



OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi  
8(1): 266-284, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and  
Technology, 8(1): 266-284, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University  
Journal of The Institute of Science  
and Technology



## FUCOM ve MOORA Yöntemleri ile Hidrojen Enerjisinde Risk Faktörlerine Göre Tesis Yeri Seçimi

Ayşe Nuray CANAT<sup>1\*</sup>, Coşkun ÖZKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8527-550X>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0318-8614>

\*Sorumlu yazar: ayse.canat@izu.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 15.05.2024

Kabul tarihi: 10.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Hidrojen enerjisi

Risk analizi ve değerlendirilmesi

Yer seçimi

FUCOM

MOORA

### ÖZ

Fosil yakıtların tükenmesi, küresel ısınmayı önlemek, yaşanabilir ve sürdürülebilir bir yaşam için temiz enerjinin önemi giderek artmaktadır. Bunu sağlamak için kullanılan yenilenebilir enerjiler çok çeşitlidir. Bu kaynaklardan olan hidrojen enerjisi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Hidrojen enerjisi, bu yüzyılın devamında en popüler enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu enerji tesisinin kurululumunun, üretiminin, taşınmasının ve depolanmasının içerdiği tehlikeler ve sonucunda oluşan riskler vardır. Yenilenebilir enerjiyi en uygun biçimde kullanabilmek ve maksimum yarar sağlayabilmek için bu risklerin tespiti, tanımlanması, analiz edilmesi ve önlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hidrojen enerjisi üretim ve depolama tesisinde oluşması muhtemel tehlikeli durumlar ve riskler literatür taraması yoluyla analiz edilmiştir. Elde edilen risk faktörleri tecrübeli sektör çalışanları ve konusunda uzman akademisyenlerce değerlendirilmiştir. Hidrojen enerji tesis yeri seçimi için en önemli faktörlerden olan risk göz önüne alınarak yapılan ilk çalışma olması sebebiyle literatüre katkı sağlamaktadır. Karada veya denizde kurulması opsiyonel olan hidrojen enerji santrali için, risk faktörleri çerçevesinden FUCOM ve MOORA yöntemleri ile değerlendirme yapılmış ve enerji santralinin karada kurulmasına karar verilmiştir.

## Facility Location Selection According to Risk Factors in Hydrogen Energy with FUCOM and MOORA

### Research Article

#### Article History:

Received: 15.05.2024

Accepted: 10.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Hydrogen energy

Risk analysis and assessment

Site selection

FUCOM

MOORA

### ABSTRACT

The importance of clean energy is gradually increasing for the depletion of fossil fuels, preventing global warming, and a livable and sustainable life. The renewable energies used to achieve this are very diverse. Hydrogen energy from these sources is the subject of this study. Hydrogen energy is seen as the most popular energy source for the rest of this century. There are hazards and consequent risks involved in the installation, production, transportation and storage of this power plant. In order to use renewable energy in the most appropriate way and to provide maximum benefit, these risks need to be identified, defined, analyzed and prevented. In this study, possible dangerous situations and risks that may occur in the hydrogen energy production and storage facility were analyzed through literature review. Obtained risk factors were evaluated by experienced sector workers and academicians specializing in hydrogen energy. For the hydrogen power plant, which is optional to be built on land or at sea, an evaluation was made with the FUCOM and MOORA methods within the framework of risk factors, and it was decided to establish the power plant on land.

## **1. Giriş**

Dünya, artan sera gazı emisyonu, fosil kaynakların tükenmesi durumu ve buna karşın enerji talebinin gün geçtikçe artması sorunlarıyla karşı karşıyadır. Enerji kaynaklarının verimli kullanımını ve doğa dostu yeşil enerji üretimini sağlamak amacıyla dünya ülkeleri alternatif enerji kaynağı arayışına girmişlerdir. Bunu sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelikli olarak da yeşil hidrojen üretimine yatırım yapmaya önem vermişlerdir. Yalnız doğadan sağladığımız enerjiler sürekli değildir ve bu durum enerji talebini karşılarken sıkıntı oluşturabilir. Bunun için yenilenebilir enerji kaynaklarında, enerji depolamasını sağlamak önemlidir. Böylelikle enerji talebinin yüksek olduğu zaman dilimlerinde depolanan enerjiden faydalanılabilir. Enerji depolama teknolojileri son yıllarda sıkça çalışma yapılan alanlardan biridir. Literatürde, enerji depolama teknolojisinin hat tıkanıklığı yönetimine, güç kalitesinin sağlanmasına, güç kaynağı güvenilirliğinin artırılmasına ve yüksek oranda yenilenebilir enerjinin soğurulmasında önemli bir rol oynadığına işaret edilmiştir (Albertus ve ark., 2020). Enerji depolama teknolojilerden hem yeşil enerji olması, hem de birçok kullanım alanının oluşmasından dolayı yenilenebilir enerjiden hidrojen enerjisi elde etmek tercih edilmektedir (Norouzi, 2021) Hidrojen enerjisi, uluslararası enerji ajansı tarafından geleceğin enerji vektörlerinden biri olarak görülmektedir (Bermudez ve Hannula, 2021).

