	0,89	0,80	0,80	0,79	0,93	0,91	0,91	0,74	0,72	0,71	0,79	0,72	0,70	0,66	0,60	0,54	0,79	0,78	0,76	0,72	0,70	0,68
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,83	1,00	0,91	0,89	1,00	0,94	0,77	1,00	0,87	0,91	1,00	0,95	0,91	1,00	0,95	0,85	1,00	0,92	0,77	1,00	0,87
	Fr	0,97	0,85	0,91	0,86	0,60	0,71	0,92	0,90	0,91	1,00	0,70	0,82	0,93	0,93	0,93	0,90	0,90	0,90	0,97	0,80	0,88	1,00	0,70	0,82
	Tk	0,86	0,78	0,82	0,73	0,80	0,76	0,94	0,72	0,82	0,90	0,90	0,90	1,00	0,10	0,18	1,00	0,10	0,18	0,85	0,72	0,78	0,80	0,80	0,80
	St	0,84	0,93	0,88	0,90	0,90	0,90	0,84	0,95	0,89	0,90	0,90	0,90	0,56	1,00	0,71	0,56	1,00	0,71	0,78	0,90	0,84	0,80	0,80	0,80
	Doğ.			0,89			0,82			0,89			0,87			0,76			0,75			0,86			0,82
	M.Ort.	0,89	0,89	0,89	0,83	0,82	0,82	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,85	0,76	0,69	0,84	0,75	0,69	0,86	0,86	0,85	0,84	0,82	0,82
	A.Ort.	0,89	0,89	0,89	0,83	0,82	0,82	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,85	0,76	0,69	0,84	0,75	0,69	0,86	0,86	0,85	0,84	0,82	0,82
		Model 5						**Model 6**						**Model 7**						**Model 8**					
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,89	0,97	0,93	0,75	0,90	0,82	0,89	1,00	0,94	0,83	1,00	0,91	0,91	1,00	0,95	0,77	1,00	0,87	1,00	1,00	1,00	0,83	1,00	0,91
	Fr	0,92	0,90	0,91	0,64	0,70	0,67	0,97	0,90	0,94	0,86	0,60	0,71	0,87	0,85	0,86	0,75	0,60	0,67	1,00	1,00	1,00	0,89	0,80	0,84
	Tk	1,00	0,72	0,84	1,00	0,50	0,67	0,91	0,75	0,82	0,70	0,70	0,70	0,89	0,62	0,74	0,80	0,40	0,53	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,80
	St	0,83	1,00	0,91	0,83	1,00	0,91	0,82	0,93	0,87	0,82	0,90	0,86	0,80	0,97	0,88	0,64	0,90	0,75	1,00	1,00	1,00	0,89	0,80	0,84
	Doğ.			0,90			0,78			0,89			0,80			0,86			0,72			1,00			0,85
	M.Ort.	0,91	0,90	0,90	0,80	0,78	0,77	0,90	0,89	0,89	0,80	0,80	0,79	0,87	0,86	0,86	0,74	0,72	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85
	A.Ort.	0,91	0,90	0,90	0,80	0,78	0,77	0,90	0,89	0,89	0,80	0,80	0,79	0,87	0,86	0,86	0,74	0,72	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,83	1,00	0,91	0,91	1,00	0,95	0,91	1,00	0,95	0,89	1,00	0,94	0,83	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00	0,95
	Fr	0,97	0,88	0,92	0,89	0,80	0,84	0,90	0,90	0,90	1,00	0,90	0,95	0,97	0,85	0,91	0,86	0,60	0,71	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95
	Tk	0,93	0,70	0,80	1,00	0,70	0,82	0,83	0,72	0,77	0,86	0,60	0,71	0,82	0,82	0,82	0,67	0,80	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95
	St	0,80	0,97	0,88	0,83	1,00	0,91	0,83	0,85	0,84	0,69	0,90	0,78	0,88	0,88	0,88	0,89	0,80	0,84	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00	0,95
	Doğ.			0,89			0,88			0,87			0,85			0,89			0,80			1,00			0,95
	M.Ort.	0,90	0,89	0,88	0,89	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,85	0,85	0,89	0,89	0,89	0,81	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95
	A.Ort.	0,90	0,89	0,88	0,89	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,85	0,85	0,89	0,89	0,89	0,81	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95

Tablo 5.6 Çevresel boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması

		Model 1						**Model 2**						**Model 3**						**Model 4**					
		Eğitim Seti			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**		
		K	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,85	0,97	0,91	0,69	0,90	0,78	0,83	0,97	0,90	1,00	0,90	0,95	0,84	0,93	0,88	0,77	1,00	0,87	0,79	0,65	0,71	0,80	0,80	0,80
	Fr	0,94	0,80	0,86	0,70	0,70	0,70	0,91	0,78	0,84	0,80	0,80	0,80	0,80	0,82	0,81	0,70	0,70	0,70	0,65	0,75	0,70	0,57	0,40	0,47
	Tk	0,97	0,80	0,88	0,83	0,50	0,62	0,94	0,80	0,86	0,75	0,60	0,67	1,00	0,47	0,64	1,00	0,20	0,33	0,93	0,65	0,76	0,50	0,30	0,38
	St	0,85	1,00	0,92	0,82	0,90	0,86	0,87	0,97	0,92	0,77	1,00	0,87	0,71	1,00	0,83	0,67	1,00	0,80	0,75	1,00	0,86	0,59	1,00	0,74
	Doğ.			0,89			0,75			0,88			0,82			0,81			0,72			0,76			0,62
	M.Ort.	0,90	0,89	0,89	0,76	0,75	0,74	0,89	0,88	0,88	0,83	0,83	0,82	0,84	0,81	0,79	0,78	0,73	0,68	0,78	0,76	0,76	0,61	0,62	0,60
	A.Ort.	0,90	0,89	0,89	0,76	0,75	0,74	0,89	0,88	0,88	0,83	0,82	0,82	0,84	0,81	0,79	0,78	0,72	0,68	0,78	0,76	0,76	0,61	0,62	0,60
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,78	0,95	0,85	0,82	0,90	0,86	0,78	1,00	0,88	0,83	1,00	0,91	0,73	1,00	0,84	0,77	1,00	0,87	0,62	1,00	0,77	0,62	1,00	0,77
	Fr	0,87	0,68	0,76	0,75	0,60	0,67	0,97	0,72	0,83	0,88	0,70	0,78	0,96	0,60	0,74	0,86	0,60	0,71	0,80	0,40	0,53	0,71	0,50	0,59
	Tk	0,91	0,80	0,85	0,80	0,80	0,80	1,00	0,88	0,93	0,89	0,80	0,84	0,97	0,75	0,85	0,78	0,70	0,74	1,00	0,62	0,77	1,00	0,60	0,75
	St	0,87	0,97	0,92	0,91	1,00	0,95	0,91	1,00	0,95	0,91	1,00	0,95	0,82	1,00	0,90	0,82	0,90	0,86	0,78	1,00	0,88	0,82	0,90	0,86
	Doğ.			0,85			0,82			0,90			0,88			0,84			0,80			0,76			0,75
	M.Ort.	0,86	0,85	0,85	0,82	0,82	0,82	0,92	0,90	0,90	0,88	0,88	0,87	0,87	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,80	0,76	0,74	0,79	0,75	0,74
	A.Ort.	0,86	0,85	0,85	0,82	0,82	0,82	0,92	0,90	0,90	0,88	0,88	0,87	0,87	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,80	0,76	0,74	0,79	0,75	0,74

		Model 5						**Model 6**						**Model 7**						**Model 8**					
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,82	1,00	0,90	0,71	1,00	0,83	0,78	0,97	0,87	0,64	0,90	0,75	0,78	1,00	0,88	0,71	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90
	Fr	0,97	0,78	0,86	0,71	0,50	0,59	0,88	0,70	0,78	0,62	0,50	0,56	0,87	0,68	0,76	0,60	0,30	0,40	1,00	1,00	1,00	0,73	0,80	0,76
	Tk	1,00	0,70	0,82	0,88	0,70	0,78	0,97	0,78	0,86	1,00	0,60	0,75	0,94	0,75	0,83	0,62	0,50	0,56	1,00	1,00	1,00	0,86	0,60	0,71
	St	0,78	1,00	0,88	0,91	1,00	0,95	0,87	1,00	0,93	0,83	1,00	0,91	0,87	1,00	0,93	0,77	1,00	0,87	1,00	1,00	1,00	0,83	1,00	0,91
	Doğ.			0,87			0,80			0,86			0,75			0,86			0,70			1,00			0,82
	M.Ort.	0,89	0,87	0,87	0,80	0,80	0,79	0,87	0,86	0,86	0,78	0,75	0,74	0,87	0,86	0,85	0,68	0,70	0,66	1,00	1,00	1,00	0,83	0,83	0,82
	A.Ort.	0,89	0,87	0,87	0,80	0,80	0,79	0,87	0,86	0,86	0,78	0,75	0,74	0,87	0,86	0,85	0,68	0,70	0,66	1,00	1,00	1,00	0,83	0,82	0,82
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,90	0,90	0,90	0,87	1,00	0,93	0,91	1,00	0,95	0,63	1,00	0,78	0,67	1,00	0,80	0,98	1,00	0,99	0,91	1,00	0,95
	Fr	0,94	0,85	0,89	0,78	0,70	0,74	0,94	0,78	0,85	0,70	0,70	0,70	0,94	0,40	0,56	1,00	0,40	0,57	1,00	0,97	0,99	0,75	0,90	0,82
	Tk	0,97	0,80	0,88	0,80	0,80	0,80	0,83	0,85	0,84	0,80	0,80	0,80	0,92	0,88	0,90	0,80	0,80	0,80	1,00	0,97	0,99	0,83	0,50	0,62
	St	0,87	1,00	0,93	0,91	1,00	0,95	0,90	0,90	0,90	1,00	0,90	0,95	0,90	0,95	0,93	0,91	1,00	0,95	0,98	1,00	0,99	0,82	0,90	0,86
	Doğ.			0,91			0,85			0,88			0,85			0,81			0,80			0,99			0,82
	M.Ort.	0,92	0,91	0,91	0,85	0,85	0,85	0,88	0,88	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	0,81	0,79	0,84	0,80	0,78	0,99	0,99	0,99	0,83	0,82	0,81
	A.Ort.	0,92	0,91	0,91	0,85	0,85	0,85	0,88	0,88	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	0,81	0,79	0,84	0,80	0,78	0,99	0,99	0,99	0,83	0,82	0,81