Enerji santrali yer seçimi yapılırken literatürde yaygın olarak üretilecek enerjinin dağıtımı, enerji santrali kurulacak bölgenin ulaşım ağlarına yakınlığı, çevreye zarar oluşturabilecek durumlar gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Bunlar enerji tesis yeri seçimi için öncelikli konulardır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur, tesisin oluşturabileceği risklerin de değerlendirmesi gerekliliğidir. Herhangi bir enerji tesisinin enerji üretimine başlaması için geçen süre uzun bir zaman dilimini kapsar. Bu zaman diliminde tesisin inşaatından işletmeye alınmasına kadar birçok operasyon söz konusudur. Her bir operasyon için de oluşabilecek riskler söz konusudur. Bu yüzden tehlikeli durumların incelenmesi, risklerin analiz edilmesi, değerlendirilmesi, azaltılması için alınacak önlemlerin oluşturulması, acil durum müdahaleleri, oluşabilecek sonuçların çevreye etkilerinin değerlendirilmesi vb. işlemler gerekmektedir. Bunun için tesisin yerinin seçimi yapılırken risk faktörünün de değerlendirmeye alınması gerekmektedir.

Risklerin değerlendirilmesinde çeşitli amaçlar vardır. Bunlardan ilki incelemek istediğimiz sistemdeki faaliyetler ve süreçler hakkında detaylı bilgi sahibi olup belirsizliklerin tespit edilmesidir. Bir diğeri de, elde ettiğimiz analiz neticesinde bu belirsizliklerden hangisinin ne ölçüde engellenebileceğini değerlendirip tanımlamaktır. Son olarak ise bu belirsizlikler karşısında nasıl seçenekler tasarlanıp, riski azaltmaya yönelik hangi uygulamaların yapılabileceğini belirlemektir. Hidrojen enerjisi gibi nispeten yeni teknolojilerde ve tesislerde tecrübe azlığından dolayı olası tüm tehlikelerin göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan çalışma ile hidrojen enerjisindeki tehlikeli durumlar, bunların oluşturduğu riskler ve sonuçları hakkında fikir oluşturulmuştur. Kötü nihayetlenen olayların yaşanmaması ve/veya

azaltılması için ilgili riskler kategorize edilmiştir. Ana başlıklar üzerinden, tesis ve çevre güvenliği için hidrojen tesisinin kurulum yeri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada diğer yer seçim faktörlerinden farklı olarak “risk“ faktörünün ele alınması enerji kaynağının kolay yanabilme ve patlama özelliğinin olmasından kaynaklanmaktadır. Fosil kaynakların tükenmek üzere olduğu, alternatif enerji kaynak arayışlarının arttığı günümüzde diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte hidrojen enerjisi çıkış kapısı olarak görülmektedir. Hidrojen enerjisindeki depolanabilme özelliği, ona diğer yenilenebilir kaynaklara göre avantaj kazandırmakla beraber hibrit sistemler için bulunmaz kılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sadece hidrojen enerji tesisleri için değil, hidrojen enerjisi ile birlikte kullanılacak tüm hibrit enerji sistemleri için yol gösterici niteliktedir.

## **2. Materyal ve Metot**

### *2.1. Hidrojen Enerjisi*

Hidrojen doğada en yaygın olarak bulunan elementtir. Diğer elementler ile birleşerek moleküler yapıda bulunur. Normal koşullarda zehirli ve zarar verici bir gaz değildir. Hidrojenin üç adet ana görevi bulunmaktadır. Bunlardan ilki araçlar için yakıt olarak kullanılmasıdır. Günümüzde hidrojenli yakıtlar özellikle Asya ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğerleri hammadde olması durumudur. Çeşitli üretim dallarında (örneğin metal sanayisi) hidrojen hammadde olarak kullanılmaktadır. Üçüncü görevi ise enerjiyi taşımak için kullanılmasıdır.