Tablo 5.7 Altyapısal boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması

		Model 1						**Model 2**						**Model 3**						**Model 4**					
		Eğitim Seti			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**		
		K	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,82	1,00	0,90	0,71	1,00	0,83	0,85	1,00	0,92	0,82	0,90	0,86	0,78	0,90	0,84	0,46	0,60	0,52	0,84	0,90	0,87	0,57	0,80	0,67
	Fr	0,87	0,65	0,74	0,25	0,10	0,14	0,97	0,78	0,86	0,57	0,40	0,47	0,71	0,75	0,73	0,40	0,40	0,40	0,74	0,80	0,77	0,00	0,00	0,00
	Tk	0,85	0,70	0,77	0,29	0,20	0,24	0,95	0,88	0,91	0,38	0,30	0,33	0,95	0,47	0,63	0,67	0,20	0,31	0,90	0,47	0,62	0,43	0,30	0,35
	St	0,83	1,00	0,91	0,67	1,00	0,80	0,91	1,00	0,95	0,64	0,90	0,75	0,77	1,00	0,87	0,71	1,00	0,83	0,74	0,97	0,84	0,64	0,90	0,75
	Doğ.			0,84			0,57			0,91			0,62			0,78			0,55			0,79			0,50
	M.Ort.	0,84	0,84	0,83	0,48	0,58	0,50	0,92	0,91	0,91	0,60	0,62	0,60	0,80	0,78	0,77	0,56	0,55	0,52	0,81	0,79	0,78	0,41	0,50	0,44
	A.Ort.	0,84	0,84	0,83	0,48	0,57	0,50	0,92	0,91	0,91	0,60	0,62	0,60	0,80	0,78	0,77	0,56	0,55	0,52	0,81	0,79	0,78	0,41	0,50	0,44
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,82	1,00	0,90	0,71	1,00	0,83	0,82	1,00	0,90	0,77	1,00	0,87	0,70	1,00	0,82	0,71	1,00	0,83	0,66	1,00	0,79	0,71	1,00	0,83
	Fr	0,93	0,62	0,75	0,50	0,20	0,29	0,94	0,72	0,82	0,83	0,50	0,62	0,95	0,45	0,61	0,75	0,30	0,43	1,00	0,33	0,49	0,83	0,50	0,62
	Tk	0,74	0,72	0,73	0,45	0,50	0,48	0,93	0,70	0,80	0,71	0,50	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,70	0,76	0,80	0,40	0,53
	St	0,80	0,90	0,85	0,73	0,80	0,76	0,80	1,00	0,89	0,71	1,00	0,83	0,48	1,00	0,65	0,45	1,00	0,62	0,77	1,00	0,87	0,67	1,00	0,80
	Doğ.			0,81			0,62			0,86			0,75			0,61			0,58			0,76			0,72
	M.Ort.	0,82	0,81	0,81	0,60	0,62	0,59	0,87	0,86	0,85	0,76	0,75	0,73	0,53	0,61	0,52	0,48	0,57	0,47	0,81	0,76	0,73	0,75	0,72	0,70
	A.Ort.	0,82	0,81	0,81	0,60	0,62	0,59	0,87	0,86	0,85	0,76	0,75	0,73	0,53	0,61	0,52	0,48	0,57	0,47	0,81	0,76	0,73	0,75	0,72	0,70
		Model 5						**Model 6**						**Model 7**						**Model 8**					
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,87	1,00	0,93	0,75	0,90	0,82	0,89	0,97	0,93	0,67	0,80	0,73	0,78	0,97	0,87	0,50	0,70	0,58	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Fr	0,91	0,78	0,84	0,33	0,20	0,25	0,81	0,75	0,78	0,29	0,20	0,24	0,93	0,68	0,78	0,40	0,20	0,27	1,00	1,00	1,00	0,67	0,60	0,63
	Tk	0,85	0,70	0,77	0,43	0,30	0,35	0,82	0,68	0,74	0,43	0,30	0,35	0,91	0,80	0,85	0,57	0,40	0,47	1,00	1,00	1,00	0,71	0,50	0,59
	St	0,81	0,95	0,87	0,67	1,00	0,80	0,85	0,97	0,91	0,71	1,00	0,83	0,87	1,00	0,93	0,71	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Doğ.			0,86			0,60			0,84			0,57			0,86			0,57			1,00			0,72
	M.Ort.	0,86	0,86	0,85	0,54	0,60	0,56	0,84	0,84	0,84	0,52	0,57	0,54	0,87	0,86	0,86	0,55	0,57	0,54	1,00	1,00	1,00	0,72	0,72	0,71
	A.Ort.	0,86	0,86	0,85	0,54	0,60	0,56	0,84	0,84	0,84	0,52	0,57	0,54	0,87	0,86	0,86	0,55	0,57	0,54	1,00	1,00	1,00	0,72	0,72	0,71
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,82	1,00	0,90	0,77	1,00	0,87	0,83	1,00	0,91	0,77	1,00	0,87	0,60	1,00	0,75	0,62	1,00	0,77	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Fr	0,90	0,65	0,75	0,60	0,30	0,40	0,97	0,72	0,83	0,80	0,40	0,53	1,00	0,20	0,33	1,00	0,10	0,18	1,00	1,00	1,00	0,75	0,60	0,67
	Tk	0,84	0,68	0,75	0,38	0,30	0,33	0,91	0,75	0,82	0,38	0,30	0,33	0,85	0,72	0,78	0,50	0,40	0,44	1,00	1,00	1,00	0,88	0,70	0,78
	St	0,80	1,00	0,89	0,64	0,90	0,75	0,82	1,00	0,90	0,77	1,00		0,78	1,00	0,88	0,67	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	0,83	1,00	0,91
	Doğ.			0,83			0,62			0,87			0,62			0,73			0,62			1,00			0,80
	M.Ort.	0,84	0,83	0,82	0,60	0,62	0,59	0,88	0,87	0,86	0,60	0,62	0,59	0,88	0,87	0,86	0,70	0,62	0,55	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,79
	A.Ort.	0,84	0,83	0,82	0,60	0,62	0,59	0,88	0,87	0,86	0,60	0,62	0,59	0,88	0,87	0,86	0,70	0,62	0,55	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,79

Tablo 5.8 Yönetimsel boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması

		Model 1						**Model 2**						**Model 3**						**Model 4**					
		Eğitim Seti			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**		
		K	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,91	1,00	0,95	0,91	1,00	0,95	0,83	1,00	0,91	0,77	1,00	0,87	0,71	1,00	0,83	0,67	1,00	0,80	0,65	1,00	0,78	0,56	1,00	0,71
	Fr	0,88	0,88	0,88	0,88	0,70	0,78	1,00	0,72	0,84	1,00	0,50	0,67	0,95	0,45	0,61	0,67	0,40	0,50	0,81	0,53	0,64	1,00	0,40	0,57
	Tk	0,90	0,68	0,77	0,57	0,40	0,47	0,80	0,70	0,75	0,60	0,60	0,60	0,59	0,55	0,57	0,57	0,40	0,47	0,86	0,30	0,44	0,80	0,40	0,53
	St	0,83	0,95	0,88	0,64	0,90	0,75	0,75	0,90	0,82	0,67	0,80	0,73	0,56	0,68	0,61	0,58	0,70	0,64	0,69	1,00	0,82	0,69	0,90	0,78
	Doğ.			0,88			0,75			0,83			0,72			0,70			0,62			0,71			0,68
	M.Ort.	0,88	0,88	0,87	0,75	0,75	0,74	0,85	0,83	0,83	0,76	0,72	0,72	0,70	0,67	0,66	0,62	0,62	0,60	0,75	0,71	0,67	0,76	0,67	0,65
	A.Ort.	0,88	0,88	0,87	0,75	0,75	0,74	0,85	0,83	0,83	0,76	0,72	0,72	0,70	0,67	0,66	0,62	0,62	0,60	0,75	0,71	0,67	0,76	0,68	0,65
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,85	1,00	0,92	0,83	1,00	0,91	0,78	1,00	0,88	0,83	1,00	0,91	0,73	1,00	0,84	0,83	1,00	0,91	0,87	1,00	0,93	0,91	1,00	0,95
	Fr	0,96	0,62	0,76	1,00	0,60	0,75	0,79	0,55	0,65	1,00	0,50	0,67	1,00	0,30	0,46	1,00	0,30	0,46	0,97	0,72	0,83	1,00	0,70	0,82
	Tk	0,76	0,80	0,78	0,75	0,60	0,67	0,77	0,50	0,61	0,71	0,50	0,59	0,62	0,50	0,56	0,43	0,30	0,35	0,82	0,68	0,74	0,75	0,60	0,67
	St	0,84	0,95	0,89	0,71	1,00	0,83	0,73	1,00	0,84	0,62	1,00	0,77	0,66	1,00	0,79	0,56	1,00	0,71	0,76	0,97	0,86	0,71	1,00	0,83
	Doğ.			0,84			0,80			0,76			0,75			0,70			0,65			0,84			0,82
	M.Ort.	0,85	0,84	0,84	0,82	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74	0,79	0,75	0,73	0,75	0,70	0,66	0,70	0,65	0,61	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,82
	A.Ort.	0,80	0,80	0,79	0,82	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74	0,79	0,75	0,73	0,75	0,70	0,66	0,70	0,65	0,61	0,85	0,84	0,84	0,84	0,82	0,82
		Model 5						**Model 6**						**Model 7**						**Model 8**					
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,90	0,90	0,90	0,89	1,00	0,94	0,71	1,00	0,83	0,85	1,00	0,92	0,77	1,00	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95
	Fr	0,94	0,85	0,89	0,75	0,60	0,67	0,97	0,80	0,88	0,80	0,40	0,53	0,91	0,78	0,84	0,75	0,60	0,67	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90
	Tk	0,96	0,65	0,78	0,56	0,50	0,53	0,73	0,47	0,58	0,83	0,50	0,62	0,88	0,53	0,66	1,00	0,20	0,33	1,00	1,00	1,00	0,75	0,60	0,67
	St	0,77	1,00	0,87	0,69	0,90	0,78	0,62	0,88	0,73	0,53	0,80	0,64	0,69	0,95	0,80	0,53	0,90	0,67	1,00	1,00	1,00	0,69	0,90	0,78
	Doğ.			0,88			0,72			0,79			0,67			0,81			0,67			1,00			0,82
	M.Ort.	0,89	0,88	0,87	0,72	0,72	0,72	0,80	0,79	0,78	0,72	0,68	0,66	0,83	0,81	0,80	0,76	0,68	0,63	1,00	1,00	1,00	0,84	0,83	0,82
	A.Ort.	0,89	0,88	0,87	0,72	0,72	0,72	0,80	0,79	0,78	0,72	0,68	0,66	0,83	0,81	0,80	0,76	0,68	0,63	1,00	1,00	1,00	0,84	0,82	0,82
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,89	1,00	0,94	0,91	1,00	0,95	0,82	1,00	0,90	0,91	1,00	0,95	0,78	1,00	0,88	0,83	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95
	Fr	0,97	0,75	0,85	0,88	0,70	0,78	0,93	0,62	0,75	0,88	0,70	0,78	0,95	0,53	0,68	1,00	0,40	0,57	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Tk	0,83	0,75	0,79	0,75	0,60	0,67	0,81	0,55	0,66	0,75	0,30	0,43	0,77	0,68	0,72	0,62	0,50	0,56	1,00	0,97	0,99	0,83	0,50	0,62
	St	0,81	0,97	0,89	0,69	0,90	0,78	0,70	1,00	0,82	0,53	0,90	0,67	0,77	1,00	0,87	0,62	1,00	0,77	0,98	1,00	0,99	0,77	1,00	0,87
	Doğ.			0,87			0,80			0,79			0,72			0,80			0,72			0,99			0,82
	M.Ort.	0,88	0,87	0,87	0,81	0,80	0,79	0,81	0,79	0,78	0,77	0,72	0,71	0,82	0,80	0,79	0,77	0,72	0,70	0,99	0,99	0,99	0,84	0,82	0,82
	A.Ort.	0,88	0,87	0,87	0,81	0,80	0,79	0,81	0,79	0,78	0,77	0,72	0,71	0,82	0,80	0,79	0,77	0,72	0,70	0,99	0,99	0,99	0,84	0,82	0,82

Tablo 5.9 Teknik boyut için YSA modellerinin karşılaştırılması

		Model 1						**Model 2**						**Model 3**						**Model 4**					
		Eğitim Seti			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**			**Eğitim Seti**			**Test Seti**		
		K	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*	*K*	*D*	*F1*
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,78	0,95	0,85	0,75	0,90	0,82	0,82	0,90	0,86	0,75	0,90	0,82	0,63	0,97	0,76	0,71	1,00	0,83	0,69	0,78	0,73	0,78	0,70	0,74
	Fr	0,87	0,68	0,76	0,67	0,40	0,50	0,81	0,75	0,78	0,70	0,70	0,70	0,78	0,35	0,48	0,62	0,50	0,56	0,63	0,42	0,51	0,57	0,40	0,47
	Tk	0,94	0,72	0,82	0,40	0,20	0,27	0,94	0,80	0,86	0,80	0,40	0,53	0,47	0,90	0,62	0,31	0,50	0,38	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40	0,44
	St	0,82	1,00	0,90	0,59	1,00	0,74	0,89	1,00	0,94	0,77	1,00	0,87	0,50	0,05	0,09	0,00	0,00	0,00	0,79	0,95	0,86	0,62	1,00	0,77
	Doğ.			0,84			0,62			0,86			0,75			0,57			0,50			0,69			0,62
	M.Ort.	0,85	0,84	0,83	0,60	0,62	0,58	0,86	0,86	0,86	0,75	0,75	0,73	0,60	0,57	0,49	0,41	0,50	0,44	0,68	0,69	0,68	0,62	0,62	0,61
	A.Ort.	0,85	0,84	0,83	0,60	0,62	0,58	0,86	0,86	0,86	0,75	0,75	0,73	0,60	0,57	0,49	0,41	0,50	0,44	0,68	0,69	0,68	0,62	0,62	0,61
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,86	0,93	0,89	1,00	0,90	0,95	0,79	0,95	0,86	0,91	1,00	0,95	0,62	1,00	0,76	0,71	1,00	0,83	0,80	0,97	0,88	0,91	1,00	0,95
	Fr	0,82	0,80	0,81	0,70	0,70	0,70	0,90	0,68	0,77	0,88	0,70	0,78	0,40	0,40	0,40	0,46	0,60	0,52	0,93	0,68	0,78	0,78	0,70	0,74
	Tk	0,94	0,72	0,82	0,62	0,50	0,56	0,91	0,78	0,84	0,71	0,50	0,59	0,91	0,25	0,39	0,00	0,00	0,00	0,91	0,80	0,85	0,71	0,50	0,59
	St	0,85	1,00	0,92	0,77	1,00	0,87	0,83	1,00	0,91	0,71	1,00	0,83	0,89	0,97	0,93	0,77	1,00	0,87	0,85	1,00	0,92	0,77	1,00	0,87
	Doğ.			0,86			0,77			0,85			0,80			0,66			0,65			0,86			0,80
	M.Ort.	0,87	0,86	0,86	0,77	0,78	0,77	0,86	0,85	0,85	0,80	0,80	0,79	0,70	0,66	0,62	0,49	0,65	0,56	0,87	0,86	0,86	0,79	0,80	0,79
	A.Ort.	0,87	0,86	0,86	0,77	0,78	0,77	0,86	0,85	0,85	0,80	0,80	0,79	0,70	0,66	0,62	0,49	0,65	0,56	0,87	0,86	0,86	0,79	0,80	0,79
		Model 5						**Model 6**						**Model 7**						**Model 8**					
Rassal Ağırlık	*Kr*	0,74	0,97	0,84	0,71	0,97	0,82	0,78	0,97	0,87	0,83	1,00	0,91	0,73	1,00	0,84	0,62	1,00	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Fr	0,96	0,60	0,74	0,88	0,55	0,68	0,93	0,70	0,80	0,60	0,60	0,60	0,96	0,55	0,70	0,60	0,30	0,40	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Tk	0,94	0,82	0,88	0,94	0,78	0,85	0,97	0,82	0,89	0,67	0,40	0,50	0,88	0,70	0,78	0,43	0,30	0,35	1,00	1,00	1,00	0,83	0,50	0,62
	St	0,85	1,00	0,92	0,85	1,00	0,92	0,87	1,00	0,93	0,83	1,00	0,91	0,78	0,97	0,87	0,75	0,90	0,82	1,00	1,00	1,00	0,83	1,00	0,91
	Doğ.			0,85			0,82			0,87			0,75			0,81			0,63			1,00			0,85
	M.Ort.	0,87	0,85	0,84	0,84	0,82	0,82	0,89	0,88	0,87	0,73	0,75	0,73	0,83	0,81	0,80	0,60	0,62	0,59	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,84
	A.Ort.	0,87	0,85	0,84	0,84	0,82	0,82	0,89	0,88	0,87	0,73	0,75	0,73	0,83	0,81	0,80	0,60	0,62	0,59	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,84
Yöntem Ağırlığı	*Kr*	0,71	0,97	0,82	0,91	1,00	0,95	0,71	0,97	0,82	0,91	1,00	0,95	0,63	1,00	0,78	0,62	1,00	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Fr	0,88	0,55	0,68	0,78	0,70	0,74	0,88	0,53	0,66	0,71	0,50	0,59	0,80	0,40	0,53	0,60	0,30	0,40	1,00	1,00	1,00	0,75	0,90	0,82
	Tk	0,94	0,78	0,85	0,67	0,40	0,50	0,89	0,60	0,72	0,50	0,40	0,44	0,92	0,28	0,42	0,80	0,40	0,53	1,00	1,00	1,00	0,86	0,60	0,71
	St	0,85	1,00	0,92	0,71	1,00	0,83	0,74	1,00	0,85	0,71	1,00	0,83	0,62	1,00	0,76	0,71	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00	0,95
	Doğ.			0,82			0,77			0,77			0,72			0,67			0,68			1,00			0,87
	M.Ort.	0,84	0,82	0,82	0,77	0,78	0,76	0,80	0,78	0,76	0,71	0,72	0,70	0,74	0,67	0,62	0,68	0,67	0,63	1,00	1,00	1,00	0,88	0,88	0,87
	A.Ort.	0,84	0,82	0,82	0,77	0,78	0,76	0,80	0,78	0,76	0,71	0,72	0,70	0,74	0,67	0,62	0,68	0,68	0,63	1,00	1,00	1,00	0,88	0,88	0,87

Tüm modeller incelendiğinde geliştirilen yöntemden elde edilen ağırlıklar ile kurulan YSA modellerinin sınıflandırma performansının rassal ağırlıklar ile kurulan modellere kıyasla daha yüksek veya eşdeğer olduğu; ek olarak aşırı öğrenmeyi engelleyerek daha genellenebilir sonuçlar ürettiği görülmektedir. Elde edilen bulgular ışığında ÇKA algoritması ile oluşturulmuş YSA modellerinde geliştirilen yöntem ile belirlenen uzman tabanlı başlangıç ağırlıklarının kullanımının, modellerin genel sınıflandırma performansını güçlendirdiği söylenebilir.

5.2.2 Boyutsal Risk Değerlendirmelerinin Nihai Sonuca Etkisi

Geliştirilen metodoloji kapsamında risklerin nihai sınıflandırılmasının gerçekleştirilmesi ve RDİ'nin belirlenebilmesi finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutlardaki risk değerlendirmelerinin bulanık çıkarım sistemi aracılığıyla birleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Geliştirilen yöntemin boyut temelli değerlendirmelerdeki değişimlere duyarlılığını incelenmek amacıyla YSA modellerine atanan başlangıç ağırlıklarının değiştirildiği 3 durum karşılaştırılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi kapsamında oluşturulan senaryolar Tablo 5.10'da gösterilmektedir.

Tablo 5.10 Duyarlılık analizi için oluşturulan ağırlık vektörleri

B1	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F6**	**F7**	**F8**
TD	0,153	0,095	0,152	0,134	0,151	0,136	0,085	0,094
S1	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
S2	0,168	0,093	0,149	0,132	0,148	0,134	0,083	0,092
B2	**Ç1**	**Ç2**	**Ç3**	**Ç4**	**Ç5**	**Ç6**	**Ç7**	
TD	0,157	0,140	0,144	0,142	0,160	0,141	0,116	
S1	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	
S2	0,154	0,137	0,141	0,139	0,176	0,138	0,114	
B3	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**		
TD	0,149	0,171	0,184	0,180	0,166	0,150		
S1	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166		
S2	0,146	0,167	0,202	0,176	0,162	0,147		
B4	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**Y6**	**Y7**	
TD	0,151	0,147	0,158	0,117	0,133	0,134	0,159	
S1	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	
S2	0,148	0,144	0,155	0,115	0,130	0,131	0,175	
B5	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**
TD	0,136	0,137	0,123	0,131	0,099	0,132	0,131	0,113
S1	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
S2	0,134	0,151	0,121	0,129	0,097	0,130	0,129	0,111

TD: Temel Durum, S#: Senaryo#

Gerçekleştirilen duyarlılık analizinde Temel Durum, gerçekleştirilen çalışma kapsamında elde edilen ağırlık vektörlerini temsil etmektedir. Senaryo 1 ise tüm OPK'ların eşit öneme sahip olduğu varsayılmıştır. Senaryo 2 ise Temel Durum'da yer alan en önemli OPK'nın ağırlığının %10 arttırıldığı ve kalan OPK'ların normalize edildiği durumu ifade etmektedir.

Boyutlar temelinde gerçekleştirilen değerlendirmelerin hidrojen vadisi tasarım sürecine etkisini değerlendirmek için ilk olarak Tablo 5.10'da belirlenen başlangıç ağırlıkları ile Tablo 4.21'de gösterilen ve Temel Durum için hiper parametre optimizasyonu ile elde edilen değerler kullanılarak ÇKA modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, her bir durum için boyutlar temelinde risklerin bağlamsal kontrol modeline göre sınıflandırılması için kullanılmıştır. Bu sınıflandırma işlemi ile hidrojen vadisi tasarım risklerinin bağlamsal kontrol moduna sınıflandırılmasına ilişkin olasılık dağılımlarını elde edilmektedir. Temel Durum için elde edilen olasılık dağılımları Tablo 4.22'de ve bu olasılık değerlerini girdi olarak kullanan BÇS'nin sonuçları Tablo 4.24'te gösterilmiştir. Benzer biçimde Senaryo 1 ve 2 için elde edilen olasılık değerlerinin başlangıç ağırlıkları olarak kullanıldığı ÇKA modellerinden elde edilen olasılık dağılımlarının BÇS modelinde girdi olarak kullanılması ile elde edilen birleştirilmiş risk değerlendirmeleri Tablo 5.11'de görülmektedir.