Hidrojen enerjisi, hidrojen moleküllerinin ayrışması neticesinde ortaya çıkan kimyasal bir enerjidir. Farklı metodolojiler kullanarak elektrik ve ısı formuna dönüştürülebilmektedir. Hidrojen enerjisi elde edilmesi için öncelikle hidrojen üretim kaynaklarının neler olduğunu bilmek gerekmektedir. Hidrojen, su, fosil kaynak, biyokütle vb. kaynaklardan elde edilebilir. Temiz enerji ve yeşil hidrojen üretimi için kaynağın ne olduğu dışında, hidrojenin elde edilme yöntemi de büyük önem arz etmektedir. Hidrojen üretim yöntemleri için kimyasal, elektroliz, fotoliz, biyoliz, radyoliz ve termoradyoliz yöntemler sıralanabilir. Bu yöntemlerin altında farklı üretim metodolojilerine sahip çeşitlendirmeler mevcuttur. Günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak fosil kaynaklı enerji kullanılmaktadır. Hidrojen renk skalası kullanılarak, üretilen hidrojenin kaynağı ve üretim yöntemi hakkında fikir sahibi olunabilir. Gri hidrojen, üretim metodu olarak buhar metan reformasyonu kullanılırken kaynak olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Mavi renk skalasına sahip hidrojen üretiminde karbon yakalama ve depolama teknolojisi gibi karbon salınımını azaltıcı uygulamalar söz konusudur. Sarı hidrojen, suyun elektrolizi söz konusudur, elektroliz işlemi için nükleer enerji kaynakları kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen de suyun elektrolizi söz konusudur. Elektroliz işlemi için gereken elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Gri renkten yeşil renge doğru giden bu skalada karbon salınımı gittikçe azalmaktadır. Temiz enerji için çevreyi kirletici kaynak ve teknolojileri kullanmak doğru değildir. Bunun için de hidrojen üretiminde üzerinde en çok durulan yöntem elektroliz yöntemidir. Elektroliz işlemi için gereken enerji, birincil enerji kaynaklarından sağlanabilmektedir. Yeşil hidrojen için birincil enerji kaynaklarının yenilenebilir olanları kullanılmaktadır.

Hidrojen enerjisi ile ilgili olarak üretim metodolojisi, birincil enerji kaynağı seçimi, üretim tesisinin kurulum yeri seçimi, tesisin bakım-onarımı ve işletilmesi, hidrojenin ilgili bölgelere taşınması ve depolanması gibi süreçlerde özenli ve duyarlı çalışılması gerekmektedir.

### *2.1.1. Literatür Taraması*

Hidrojen gazı kolay yanabilen bir gazdır. Hafifliğinden ötürü görünmeyen bir alev ya da yüksek basınçlı alanlardaki statik elektrik bile yanmasına sebep olabilir. Bu sebeple hidrojenle ilgili değerlendirme yapılırken tüm süreçlerin, tekniklerin, kullanım alanlarının göz önüne alınması büyük önem arz etmektedir. Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması, yakıt olarak kullanılması vb. süreçlerindeki tehlikelerin tespit edilip güvenliğin sağlanması gerekmektedir. Literatür, hidrojen enerjisinin tehlikeleri, riskleri olarak tarandığında hidrojen enerjisinin tüm süreçleri hakkında çeşitli makaleler bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelenirken “hidrojen enerjisi”, “hidrojen enerjisindeki riskler”, “hidrojen üretimi”, “hidrojen taşınması”, “hidrojen depolanması”, “hidrojen üretimindeki tehlikeler ve riskler”, “hidrojen taşınmasındaki tehlikeler ve riskler”, “hidrojen depolanmasındaki riskler ve tehlikeler”, “hidrojen veri tabanlarındaki kazalar”, “iş sağlığı ve güvenliği açısından hidrojen”, “hidrojen kullanım alanları” terimlerini içeren makaleler WOS ( Web of Science), Scopus, Wiley Online Library, SpringerLink, ScienceDirect, Taylor & Francis Online Journals, Ulakbim veri tabanlarında taranmıştır. Literatürdeki yayınlar farklı sınıflandırmalar ile tablolaştırılarak Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Aprea, 2009									✓		
Zhiyong ve ark., 2010				✓							
Zhiyong ve ark., 2011				✓							
Mirza ve ark., 2011							✓				
Haugom ve Friis-Hansen, 2011				✓							
Lachance ve ark., 2011	✓										
Pasman, 2011											✓
Kim ve ark., 2011											✓
Cristina Galassi ve ark., 2012							✓				
Jafari ve ark., 2012									✓		
Najjar, 2013							✓				
Groth ve Tchouvelev, 2014			✓								
Lowesmith ve ark., 2014					✓						
Groth ve Hecht, 2015										✓	
Mohammadfam ve Zarei, 2015									✓		