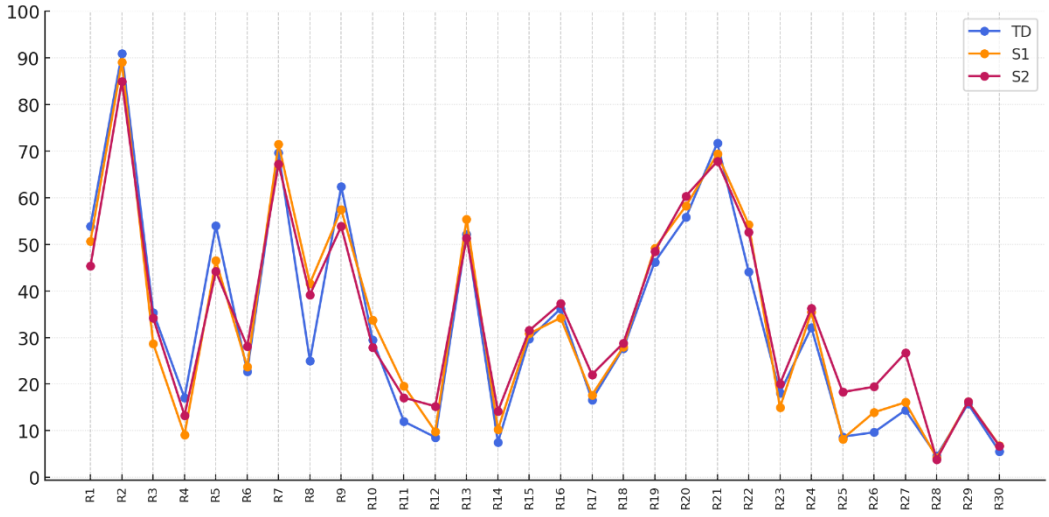
Tablo 5.11 Duyarlılık analizi kapsamında BÇS sonuçları

	Senaryo 1						**Senaryo 2**					
Risk	**ÇD**	**D**	**O**	**Y**	**ÇY**	**RDİ**	**ÇD**	**D**	**O**	**Y**	**ÇY**	**RDİ**
R1	0,14	0,18	0,37	0,47	0,01	50,69	0,11	0,26	0,27	0,27	0,02	45,35
R2	0,00	0,01	0,01	0,21	0,39	89,12	0,01	0,03	0,03	0,13	0,28	84,98
R3	0,13	0,47	0,14	0,03	0,02	28,73	0,13	0,43	0,21	0,06	0,03	34,19
R4	0,46	0,14	0,01	0,01	0,00	9,12	0,32	0,24	0,02	0,01	0,00	13,28
R5	0,19	0,21	0,35	0,14	0,14	46,48	0,17	0,28	0,28	0,15	0,12	44,16
R6	0,39	0,39	0,24	0,03	0,00	23,70	0,28	0,28	0,21	0,08	0,00	28,08
R7	0,01	0,01	0,39	0,46	0,28	71,52	0,01	0,02	0,43	0,26	0,21	67,18
R8	0,32	0,22	0,42	0,32	0,04	41,60	0,33	0,24	0,24	0,19	0,10	39,18
R9	0,01	0,10	0,56	0,30	0,07	57,43	0,02	0,13	0,59	0,22	0,06	53,83
R10	0,17	0,47	0,34	0,10	0,00	33,73	0,20	0,42	0,19	0,04	0,00	27,91
R11	0,36	0,36	0,11	0,03	0,00	19,63	0,32	0,27	0,05	0,02	0,00	17,09
R12	0,53	0,10	0,07	0,01	0,00	9,85	0,28	0,10	0,07	0,01	0,00	15,25
R13	0,03	0,13	0,48	0,34	0,04	55,40	0,06	0,16	0,47	0,22	0,06	51,37
R14	0,41	0,09	0,04	0,01	0,00	10,29	0,41	0,12	0,08	0,02	0,00	14,19
R15	0,24	0,51	0,32	0,07	0,01	30,82	0,27	0,31	0,31	0,06	0,03	31,52

Tablo 5.11 Duyarlılık analizi kapsamında BÇS sonuçları (devamı)

	Senaryo 1						Senaryo 2					
Risk	**ÇD**	**D**	**O**	**Y**	**ÇY**	**RDİ**	**ÇD**	**D**	**O**	**Y**	**ÇY**	**RDİ**
R16	0,20	0,39	0,41	0,06	0,02	34,23	0,23	0,41	0,30	0,18	0,04	37,32
R17	0,46	0,19	0,16	0,02	0,00	17,66	0,40	0,29	0,23	0,01	0,00	22,06
R18	0,33	0,40	0,36	0,03	0,01	27,95	0,33	0,40	0,23	0,11	0,01	28,79
R19	0,01	0,14	0,62	0,08	0,03	49,13	0,02	0,21	0,68	0,14	0,03	48,41
R20	0,01	0,02	0,66	0,30	0,04	58,22	0,02	0,02	0,59	0,18	0,14	60,35
R21	0,01	0,06	0,37	0,39	0,28	69,36	0,02	0,07	0,28	0,28	0,24	67,78
R22	0,01	0,04	0,42	0,13	0,01	54,27	0,02	0,18	0,36	0,19	0,06	52,62
R23	0,54	0,22	0,15	0,00	0,00	15,01	0,44	0,44	0,20	0,00	0,00	20,08
R24	0,21	0,57	0,29	0,22	0,00	35,43	0,20	0,52	0,28	0,24	0,00	36,30
R25	0,51	0,10	0,04	0,00	0,00	8,26	0,27	0,12	0,12	0,00	0,00	18,30
R26	0,43	0,33	0,05	0,00	0,00	13,95	0,46	0,15	0,15	0,06	0,00	19,43
R27	0,42	0,30	0,06	0,03	0,00	16,09	0,31	0,20	0,20	0,07	0,00	26,70
R28	0,49	0,03	0,02	0,00	0,00	4,21	0,53	0,03	0,02	0,00	0,00	3,87
R29	0,50	0,17	0,17	0,01	0,00	16,25	0,53	0,29	0,14	0,01	0,00	16,20
R30	0,52	0,11	0,01	0,01	0,00	6,85	0,49	0,10	0,01	0,01	0,00	6,71

Elde edilen RDİ değerlerinin karşılaştırılması için Şekil 5.1 oluşturulmuştur. Buna göre tüm senaryoların benzer trendleri izlediği görülmekte olmasına karşın tüm riskler için RDİ değerlerinin her bir durumda farklı olduğu görülmektedir. RDİ değerlerinin ortalaması Temel Durum, Senaryo 1 ve Senaryo 2 için sırasıyla 32,5972; 33,4985 ve 34,4170 olarak hesaplanır. Tüm durumlar için maksimum değerlerin aynı sırayla 90,8774; 89,1178; 84,9755 ve minimum değerlerin 4,6216; 4,2056; 3,8687 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1 RDİ değerlerinin karşılaştırması

Tablo 5.12, duyarlılık analizi kapsamında değerlendirilen her bir durum için Tablo 3.10'da verilen ölçek doğrultusunda hangi öncelik düzeyinde kaç risk bulunduğunu göstermektedir. Şekil 5.1 de verilen RDİ değerleri ve Tablo 5.12'de gösterilen risk öncelikleri göz önüne alındığında farklı uzman görüşlerinin nihai değerlendirmeye etkisini incelemek için gerçekleştirilen duyarlılık analizinin, boyutsal değerlendirmeler sırasında kullanılan uzman görüşlerinin nihai durumda risklerin RDİ değerlerini ve önceliklendirmesini etkilediğini göstermektedir. Bu kapsamda geliştirilen yöntemin uzman değerlendirmesindeki nüansları risk değerlendirmesine yansıtacak hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.12 Risk önceliklendirmelerinin karşılaştırılması

Önceliklendirme	TD	S1	S2
Acil olarak kısa vadede önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirilmelidir	1	1	1
Orta dönemde risk önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirilmelidir	3	2	3
Yakın olarak gözlemlenmeli ve uzun vadede risk önleyici ve azaltıcı stratejiler planlanmalıdır	6	8	6
Olası değişiklikler için periyodik olarak gözden geçirilmelidir	8	7	11
Risk ihmal edilebilir düzeydedir	12	12	9

5.3 Önerilen Yöntem ile İlgili Çıkarımlar

5.3.1 Teorik Çıkarım

Tez kapsamında önerilen yöntem, CREAM çerçevesini hidrojen vadisi tasarım süreci için bir risk değerlendirme modeli oluşturmak üzere yeniden yapılandırmaktadır. Bu doğrultuda olası hataların incelendiği OPK'lar hidrojen vadisi tasarımını etkileyecek boyutlar düzeyinde yeniden tanımlanarak nihai risk değerlendirmesinin bütüncül bir bakış açısıyla gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

İnsan güvenilirliği analiz yöntemi olarak orijinal CREAM, insan hatalarının bilimsel ve sayısal olarak ele almada güçlü bir yaklaşım sunmakta olmasına karşın uygulama aşamasında gerektirdiği yoğun gözlem, analiz ve hesaplama adımları zahmetlidir ve zaman almaktadır. CREAM ile hata analizi, ilgili operasyon alanında uzmanların olası hatalarla ilgili kapsamlı veri toplamasını gerektirmektedir. Ayrıca

hata olasılıkları, nominal değerler kullanılarak hesaplanması uzman görüşlerinin nicel olarak ifade edilmesi esnasında bilgi kaybına yol açar.

FMEA ve Fine-Kinney gibi klasik risk değerlendirme yöntemleri incelendiğinde, belirsizlik içeren durumlarda risklerin kantitatif değerlendirmesindeki nüansların ifade edilmesi bakımından yetersiz kaldıkları, karmaşık ortamlardaki risk değerlendirmesi süreçlerinde etkisiz olduğu görülmektedir (Konstandinidou vd., 2006). Bu yöntemler, parametreler arası ilişkileri risk değerlendirmesi kapsamına dahil etmemekte ve parametrelerin skaler çarpımı ile risk skorlarını hesaplamaktadır. Bu durum, risklerin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi zorlaştırmakta, risklerin yanlış önceliklendirilmesine ve etkisiz risk yönetimine sebep olabilmektedir.