**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar (devamı)

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Kasai ve ark., 2016									✓		
LaFleur ve ark., 2017				✓							
Groth ve Hecht, 2017										✓	
Skjold ve ark., 2017										✓	
Huang ve Ma, 2018	✓										
Honselaar ve ark., 2018							✓				
Spada ve ark., 2018		✓									
Pu ve ark., 2019					✓						
Lam ve ark., 2019			✓								
Chang ve ark., 2019				✓							
Moradi ve Groth, 2019		✓									
Shi ve ark., 2020	✓										
Ustolin ve ark., 2020						✓					
Li ve ark., 2020									✓		
Malakhov ve ark., 2020								✓			

**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar (devamı)

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Hansen, 2020							✓				
Hadeif ve ark., 2020											✓
Abohamzeh ve ark., 2021											✓
Zarei ve ark., 2021									✓		
Yoo ve ark., 2021				✓							
Correa-Jullian ve Groth, 2022					✓						

Hidrojen enerjisinde risk analiz ve değerlendirmesi yapabilmek için literatürdeki kaynaklar taranmış ve olaylar ana olay, ara olay ve son olay olarak gruplandırılmıştır. Ana olay, olayın başlamasına sebebiyet veren sorunlar olarak tanımlanmıştır. Hidrojen enerjisi santrali için ana olaylar; hatalı çalışma, yetersiz bakım, yetersiz tasarım, yanlış yapım ve montaj, dış etkiler olarak ifade edilebilir. Ara olaylar ise, ana olayın sebebiyet verdiği sızıntı, yırtılma, delinme, tutulma, çatlak/delik gibi sorunlardır. Son olaylar da ara olayların neticesinde oluşur. Genel başlıklar halinde sıralayacak olursak yangın, patlama ve toksik salınım gibi insan sağlığına ve çevreye büyük zararları olan durumlardır. Bu sınıflandırmadan yola çıkarak hidrojen enerjisi santralleri için risk oluşturacak kriterler beş ana başlık altında toplanmıştır. Bu başlıklar yönetim, tasarım hatası, teknik (yanlış yapım ve montaj), bakım-onarım, operatör hatasıdır. Çalışmada, tesis yeri seçimi için ilk aşama olan, “karada mı, deniz üstünde mi üretim yapalım?” sorusuna risk faktörü perspektifinden cevap aranmaktadır. Yapılan literatür taramasında bu içerikte bir çalışmanın olmadığı görülmektedir. Çalışma bu yönü ile bundan sonraki çalışmalar için yol gösterici olacak niteliktedir.

## 2.2. FUCOM (Tam Tutarlılık Yöntemi)

Pamucar ve arkadaşları (Pamučar ve ark., 2018) tarafından geliştirilen bu yöntemde doğrusal programlama temeli model olarak alınmıştır. Yöntemde, ilgili kriterlerin karşılaştırmalı öncelikleri kriterlerin arasındaki ilişkiyi belirlemektedir. Modelin çözümünde optimal ağırlık değerleri ve tam tutarlılıktan sapma (TTS) derecesi bulunur. TTS ile kriter ağırlıklarının güvenilir olup olmadığı sonucuna ulaşılır. Daha az sayıda karşılaştırma yaparak sonuca ulaşması hem kolaylık hem de güvenilirlik olarak yöntemde olumlu değer katmaktadır.

Yöntem, sosyal sürdürülebilirliği göz önüne alan tedarikçi seçim sürecinde (Nasseri ve ark., 2023), tedarik zincirinin performansını iyileştirmek için üçüncü taraf lojistik hizmet sağlayıcılarının seçiminde (Nila & Roy, 2023), video oyun endüstrisinin değerlendirilmesinde (Nemati ve ark., 2023), iş güvenliği risklerinin önceliklendirilmesinde (Gölcük ve ark., 2023), elektrikli şarj istasyonları için yer seçiminde (Gökler, 2024) gibi farklı karar problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yöntemin işlem basamakları aşağıda özetlenmiştir (Pamučar ve ark., 2018).

**Adım 1.** Karar vericiler tarafından kriterler önem düzeylerine göre sıralanır (Eşitlik 1). Sıralama, en önemli olandan en az önemli olana doğru yapılmaktadır. Aynı önem derecesine sahip kriterler arasında eşitlik “=” işareti konulmaktadır.

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

**Adım 2.** Sıralanan kriterler arasındaki karşılaştırmalı öncelikler belirlenir.  $\varphi_{k/(k+1)}$ , burada k ile kriterlerin sırası temsil edilmektedir.