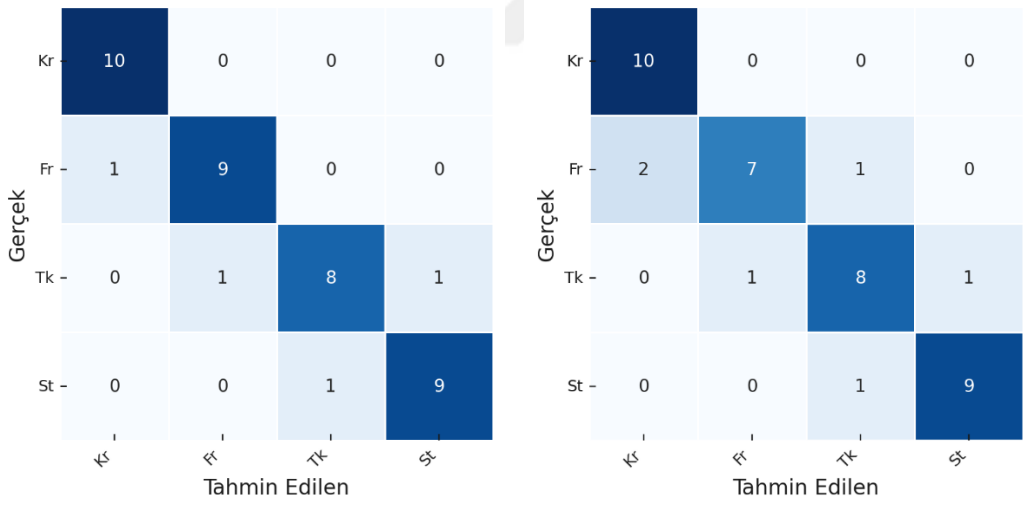
Uzman temelli süreçlerde, uzman yargılarının bilgi kaybını en aza indirecek biçimde sayısal olarak ifade edilmesi büyük bir problemdir. Risk değerlendirme süreçleri için başvurulacak uzman sayısının sınırlı olması ve uzman görüşlerinin heterojen olması sonuçların öznel ve tutarsız olmasına neden olmaktadır. İlgili kısıtın aşılabilmesi için literatürde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bilgi kaybını en aza indirmek ve belirsizliğin modelde temsil edilmesi için bulanık mantık yaklaşımı kullanılabilir. Yapay zekâ ise sınırlı verilerin genellenmesi, karmaşık ilişkilerin tanımlanması ve kalıpları desen konusunda öne çıkan bir başka yaklaşımdır (M. I. Jordan & Bishop, 2004).

Yapay sinir ağları (YSA) çoğunlukla rastgele ağırlıklarla başlatılır; ancak bu durum modellerin yakınsama süresini uzatmaktadır. Dolayısıyla uygun başlangıç ağırlıklarının belirlenmesi, modelin etkin ve doğru öğrenme sürecine yönlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Uzman değerlendirmelerinin sistemin yapısal modeline aktarılması ve bu yapının YSA modellerine aktarılması, rassal başlangıç ağırlıklarına kıyasla daha doğru sonuçlar verir (Hosseini vd., 2022).

Önerilen yöntem uzman görüşlerini dilsel değişkenler kullanarak ifade etmektedir. İlgili dilsel değişkenler ÜBS karşılıkları ile eşlenerek elde edilen kantitatif değerler risk değerlendirmesi sürecine aktarılır. Bu sayede risk değerlendirmesi sürecinde hassas ayrımların modellenmesi ve detaylı bir ölçüm yapılması hedeflenmiştir. Risk değerlendirme yöntemi finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutlar için bulanık DEMATEL ile OPK ilişkilerinin ortaya çıkartılmakta, ardından BBH

ile OPK'ların göreli ağırlıklarının tanımlanmaktadır. Tanımlanan yapısal modeller, risklerin boyutsal düzeyde bağlamsal kontrol modlarına sınıflandırılması için kurulan YSA modellerinde uzman yargılarının başlangıç çözümünde yansıtılabilmesi için kullanılır. Oluşturulan karar yapısı, risk değerlendirmesi için standart bir çerçeve oluşturmakta ve böylece aynı kapsamda gerçekleştirilecek gelecek değerlendirmeler için uzman görüşüne duyulan bağımlılığı azaltması hedeflenmiştir.

Risk değerlendirmesi süreçlerinde ortaya çıkabilecek en kritik hata risklerin yanlış olarak sınıflandırılmasıdır. Bu bağlamda gerçekleştirilen sınıflandırma hataları Tip I ve Tip II olarak ikiye ayrılır. Tip I hatalar, düşük öncelikli risklerin yüksek öncelikli gibi ele alınmasına, dolayısıyla kaynak israfına ve maliyet artışına neden olmaktadır. Tip II hatalar ise yüksek öncelikli riskin düşük öncelikli sayılması sonucu tehlikeli risklerin göz ardı edilmesine ve gerekli önlemlerin alınmamasına yol açmaktadır. Şekil 5.2 örnek olarak finansal ve altyapısal boyutlara ait test setlerinin karmaşıklık matrislerini göstermektedir, bu matrisler Tip I ve Tip II hatalarının incelenmesi için kullanılmaktadır.



(a) (b)

Şekil 5.2 Finansal (a) ve altyapısal (b) test setleri için karmaşıklık matrisi

Önerilen yöntem kapsamında oluşturulan YSA modellerinin çıktıları karmaşıklık matrisi ile analiz edildiğinde Tip I ve Tip II hata oranlarının düşük olduğu görülmektedir. Modellerin Tip I ve Tip II hatalarının düşük olması, sınıflandırma başarısının yüksek ve güvenilir olduğunu doğrulamaktadır. Genel sonuçlar, BKM

ölçeğinin uç değerlerini temsil eden Karmaşık ve Stratejik sınıflarının ayırt edilmesinin daha kolay olduğunu, Fırsatçı ve Taktiksel sınıfların arasındaki ayrım ise görece daha hassas olduğundan sınıflandırma için daha zorlayıcı olduğunu göstermektedir. Bu durum BKM sınıfları arasındaki ayrımın karar vericilerin OPK'lara atadığı önem derecesi ile değişen yapısal modele bağlıdır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda uzman tabanlı başlangıç ağırlıkları ile kurulan YSA modellerinin az sayıda veri kullanarak dahi gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilecek sonuçlar ürettiği söylenmektedir.

Farklı boyutlardan gerçekleştirilen risk değerlendirmelerinin nihai bir risk öncelik değerinde toplanması, bilgi kaybını önleyecek esnek bir mekanizma gerektirmektedir. Bu bağlamda BÇS uzmanların önceliklendirme mantığını kural tabanlı bir yapı ile temsil etmesi için güçlü bir araçtır (Aqlan & Lam, 2015). Önerilen yöntem, YSA'dan elde edilen sınıflandırma olasılıklarını BÇS'ye girdi olarak kullanmaktadır. Böylece hem risk değerlendirme indeksinin hem de önceliklendirme düzeyininim belirlenmesi aşamasında boyutsal düzeydeki uzman görüşlerinden faydalanılmasını sağlamaktadır. Hidrojen vadisi tasarım sürecinde ortaya çıkabilecek riskler için elde edilen RDİ değerleri ve risklerin bu indekslere göre önceliklendirilmesi finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik olmak üzere çok boyutlu bir değerlendirmenin sonucu olarak elde edilir. Böylece CREAM, YSA, BÇS, bulanık DEMATEL ve BBH'nin entegrasyonu ile belirsizlik altında risk önceliklendirme güvenilirliğini arttıran bir metodoloji ortaya konmuştur.

5.3.2 Yönetimsel Çıkarım

Gerçekleştirilen çalışma, büyüyen hidrojen ekonomisini desteklemek üzere güvenli ve sürdürülebilir bir hidrojen vadisinin tasarlanabilmesi için standartlaştırılmış kantitatif bir yöntem ortaya koymaktadır. Hidrojen vadileri gibi yoğun sermaye gerektiren projeler için yatırım önceliklerinin doğru belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda uzman deneyim ve görüşleri doğrultusunda risklerin kapsamlı biçimde değerlendirilerek önceliklendirilmesi, karar vericilerin mevcut kaynakları önceliği yüksek olan risklere karşı önleyici ve azaltıcı stratejiler geliştirmek için yönlendirmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, önerilen yöntem yapısal modelin kurulmasının ardından mevcut durumun yanı sıra uygulanan stratejilerin ardından risklerin yeniden değerlendirilmesi veya varsayımsal

senaryoların standart bir biçimde değerlendirmesine imkân tanımaktadır. Böylece aynı riskler farklı durumlarda standart bir yapı kullanılarak objektif biçimde karşılaştırılabilir. Önleyici ve düzeltici eylemlerin ardından ya da yeni koşullar ortaya çıktığında risklerin tanımlanan yapı ile yeniden sınıflandırılabilmesi, önerilen yöntem ile dinamik bir biçimde risk değerlendirilmesi gerçekleştirilmesine ve sürekli iyileştirmenin sağlanmasına imkân sağlamaktadır.

FMEA veya Fine-Kinney gibi geleneksel risk değerlendirme yöntemlerin aksine, geliştirilen yöntem riskleri çok boyutlu açıdan değerlendirmektedir ve uzman görüşlerinin nihai değerlendirmeye yansıtılması konusunda oldukça duyarlıdır. Bu kapsamda önerilen yöntem özellikle yüksek sermaye–yüksek risk niteliğindeki projelerde kullanıma uygundur. Risklerin kapsamlı ve hassas olarak önceliklendirilmesi, mevcut kaynakların en öncelikli risklere tahsis edilmesini sağlayarak hidrojen vadisinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Geliştirilen metodoloji ile risk değerlendirme sürecinde uygulanan sistematik değerlendirme, risklerin önceliklendirilmesi sürecini izlenebilir ve şeffaf hale getirmektedir.

Önerilen yöntem, uzman görüşlerine dayanarak OPK'ların yapısal modelini oluşturmakta, yine uzman görüşleriyle türetilen eğitim-test setleriyle YSA modellerini eğitmekte ve BÇS'de tanımlanan kural setleri ile hidrojen vadisi tasarımındaki risk değerlendirme sürecini standartlaştırmaktadır. Böylece uzman görüşlerindeki belirsizliklerin kantitatif olarak modele aktarılmış ve uzman görüşlerine olan bağımlılık azaltılmıştır. Uzman görüşlerinin kantitatif olarak modellenmesi sonucu gerçekleştirilen değerlendirmeler proje paydaşları arasında güven ve şeffaflığı güçlendirmektedir.

Risk değerlendirme yöntemleri sayesinde güvenli tasarlanan hidrojen vadileri, endüstriyel ve son kullanıcı sektörlerinin karbon-nötr hale gelmesine katkı sağlayarak temiz enerji altyapısının gelişimini desteklemekte ve iklim değişikliğine uyumu güçlendirmektedir.

5.3.3 Mevzuata Yönelik Çıkarım

Hidrojen enerjisinin sektörel ve son kullanıcı kullanımının yaygınlaştırılması, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi ve karbon salınımının azaltılması gibi

faydalarından toplumca yararlanılabilmesi için kapsamlı mevzuat altyapısının geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Kar vd., 2022).