$\varphi_{k/(k+1)}$ ,  $C_{j(k)}$  kriterinin sıralamasının  $C_{j(k+1)}$  kriterinin sıralamasına göre avantajını temsil eder. Böylece Eşitlik 2’deki değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı önceliklerinin vektörleri elde edilir:



$$\Phi = ( \varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \varphi_{3/4}, \dots, \varphi_{k/(k+1)} ) \quad (2)$$

FUCOM yönteminde karar vericiler, kriterleri ikili karşılaştırırken tamsayı, ondalık değer vb. ölçek değerleri kullanılabilir.

Son adımda, değerlendirme kriterinin ağırlık katsayılarının son değerleri  $( w_1, w_2, w_3, \dots, w_n )^T$  hesaplanır. Ağırlık katsayılarının son değerlerinin aşağıda belirtilen iki koşulu sağlaması gerekmektedir. Koşul 1. Ağırlık katsayılarının oranı, Eşitlik 3’de belirtildiği gibi gözlemlenen kriterler arasındaki karşılaştırmalı önceliğe  $(\varphi_{k/(k+1)})$  eşittir.

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (3)$$

Koşul 2. Ağırlık katsayılarının son değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu sağlamalıdır, yani

$$\varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$$

Ayrıca  $\varphi_{k/(k+1)} = \frac{w_k}{w_{k+1}}$  ve  $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}}$  olduğu için  $\frac{w_k}{w_{k+1}} \times \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}$  elde edilir. Böylece, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin yerine getirmesi gereken başka bir koşul Eşitlik 4’teki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (4)$$

Tam tutarlılık, yani minimum TTS ( $\chi$ ), yalnızca geçişliliğe tam olarak uyulduğunda gerçekleşir. Bu şekilde maksimum tutarlılık (0,000) sağlanır, yani ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri için TTS değeri  $\chi=0$ ’dır.

Sonuç olarak, tanımlanan ayarlara dayanarak değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının son değerlerinin belirlenmesine yönelik nihai model Eşitlik 5’teki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{array}{l} \min \chi \text{ s.t.} \\ \left. \begin{array}{l} \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi, \forall j \\ \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi, \forall j \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j \end{array} \right\} \quad (5) \end{array}$$

Eşitlik 5’teki modelin çözülmesi ile değerlendirme kriterlerinin  $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$  nihai değerleri ve TTS ( $\chi$ ) derecesi elde edilir.

#### 2.4. MOORA (Oran Analizi ile Çok Amaçlı Optimizasyon)

MOORA metodu; ilk olarak 2006 yılında Brauers ve Zavadskas tarafından önerilmiştir (Brauers ve Zavadskas, 2006). Yöntemde tüm hedeflerin, alternatiflerin ve ikisi arasındaki etkileşimin eş zamanda değerlendirilmesi öne çıkan özelliktir. Literatürde yöntemin farklı alt yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar; Oran Metodu, Referans Nokta Yaklaşımı, Önem Katsayısı gibi. Yapılan çalışmalarda oran yöntemleri ve referans noktası yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada MOORA oran yönteminin kullanılmıştır. Oran yönteminin çözüm aşamaları aşağıda verilmiştir (Brauers ve Zavadskas, 2006).

##### **Adım 1.** Amaçların ve Alternatiflerin Performans Değerlerinin Belirlenmesi:

Amaçların belirlenmesi ve farklı alternatif değerlerinin ortak tek bir matriste gösterilmesiyle başlar. Eşitlik 6'da bu şekilde oluşturulan matris gösterilmektedir. Kriterlerin maliyet ve fayda olup olmadığı belirtilmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

##### **Adım 2.** Matris normalizasyonu:

Eşitlik 7 ile normalizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında, her bir hücredeki değerin bulunduğu sütundaki değerlerin karelerinin toplamının kareköküne bölünmesi söz konusudur.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (7)$$

( $x_{ij}^*$  normalize edilmiş karar matrisini ifade etmek üzere)

##### **Adım 3.** Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin elde edilmesi

Kriterlerin ağırlık değerlerini bulunduğu sütundaki her bir değer ile çarptığımızda elde edilir.

##### **Adım 4.** Alternatiflerin sıralanması

Sıralamayı yaparken Eşitlik 8'deki formül kullanılmaktadır.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (8)$$

( $j=1,2,\dots,g$  maksimize edilecek hedefler için ;  $j=g+1,g+2,\dots,n$  minimize edilecek hedefler için)

Formüldeki  $y_i^*$ , j alternatifinin tüm hedeflere göre normalleştirilmiş değerlendirilmesi, maksimize edilen değerlerin toplamı ile minimize edilen değerlerin toplamı arasındaki farkı ifade etmektedir. Sıralama aşamasında ise en büyük değere sahip olan  $y_i^*$  değeri en iyi alternatif olarak ifade edilmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Kriterlerin Belirlenmesi

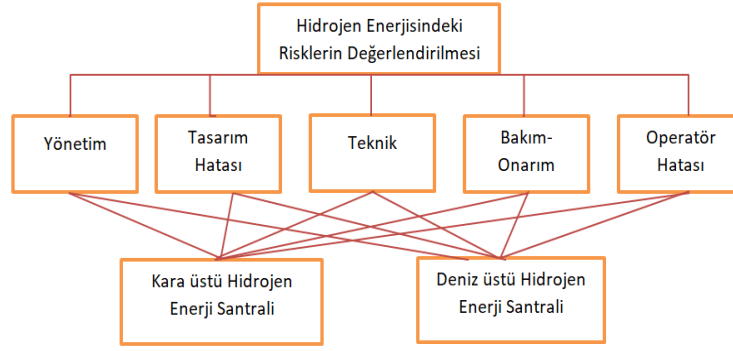
Çalışmada hidrojen enerjisi santrali yer seçimi çalışması yapılacaktır. Karada ve deniz üstünde hidrojen tesisi olmak üzere iki adet alternatif mevcuttur. Yer seçimi yaparken sadece oluşabilecek riskler ve bu risklerin sonuçlarının doğuracağı etkiler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Problemin hiyerarşik yapısı Şekil 1’de verilmektedir.

Çalışmada kullanılacak risk faktörleri literatür taraması yoluyla elde edilmiş ve benzer faktörler birleştirilerek yönetim, tasarım hatası, teknik, bakım ve çalışan hatası olmak üzere 5 ana başlık elde edilmiştir. Bu faktörler elde edilirken ( Mirza ve ark., 2011; Lowesmith ve ark., 2014; Li ve ark., 2020) çalışmalarındaki veriler baz alınmış olup, uzmanlarca uygunluğu değerlendirildikten sonra çalışmanın kriterleri belirlenmiştir. Tablo 2’de kriterler ve tanımlamaları gösterilmektedir.

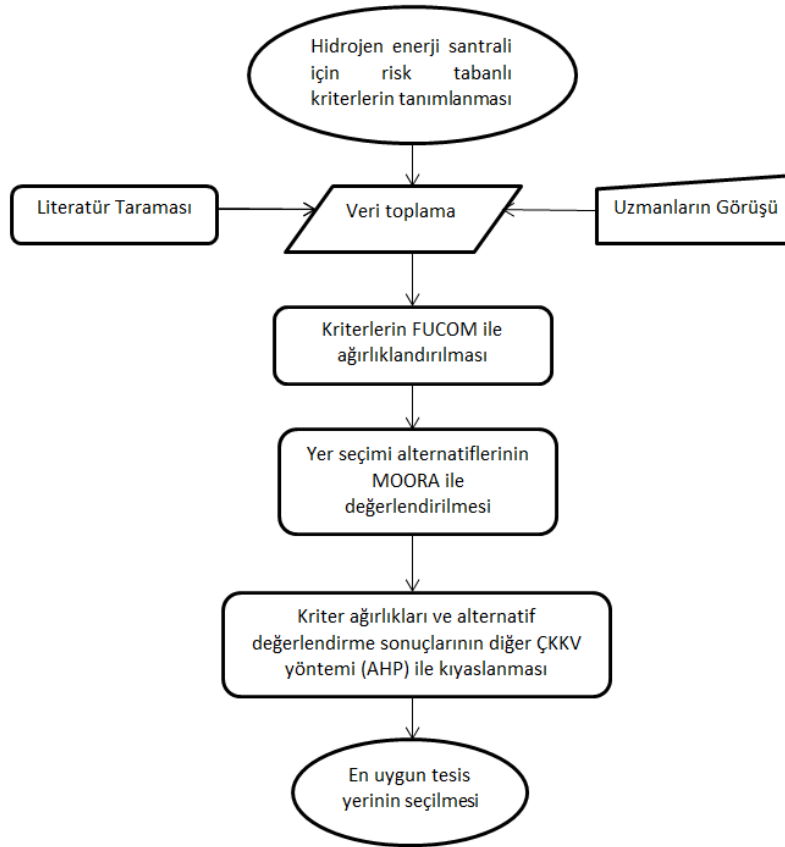
**Tablo 2.** Hidrojen tesisi yer seçimi için risk perspektifli kriterler ve tanımlamaları