Hidrojen vadilerinde güvenli operasyonu garanti altına almak ve risk gerçekleşmelerine bağlı ağır kayıpları önlemek için standartlaştırılmış bir risk değerlendirme metodolojisinin kullanımı kritik önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen çalışma hidrojen vadilerinde yürütülen üretim, depolama, taşıma ve kullanım faaliyetlerinin tamamını tasarım aşamasında çok boyutlu ve standart biçimde değerlendirmektedir. Risklerin önerilen yöntem ile önceliklendirilmesi zaman içerisinde güvenlik gerekliliklerinin tanımlanarak için kapsamlı bir düzenlemenin oluşturulması için bilgi birikiminin ortaya çıkmasına katkıda bulunur.

Sürdürülebilir enerji dönüşümü ve iklim değişikliği kapsamında en gelişmiş politikaları ortaya koyan Avrupa Birliği, hidrojen enerjisi ile ilgili geniş mevzuatlar oluşturmuş olmasına karşın henüz hidrojen vadileri kapsamında ortak bir risk yönetim standardına sahip değildir. Bununla birlikte, büyük kapsamlı ve karmaşık projelere dair risklerin azaltılması ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılması için inovasyon sermayesi ayırmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020). Bu politikaların genel hedefi yenilenebilir hidrojen enerjisinin düşük bütçeyle, sanayi ve son kullanıcılar tarafından güvenli olarak kullanılması ve hidrojenin enerji pazarında rekabetçi konuma gelmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda geliştirilen metodoloji, henüz tasarım aşamasında hidrojen vadilerinin analiz edilmesi ile ileride meydana gelebilecek büyük finansal kayıpların önlenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca yöntem, farklı senaryoların karşılaştırmalı analizine imkân sunması ve üretim, depolama gibi kapasitelerin arz-talep dengesini koruyacak biçimde belirlenmesi için stratejik bir çözümdür.

Avrupa Birliği'nin sürdürülebilir enerji kapsamındaki önemi bir diğer gündem maddesi ise enerji altyapıları arasındaki bağımlılık ilişkilerinin fiziksel ve dijital boyutlarının analiz edilmesine duyulan gereksinimdir (Avrupa Komisyonu, 2020). Çalışma kapsamında önerilen metodoloji hidrojen ile ilgili çeşitli altyapıları barından bir ekosistem olan hidrojen vadilerinin finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik boyutlar içerisindeki ve bu boyutlar arasındaki ilişkileri göz önünde bulundurarak kapsamlı bir önceliklendirme ortaya koymaktadır. Böylece

hem güvenlik hem de sürdürülebilirlik açısından mevzuat beklentilerini karşılayacak bütüncül bir yaklaşım ortaya koyulmaktadır.

Ulusal düzeyde ise gerçekleştirilen çalışma, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan 2024-2028 Stratejik Planı'nda belirtilen hidrojen enerjisi değer zincirinin geliştirilmesi, ticaret hacminin arttırılması, gerekli altyapının kurulması ve ilgili teknolojilerin gelişiminin sağlanması adına bir yöntem ortaya koymaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a).

6
SONUÇ

Tez çalışması temiz enerji dönüşümünün ve sürdürülebilir enerji girişimlerinin bir parçası olarak hidrojen vadilerinin güven uygulamalarını teşvik etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hidrojen vadilerinin tasarım aşamasındaki riskleri finansal, çevresel, altyapısal, yönetimsel ve teknik açılardan değerlendirerek nihai bir risk değerlendirme indeksi hesaplayan ve bu indeks değerine göre risklerin önceliğini belirleyen bir yöntem ortaya konmuştur. Geliştirilen yöntem CREAM çerçevesini temel almakta olup uzman görüşlerinin nicel olarak ifade edilebilmesi ve belirsizliğin modellenebilmesi adına bulanık mantık, yapay zekâ, bulanık DEMATEL, BBH ve BÇS yöntemlerini kullanmaktadır.

İlgili yöntem ile Türkiye kapsamında kurulması düşünülen bir hidrojen vadisi temel alınarak tasarım aşamasında karşılaşılabilecek riskler değerlendirilmiştir. Buna göre öncelikli olarak önlem alınması gereken riskin "R2. Enflasyon ve Faiz Oranı Değişikliği" olduğu tespit edilmiştir. Başta bu risk olmak üzere uygulama RDİ değeri yüksek çıkan riskler Türkiye gibi gelişmekte olan ve hidrojen enerjisine yeni adapte olmaya çalışan bir ulusun makroekonomik belirsizlikler, tedarik zinciri ve altyapı çalışmalarının ilgili projelerin sürdürülebilirliği açısından önemini vurgulamaktadır. Geliştirilen yöntemin uzman görüşlerine olan hassasiyeti duyarlılık analizleri ile gözlemlenmiş ve uzman görüşlerindeki farklılıkların nihai değerlendirme skorunda anlamlı değişikliklere neden olduğu gözlemlenmiştir.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda, önerilen yöntem daha geniş bir uzman grubunun görüşleri kullanılarak uygulanabilir. Böylece sonuçların güvenilirliği ve sağlamlığı artırılabilir. Standartlaştırılmış bir risk değerlendirme yöntemi olarak geliştirilen metodoloji gerçek bir hidrojen vadisi projesine uygulanarak gerçek

hayat problemlerindeki doğruluğu test edilebilir. Önerilen metodoloji, hidrojen vadilerinin tasarım aşamasına odaklanmakla birlikte, risk değerlendirme sürecinin sürekli bir süreç olması nedeniyle operasyonel riskleri de kapsayacak şekilde uyarlanabilir.

KAYNAKÇA

Aditiya, H. B., & Aziz, M. (2021). Prospect of hydrogen energy in Asia-Pacific: A perspective review on techno-socio-economy nexus. International Journal of Hydrogen Energy, 46(71), 35027-35056. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.070

Ahn, S. I., & Kurt, R. E. (2020). Application of a CREAM based framework to assess human reliability in emergency response to engine room fires on ships. Ocean Engineering, 216. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108078

Akhtar, F., Al-Amin Khan, M., Akbar Shaikh, A., & Fahad Alrasheedi, A. (2024). Interval valued inventory model for deterioration, carbon emissions and selling price dependent demand considering buy now and pay later facility. Ain Shams Engineering Journal, 15(3). https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102563

Akyüz, E., & Çelik, M. (2015). Application of CREAM human reliability model to cargo loading process of LPG tankers. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 34, 39-48. https://doi.org/10.1016/J.JLP.2015.01.019

Apaydın, O., & Aladağ, Z. (2022). Ranking the evaluation criteria of Hi-Fi audio systems and constricted information space: A novel method for determining the DEMATEL threshold value. Applied Acoustics, 190. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108584

Aqlan, F., & Lam, S. S. (2015). A fuzzy-based integrated framework for supply chain risk assessment. International Journal of Production Economics, 161, 54-63. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2014.11.013

Avrupa Komisyonu. (2020a). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.

Avrupa Komisyonu. (2020b). Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration .

Bampaou, M., & Panopoulos, K. D. (2025). An overview of hydrogen valleys: Current status, challenges and their role in increased renewable energy penetration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114923

Bao, Y., Tang, J., Lu, H., Wang, Y., Guo, C., Yu, Z., & Jiang, Y. (2013). Analysis of human reliability in power system switching operation considering dependency of operators. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. https://doi.org/10.1109/APPEEC.2013.6837155

Battaglia, V., & Vanoli, L. (2024). Power-to-X strategies for Smart Energy Regions: a vision for green hydrogen valleys. Energy Efficiency, 17(3). https://doi.org/10.1007/s12053-024-10194-0

Behret, H., Öztayşi, B., & Kahraman, C. (2011). A fuzzy inference system for supply chain risk management. Içinde Advances in Intelligent and Soft Computing (C. 124). https://doi.org/10.1007/978-3-642-25658-5_52

Birleşmiş Milletler. (2015). Paris Anlaşması. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Bishop, C. M. (2007). Pattern Recognition and Machine Learning. Içinde M. Jordan, J. Kleinberg, & B. Schölkopf (Ed.), Journal of Electronic Imaging (C. 16, Sayı 4). Springer. https://doi.org/10.1117/1.2819119

Bouraya, S., & Belangour, A. (2024). A comparative analysis of activation functions in neural networks: unveiling categories. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 13(5), 3301-3308. https://doi.org/10.11591/eei.v13i5.7274

Bouti, A., & Ait Kadi, D. (1994). A State-of-the-Art Review Of FMEA/FMECA. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 01(04), 515-543. https://doi.org/10.1142/S0218539394000362

Calá, E., Carrubba, G., Compare, M., Martini, A., Mascherona, R., Ricci, M., & Zio, E. (2020). IRIS: A novel approach to monitoring risk in safety critical plants. Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 2685-2692. https://doi.org/10.3850/978-981-14-8593-0_4030-cd

Chan, F. T. S., & Kumar, N. (2007). Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. Omega, 35(4), 417-431. https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.08.004

Chang, B., Chang, C. W., & Wu, C. H. (2011). Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria. Expert Systems with Applications, 38(3), 1850-1858. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.07.114

Chen, X., Liu, X., & Qin, Y. (2021). An extended CREAM model based on analytic network process under the type-2 fuzzy environment for human reliability analysis in the high-speed train operation. Quality and Reliability Engineering International, 37(1), 284-308. https://doi.org/10.1002/qre.2736

Chrysochoidis-Antsos, N., Escudé, M. R., & van Wijk, A. J. M. (2020). Technical potential of on-site wind powered hydrogen producing refuelling stations in the Netherlands. International Journal of Hydrogen Energy, 45(46), 25096-25108. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.125

Debnath, J., & Biswas, A. (2018). Assessment of occupational risks in construction sites using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process. Lecture Notes in Networks and Systems, 11, 283-297. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3953-9_28/TABLES/5

Desbalo, M. T., Woldesenbet, A. K., Tafesse, Z. S., Bargstadt, H. J., & Yehualaw, M. D. (2023). Maturity model for evaluating building maintenance practice: A fuzzy-DEMATEL approach. Cogent Engineering, 10(2), 2261226. https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2261226

Deveci, M., Varouchakis, E. A., Brito-Parada, P. R., Mishra, A. R., Rani, P., Bolgkoranou, M., & Galetakis, M. (2023). Evaluation of risks impeding sustainable mining using Fermatean fuzzy score function based SWARA method. Applied Soft Computing, 139, 110220. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2023.110220

Du, L., Liao, G., Wu, Y., Deng, Q., Li, A., & Mao, N. (2023). Safety Evaluation Modelling of Hydrogen Energy Industrial Chain for Transportation-energy Integration System in China. Journal of Physics: Conference Series, 2454(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2454/1/012013

Ericson, C. A. (2005). Hazard Analysis Techniques for System Safety. Içinde Hazard Analysis Techniques for System Safety. https://doi.org/10.1002/0471739421

Ficco, G., Arpino, F., Dell'Isola, M., Grimaldi, M., & Lisi, S. (2022). Development of a Hydrogen Valley for Exploitation of Green Hydrogen in Central Italy. Energies, 15(21). https://doi.org/10.3390/en15218072

Fikadu, E., Urgessa, T., & Das, M. (2025). MLP-SVM: a hybrid approach for improving the performance of the classification model for health-related documents from social media using multi-layer perceptron and support vector machine. Discover Applied Sciences, 7(4), 1-16. https://doi.org/10.1007/S42452-025-06851-3/FIGURES/9

Fine, W. T. (1971). Mathematical Evaluation For Controlling Hazards. Journal of Safety Research, 3(4).