<b>Kriterler</b>	<b>Açıklamaları</b>
<b>Yönetim (K1)</b>	Yönetim ifadesi ile fabrikanın sorumlu bölümü tarafından alınan bir karar neticesinde istenmeyen bir olayla sonuçlanması muhtemel durumları ifade etmek için kullanılmaktadır.
<b>Tasarım Hatası (K2)</b>	Tesisin işletmeye alınmadan evvel mevcut olan ve istenmeyen bir olaya sebebiyet verebilecek kusurlarından bahsedilmektedir.
<b>Teknik (K3)</b>	Santral işletmeye alındıktan sonra teknik personel tarafından yapılan yanlış ekipman kurulumu, yanlış karar gibi nedenlerden kaynaklanan tüm sorunları içerir.
<b>Bakım-Onarım (K4)</b>	Tesisin rutin kontrollerinde, kontroller neticesinde oluşan onarım işlemleri sırasında çıkan tüm nedenleri içerir.
<b>Operatör Hatası (K5)</b>	Operatörlerin olması istenmeyen bir olayla sonuçlanan tüm hatalarını içermektedir.

Nihai durumda, belirlenen kriterler değerlendirme yapması için hidrojen enerjisi konusunda tecrübeli sektör çalışanlarına ve akademisyenlere iletilmiştir. Değerlendirme yapması için seçilen 8 uzman, konusunda tecrübeli akademisyen ve enerji sektörü çalışanından oluşmaktadır. Kriterlerin ağırlıklandırılması yapılırken ana başlık altında bulunan faktörler için uzmanlara bilgilendirme yapılmıştır. Çalışmada yöntem olarak kriterlerin ağırlıklandırılması için FUCOM, alternatiflerin sıralanması için MOORA yöntemi kullanılmıştır. Sonuçların tutarlılığını göstermek için AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemiyle hem kriter ağırlıklandırılması hem de alternatif sıralaması yapılmıştır. Önerilen metodolojinin şeması Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Problemin hiyerarşik yapısı



Şekil 2. Önerilen metodolojinin akış şeması

### 3.2. Uygulama

Tablo 3'te uzmanlar (U1: 1. uzmanı temsil etmek üzere) tarafından kriterlerin öncelik sıralamaları oluşturulmuştur. Öncelik sıralaması oluşturulurken uzmanların tecrübeleri ve bilgilerinden faydalanılmaktadır. Uzmanlar, her bir kriteri 1-9 ölçeğinde puanlandırmışlardır. Burada, 1 en düşük skoru, 9 en büyük skoru ifade etmektedir. Karşılaştırma yapılırken en fazla önem verilen kriter baz alınarak puanlama yapılmaktadır.

**Tablo 3.** Kriterlerin uzman görüşlerine göre sıralanması\*

Uzmanlar	Kriter Önem Sıralaması
U1	K4>K2=K3>K1>K5
U2	K3>K2>K4>K1>K5
U3	K3>K2>K4>K1>K5
U4	K4>K5>K3=K2>K1
U5	K3>K2>K4>K1=K5
U6	K3=K4>K1>K2>K5
U7	K3>K4>K1>K2>K5
U8	K3>K4>K1>K2>K5

\*K1:Yönetim, K2: Tasarım Hatası, K3:Teknik, K4: Bakım- Onarım, K5: Operatör Hatası

Tablo 4’te uzmanların belirlediği puanlamalara göre hesaplanan kriter ağırlıkları verilmektedir. Her bir kriterin nihai ağırlığı satır ortalaması alınarak bulunmaktadır. Tablo 2’de belirtildiği gibi “Teknik” kriteri hidrojen enerjisi üretim santralının açılması için 0,412’lik ağırlığıyla yer seçiminde öncelik belirleyici olarak bulunmuştur. Bu kriteri, sırasıyla “Bakım-Onarım” ve “Tasarım Hatası” kriterleri izlemektedir.

**Tablo 4.** Kriterlerin nihai ağırlıkları

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	Ağırlıklar
<b>Yönetim</b>	0,1	0,091	0,077	0,083	0,078	0,099	0,1	0,111	0,092
<b>Tasarım Hatası</b>	0,166	0,183	0,18	0,167	0,233	0,057	0,083	0,069	0,142
<b>Teknik</b>	0,166	0,548	0,54	0,125	0,467	0,397	0,498	0,555	0,412
<b>Bakım-Onarım</b>	0,498	0,11	0,135	0,5	0,156	0,397	0,249	0,185	0,279
<b>Operatör Hatası</b>	0,071	0,068	0,068	0,167	0,067	0,05	0,071	0,0079	0,08

Kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra alternatiflerin sıralanması için MOORA-Oran Yöntemi kullanılmıştır. Uzmanlar, alternatifleri değerlendirdikten sonra ortalamaları alınmıştır. İlgili hesaplamalar yapıldıktan sonra  $y_i^*$  bulunmuştur, değerlerin büyüklüğüne göre sıralama yapıldığında Kara Hidrojen Enerji Santralının birinci sırada olduğu gözlemlenmiştir. Risk oluşturma açısından ilgili kriterler göz önüne alındığında karada tesisi kurmak daha avantajlı gözükmektedir. Sonuçlar Tablo 5’te gösterilmektedir.