Fontela, E., & Gabus, A. (1974). Events and economic forecasting models. Futures, 6(4), 329-333. https://doi.org/10.1016/0016-3287(74)90076-7

Ford Motor Company. (2011). FMEA Handbook (with Robustness Linkages). Ford Motor Company, Dearborn, MI.

Frankowska, M., Mańkowska, M., Rabe, M., Rzeczycki, A., & Szaruga, E. (2022). Structural Model of Power Grid Stabilization in the Green Hydrogen Supply Chain System—Conceptual Assumptions. Energies 2022, Vol. 15, Page 664, 15(2), 664. https://doi.org/10.3390/EN15020664

Galimberti, C., & Repetto, M. (2023). Neural Networks and Deep Learning. Içinde Impact of Artificial Intelligence in Business and Society: Opportunities and Challenges. https://doi.org/10.4324/9781003304616-5

Guillotin, A., Bergaentzlé, C., Dussartre, V., Heggarty, T., Massol, O., & Perez, Y. (2025). Hydrogen subsidies under three pillar-frameworks: A Europe-United States multi-stakeholder comparison. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 211. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115284

Guo, L., Su, J., Wang, Z., Shi, J., Guan, X., Cao, W., & Ou, Z. (2024). Hydrogen safety: An obstacle that must be overcome on the road towards future hydrogen economy. International Journal of Hydrogen Energy, 51, 1055-1078. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.248

Gül, M., Güven, B., & Güneri, A. F. (2018). A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 53, 3-16. https://doi.org/10.1016/J.JLP.2017.08.014

Gümüş, A., Yayla, A., Çelik, E., & Yıldız, A. (2013). A Combined Fuzzy-AHP and Fuzzy-GRA Methodology for Hydrogen Energy Storage Method Selection in Turkey. Energies, 6(6), 3017-3032. https://doi.org/10.3390/en6063017

Güney Marmara Kalkınma Ajansı. (2023, Mayıs 2). "HYSouthMarmara Hidrojen Vadisi Projesi ve Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu Güdümlü Projeleri"nde İmzalar Atıldı. https://www.gmka.gov.tr/haber/hysouthmarmara-hidrojen-vadisi-projesi-ve-guney-marmara-hidrojen-kiyisi-platformu-gudumlu-projeleri-nde-imzalar-atildi

Han, S., Li, H., Li, M., Zhang, J., Guo, R., Ma, J., & Zhao, W. (2022). Deep learning–based stochastic modelling and uncertainty analysis of fault networks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(6). https://doi.org/10.1007/s10064-022-02735-7

He, X., Wang, Y., Shen, Z., & Huang, X. (2008). A simplified CREAM prospective quantification process and its application. Reliability Engineering and System Safety, 93(2), 298-306. https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.10.026

Hienuki, S. (2017). Environmental and Socio-Economic Analysis of Naphtha Reforming Hydrogen Energy Using Input-Output Tables: A Case Study from Japan. Sustainability, 9(8), 1376. https://doi.org/10.3390/su9081376

Hirayama, M., Shinozaki, H., Kasai, N., & Otaki, T. (2018). Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 43(27), 12584-12594. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.05.003

Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability And Error Analysis Method (CREAM). Elsevier Science Ltd. http://www.elsevier.nl

Hollnagel, E. (2012). CREAM. https://erikhollnagel.com/ideas/cream.html

Hossain Bhuiyan, M. M., & Siddique, Z. (2025). Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. International Journal of Hydrogen Energy, 102, 1026-1044. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2025.01.033

Hosseini, S., Poormirzaee, R., Hajihassani, M., & Kalatehjari, R. (2022). An ANN-Fuzzy Cognitive Map-Based Z-Number Theory to Predict Flyrock Induced by Blasting in Open-Pit Mines. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(7), 4373-4390. https://doi.org/10.1007/S00603-022-02866-Z/FIGURES/14

İlbahar, E., Çolak, M., Karaşan, A., & Kaya, İ. (2022). A combined methodology based on Z-fuzzy numbers for sustainability assessment of hydrogen energy storage systems. International Journal of Hydrogen Energy, 47(34), 15528-15546. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.010

İlbahar, E., Kahraman, C., & Çebi, S. (2022). Risk assessment of renewable energy investments: A modified failure mode and effect analysis based on prospect theory and intuitionistic fuzzy AHP. Energy, 239, 121907. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121907

İlbahar, E., Karaşan, A., Çebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. Safety Science, 103, 124-136. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.10.025

Jordan, M. I., & Bishop, C. M. (2004). Neural networks. Içinde Computer Science Handbook, Second Edition.

Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2016). A fuzzy Bayesian belief network for safety assessment of oil and gas pipelines. Structure and Infrastructure Engineering, 12(8), 874-889. https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1053093

Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk. Risk Analysis, 1(1), 11-27. https://doi.org/10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X

Kar, S. K., Harichandan, S., & Roy, B. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. International Journal of Hydrogen Energy, 47(20), 10803-10824. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.137

Karaşan, A., & Kahraman, C. (2021). An Integrated Fuzzy DEMATEL and Fuzzy Cognitive Mapping Methodology for Prioritizing Smart Campus Investments. Içinde Advances in Intelligent Systems and Computing: C. 1197 AISC. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2_81

Karaşan, A., İlbahar, E., Çebi, S., & Kahraman, C. (2018). A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets. Safety Science, 108, 173-187. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.04.031

Kaya, İ., & Karaşan, A. (2020). Çok Kriterli Karar Verme. Umuttepe Yayınları.

Kim, M. C., Seong, P. H., & Hollnagel, E. (2006). A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM. Reliability Engineering & System Safety, 91(2), 191-199. https://doi.org/10.1016/J.RESS.2004.12.003

Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Kiranoudis, C., & Markatos, N. (2006). A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis. Reliability Engineering & System Safety, 91(6), 706-716. https://doi.org/10.1016/J.RESS.2005.06.002

Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International Journal of Man-Machine Studies, 24(1), 65-75. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80040-2

Kwak, J., Lee, H., Park, S., Park, J., & Jung, S. (2023). Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an Urban Area. Energies, 16(9), 3963. https://doi.org/10.3390/en16093963

Lam, C. Y., Fuse, M., & Shimizu, T. (2019). Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. International Journal of Hydrogen Energy, 44(36), 20572-20586. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.05.187

Lee, D., Kim, H., Koo, K., & Kwon, S. (2024). Human Reliability Analysis for Fishing Vessels in Korea Using Cognitive Reliability and Error Analysis

Method (CREAM). Sustainability (Switzerland), 16(9). https://doi.org/10.3390/su16093780

Li, J., Song, F., & Zhang, X. (2024). A review on hazards and risks to pipeline operation under transporting hydrogen energy and hydrogen-mixed natural gas. Science and Technology for Energy Transition, 79, 9. https://doi.org/10.2516/stet/2024004

Li, X., Han, Z., Zhang, R., Zhang, Y., & Zhang, L. (2020). Risk assessment of hydrogen generation unit considering dependencies using integrated DEMATEL and TOPSIS approach. International Journal of Hydrogen Energy, 45(53), 29630-29642. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.07.243

Li, Y. (2022). Research and Countermeasures on Fire and Explosion Risk of Hydrogenation Station Based on Fault Tree Analysis. ECITech 2022 - 2022 International Conference on Electrical, Control and Information Technology, 92-96.

Liu, H. C., Fan, X. J., Li, P., & Chen, Y. Z. (2014). Evaluating the risk of failure modes with extended MULTIMOORA method under fuzzy environment. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 34, 168-177. https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2014.04.011

Liu, J., Wang, K., Xu, A., & Wang, H. (2013). The analysis of common cause failure based on impact vector considering human factor diversity. Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013, 1733-1738. https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566648

Liu, P., Wu, Y., Li, Y., & Wu, X. (2024). An improved FMEA method based on the expert trust network for maritime transportation risk management. Expert Systems with Applications, 238, 121705. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.121705

Lyu, H. M., Zhou, W. H., Shen, S. L., & Zhou, A. N. (2020). Inundation risk assessment of metro system using AHP and TFN-AHP in Shenzhen. Sustainable Cities and Society, 56, 102103. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102103

Ma, Q., Guo, Y., Zhong, M., Ya, H., You, J., Chen, J., & Zhang, Z. (2024). Numerical simulation of hydrogen explosion characteristics and disaster effects of hydrogen fueling station. International Journal of Hydrogen Energy, 51, 861-879. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.05.129

Ma, Z., Chong, H.-Y., & Liao, P.-C. (2021). Development of a time-variant causal model of human error in construction with dynamic Bayesian network. Engineering, Construction and Architectural Management, 28(1), 291-307. https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2019-0130

Mahdi Rezaie, F., Fakoor Saghih, A. M., & Motahari Farimani, N. (2021). A novel hybrid approach based on CREAM and fuzzy ANP to evaluate human resource reliability in the urban railway. Journal of Transportation Safety and Security, 13(12), 1326-1364. https://doi.org/10.1080/19439962.2020.1738611

Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7(1), 1-13. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2

Maniram Kumar, A., Rajakarunakaran, S., & Arumuga Prabu, V. (2015). Quantification of Human Error Probability by Cognitive Approach in LPG Dispenser. International Journal of Applied Engineering Research, 10(11), 27635-27650.

Marseguerra, M., Zio, E., & Librizzi, M. (2006). Quantitative developments in the cognitive reliability and error analysis method (CREAM) for the assessment of human performance. Annals of Nuclear Energy, 33(10), 894-910. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.05.003

Menezes, C. A. de, Almeida, P. de S., Augusto, I. M. G., Paulinetti, A. P., Lovato, G., Rodrigues, J. A. D., & Silva, E. L. (2024). A techno-economic assessment of hydrogen and methane production from the anaerobic treatment of vinasse and glycerol: Single- vs. two-stage process. Process Safety and Environmental Protection, 187, 950-961. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.05.005

Mentes, A., Akyildiz, H., Yetkin, M., & Turkoglu, N. (2015). A FSA based fuzzy DEMATEL approach for risk assessment of cargo ships at coasts and open seas of Turkey. Safety Science, 79, 1-10. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2015.05.004

Mirza, N. R., Degenkolbe, S., & Witt, W. (2011). Analysis of hydrogen incidents to support risk assessment. International Journal of Hydrogen Energy, 36(18), 12068-12077. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.06.080

Mohsen, O., & Fereshteh, N. (2017). An extended VIKOR method based on entropy measure for the failure modes risk assessment – A case study of the geothermal power plant (GPP). Safety Science, 92, 160-172. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.10.006

Nie, Z., Chang, Y., Liu, X., & Chen, G. (2019). A DBN-GO approach for success probability prediction of drilling riser emergency disconnect in deepwater. Ocean Engineering, 180, 49-59. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.005

Önce, S., Onay, A., & Yeşilçelebi, G. (2015). Corporate Sustainability Reporting and Situation In Turkey. Journal of Economics Finance and Accounting, 2(2). https://doi.org/10.17261/Pressacademnia.2015211515

Özesmi, U., & Özesmi, S. L. (2004). Ecological models based on people's knowledge: A multi-step fuzzy cognitive mapping approach. Ecological Modelling, 176(1-2), 43-64. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027

Pal, S. K., & Mitra, S. (1992). Multilayer Perceptron, Fuzzy Sets, and Classification. IEEE Transactions on Neural Networks, 3(5), 683-697. https://doi.org/10.1109/72.159058

Pan, X., Lin, Y., & He, C. (2017). A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis. Quality and Reliability Engineering International, 33(7), 1299-1316. https://doi.org/10.1002/qre.2111

Park, S., Ahn, J., Choi, K., Kim, S., Yoo, Y., Kang, S., & Chang, D. (2019). Fuzzy-inference-based failure mode and effects analysis of the hydrogen production process using Thermococcus onnurineus NA1. International Journal of Hydrogen Energy, 44(26), 13135-13146. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.03.227

Pastore, L. M., Lo Basso, G., Sforzini, M., & Livio de, S. (2022). Technical, economic and environmental issues related to electrolysers capacity targets according to the Italian Hydrogen Strategy: A critical analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 166. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112685

Perelli, S., & Genna, G. (2022). Hazards Identification and Risk Management of Hydrogen Production and Storage Installations. Chemical Engineering Transactions, 96, 193-198. https://doi.org/10.3303/CET2296033

Petrollese, M., Concas, G., Lonis, F., & Cocco, D. (2022). Techno-economic assessment of green hydrogen valley providing multiple end-users. International Journal of Hydrogen Energy, 47(57), 24121-24135. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.210

Pique, S., Quesnel, S., Weinberger, B., Nouvelot, Q., Houssin, D., Vyazmina, E., Torrado, D., & Saw, J. L. (2022). Preliminary Risk Assessment of Hydrogen Refuelling Stations in a Multifuel Context. Chemical Engineering Transactions, 90, 229-234. https://doi.org/10.3303/CET2290039

Qin, J., Xi, Y., & Pedrycz, W. (2020). Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. Applied Soft Computing, 89, 106134. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2020.106134

Raghu Natha Reddy, V., & Gokulachandran, J. (2020). A comprehensive study in finding the risk assessment using a fuzzy analytical hierarchal model in textile industry: A case study. Materials Today: Proceedings, 24, 895-903. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.04.400

Ramsebner, J., Linares, P., Hiesl, A., & Haas, R. (2024). Techno-economic evaluation of renewable hydrogen generation strategies for the industrial sector. International Journal of Hydrogen Energy, 60, 1020-1040. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.167

Restelli, F., Spatolisano, E., Pellegrini, L. A., Cattaneo, S., de Angelis, A. R., Lainati, A., & Roccaro, E. (2024). Liquefied hydrogen value chain: A detailed techno-economic evaluation for its application in the industrial and mobility sectors. International Journal of Hydrogen Energy, 52, 454-466. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.107

Rosén, S., Göransson, L., Taljegård, M., & Lehtveer, M. (2024). Modeling of a “Hydrogen Valley” to investigate the impact of a regional pipeline for hydrogen supply. Frontiers in Energy Research, 12. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1420224

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323(6088), 533-536. https://doi.org/10.1038/323533a0

Sabato, M. R., Petti, C., & Ficarella, A. (2024). Supply Chain Resilience in Hydrogen Valleys: Addressing Challenges and Opportunities in Green Hydrogen Ecosystems. Industria, 45(3), 409-433. https://doi.org/10.1430/115855

San Marchi, C., Hecht, E. S., Ekoto, I. W., Groth, K. M., LaFleur, C., Somerday, B. P., Mukundan, R., Rockward, T., Keller, J., & James, C. W. (2017). Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards. International Journal of Hydrogen Energy, 42(11), 7263-7274. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.07.014

Sarwar, M., Gulzar, W., & Ashraf, S. (2023). Improved risk assessment model based on rough integrated clouds and ELECTRE-II method: an application to intelligent manufacturing process. Granular Computing, 8(6), 1533-1560. https://doi.org/10.1007/S41066-023-00385-Y/FIGURES/5

Schrotenboer, A. H., Veenstra, A. A. T., uit het Broek, M. A. J., & Ursavas, E. (2022). A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112744

Si, S.-L., You, X.-Y., Liu, H.-C., & Zhang, P. (2018). DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. Mathematical Problems in Engineering, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/3696457

Sun, D., Guo, D., & Xie, D. (2023). Using Multicriteria Decision Making to Evaluate the Risk of Hydrogen Energy Storage and Transportation in Cities. Sustainability (Switzerland), 15(2). https://doi.org/10.3390/su15021088

Suzuki, T., Shiota, K., Nakayama, J., Izatoa, Y.-I., & Miyake, A. (2022). Overview of the Risk Assessments for Hydrogen Refuelling Stations in Japan. Chemical Engineering Transactions, 90, 307-312. https://doi.org/10.3303/CET2290052

Taghizadeh-Hesary, F., Li, Y., Rasoulinezhad, E., Mortha, A., Long, Y., Lan, Y., Zhang, Z., Li, N., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). Green finance and the economic feasibility of hydrogen projects. International Journal of Hydrogen Energy, 47(58), 24511-24522. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.111

Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M. S., & Kabli, M. R. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. Applied Soft Computing, 17, 105-116. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2014.01.003

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023a). Paris Anlaşması (PA). https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-paris-anlasmasi

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023b). Rüzgar Enerji Santrallerine 233 Milyar Yatırım. https://www.sanayi.gov.tr/medya/haber/ruzgar-sektoru-turek-2023te-bulustu

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024a). 2024-2028 Stratejik Planı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/ETKB_2024-2028_Stratejik_Plani.pdf

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024b). Güneş. https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024c). Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) Modeli ve Uygulamaları. https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-uretim-faaliyetleri-yeka-modeli

T.C. Merkez Bankası. (2025). Elektronik Veri Dağıtım Sistemi. https://evds2.tcmb.gov.tr/index.php?/evds/serieMarket/collapse_46/5202/DataGroup/turkish/bie_enfbek/

Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. Psychological Review, 55(4), 189-208. https://doi.org/10.1037/H0061626

Ung, S. T. (2019). Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM. Ocean Engineering, 179, 159-172. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.03.031

Ung, S.-T. (2018). Human error assessment of oil tanker grounding. Safety Science, 104, 16-28. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.035

Valdez, R., Maldonado, Y., & Quevedo, J. A. (2023). Fuzzy Hardware Tool: An Adaptable Tool to Facilitate the Implementation of Fuzzy Inference Systems in Hardware. Electronics (Switzerland), 12(13). https://doi.org/10.3390/electronics12132853

Wang, X., Zou, X., & Gao, W. (2024). Flammable gas leakage risk assessment for methanol to hydrogen refueling stations and liquid hydrogen refueling stations. International Journal of Hydrogen Energy, 54, 1286-1294. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.11.255

Wang, Z. Z., & Chen, C. (2017). Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction projects. Tunnelling and Underground Space Technology, 70, 330-342. https://doi.org/10.1016/J.TUST.2017.09.012

Włodarczyk, R., & Kaleja, P. (2023). Modern Hydrogen Technologies in the Face of Climate Change—Analysis of Strategy and Development in Polish Conditions. Sustainability (Switzerland), 15(17). https://doi.org/10.3390/su151712891

Wu, Y., Chu, H., & Xu, C. (2021). Risk assessment of wind-photovoltaic-hydrogen storage projects using an improved fuzzy synthetic evaluation approach based on cloud model: A case study in China. Journal of Energy Storage, 38, 102580. https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102580

Xi, Y. T., Yang, Z. L., Fang, Q. G., Chen, W. J., & Wang, J. (2017). A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations. Ocean Engineering, 138, 45-54. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.018

Yang, L., Su, Q., & Shen, L. (2012). A novel method of analyzing quality defects due to human errors in engine assembly line. Proceeding of 2012

International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2012, 3, 154-157.

Yang, Z., Abujaafar, K. M., Qu, Z., Wang, J., & Nazir, S. (2019). Use of evidential reasoning for eliciting bayesian subjective probabilities in human reliability analysis: A maritime case. Ocean Engineering, 186. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.077

Yang, Z. L., Bonsall, S., Wall, A., Wang, J., & Usman, M. (2013). A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering. Ocean Engineering, 58, 293-303. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2012.11.003

Yang, Z., Wang, J., Rochdi, M., & Belkacem, O. (2011). Bayesian modelling for human error probability analysis in CREAM. ICQR2MSE 2011 - Proceedings of 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, 137-142. https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2011.5976584

Yu, J., Xu, Y., Yu, Y., & Wu, S. (2024). A novel failure mode and effect analysis model using personalized linguistic evaluations and the rule-based Bayesian network. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 127, 107345. https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2023.107345

Yücesan, M., & Kahraman, G. (2019). Risk evaluation and prevention in hydropower plant operations: A model based on Pythagorean fuzzy AHP. Energy Policy, 126, 343-351. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.11.039

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8(3), 338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

Zhao, H., Yu, G., & Cheng, X. (2023). Risk management of hydrogenation station PPP project based on 3D framework—A case study in China. PLoS ONE, 18(12 Decembe). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293348

Zhou, C., Yang, Z., Chen, G., & Li, X. (2024). Optimizing hydrogen refueling station layout based on consequences of leakage and explosion accidents. International Journal of Hydrogen Energy, 54, 817-836. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.09.210

Zhou, Q., Wong, Y. D., Xu, H., Thai, V. V., Loh, H. S., & Yuen, K. F. (2017). An enhanced CREAM with stakeholder-graded protocols for tanker shipping safety application. Safety Science, 95, 140-147. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.02.014

Zhu, X., Wang, C., Xie, Q., & Zhang, A. (2024). Screening of accident scenarios of hydrogen refueling stations based on HyRAM+ and Latin hypercube sampling. International Journal of Hydrogen Energy, 50, 1406-1419. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.11.050

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Olgac, E., Karasan, A., & Kaya, İ. (2025). Modified Cognitive Reliability and Error Analysis Method for risk assessment in hydrogen valley construction. *Proceedings of the 8th IET Smart Cities Symposium (SCS 2024),* Bahrain, 1–3 December 2024. Institution of Engineering and Technology. https://doi.org/10.1049/icp.2025.0812