**Tablo 5.** MOORA Oran yöntemine göre alternatiflerin sıralanması

		min	min	min	min	min	$y_i^*$	Sıra
<b>Ağırlıklar</b>		0,091	0,141	0,41	0,277	0,08		
<b>Alternatifler</b>		<b>Yönetim</b>	<b>Tasarım Hatası</b>	<b>Teknik</b>	<b>Bakım-Onarım</b>	<b>Operatör Hatası</b>		
<b>Kara Santrali</b>	<b>Hidrojen</b>	0,0515	0,0670	0,2109	0,1387	0,0359	-0,5043	1
<b>Deniz üstü Santrali</b>	<b>Hidrojen</b>	0,0741	0,1228	0,3430	0,2393	0,0473	-0,0826	2

Sonuçların tutarlılığını göstermek için aynı veriler kullanılarak kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin sıralanması AHP yöntemi ile yapılmıştır. Tablo 6’da kriter ağırlıkları gösterilmektedir. İlgili kriterler arasında kıyaslama yapıldığında kriterlerin ağırlık sıralamasında bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Ağırlık değerleri farklılık göstermektedir.

**Tablo 6.** Ana kriterlerin AHP değerlendirmesi sonuçları

<b>Ana Kriterler</b>	<b>Ağırlıkları</b>
<b>Yönetim</b>	0,073666
<b>Tasarım Hatası</b>	0,162029
<b>Teknik</b>	0,435759
<b>Bakım- Onarım</b>	0,284201
<b>Operatör Hatası</b>	0,044345

Tablo 7’de AHP yöntemi kullanılarak alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Alternatiflerin sıralama sonucunda da herhangi bir değişiklik görülmemektedir. Yalnız AHP yönteminde sıralama skorları arasında daha büyük bir fark varken MOORA yönteminde farklar bu kadar belirgin değildir.

**Tablo 7.** Alternatiflerin sıralanmasının AHP yöntemi sonucu

<b>Alternatifler</b>	<b>Seçim Skoru</b>	<b>Sıralama</b>
<b>Kara Hidrojen Santrali</b>	0,846764356	1
<b>Deniz üstü Hidrojen Santrali</b>	0,153235644	2

#### **4.Sonuçlar**

Çalışmada 5 ana kriter başlığı değerlendirilerek hidrojen üretim tesisi için risk tabanlı yer seçimi yapılmıştır. Konusunda uzman sekiz kişi tarafından yapılan değerlendirme neticesinde hidrojen üretim tesisinin karada kurulmasının riskleri azaltma açısından daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır. Hidrojen enerji tesisinin oluşturacağı risklerin denizde daha az hasar yaratacağı ilk etapta düşünülmeyle beraber, karada tesis kurulumu sağlandığında risklerin olası sonuçlarına daha hızlı ve kolay ulaşım sağlanacağı uzmanlarca değerlendirilmiştir. Tesisin kurulum aşamasından itibaren deniz üstü tesis konusunda yeterince tecrübe bulunmaması durumunda birçok risk oluşabileceği uzmanlarca öngörülmüştür. Tesisin deniz üstünde olmasının bakım-onarım faaliyetleri için zorluk oluşturabileceği ve buna bağlı aksamaların oluşabileceği değerlendirilmiştir. Ağırlık olarak daha yüksek yüzdeye sahip olan teknik ve bakım-onarım konuları deniz üstü santralin daha geri planda kalmasına sebep olmuştur. Diğer kriterler için tesis yeri seçimi nispeten daha opsiyonel olabilmektedir. Kriterler açısından çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesi maddeler halinde aşağıda açıklanmaktadır.

##### *4.1. Teknik kriterinin değerlendirilmesi*

Risk oluşturan faktörlerden “Teknik” faktörünün 0,412’lik ağırlık puanı ile diğer faktörlere göre oldukça önemli olduğu görülmektedir. Teknik denilince santralin kurulumu için tedarik aşamasından santralin çalışır hale gelinceye kadar geçireceği tüm operasyonlar bu kapsamın içinde değerlendirilmektedir. Teknik faktörünün risk oluşturmalarını engellemek ve/veya azaltmak için sistem bileşenlerinin performansları devamlı surette takip edilmeli ve bozulmalara meydan verilmemelidir. Tesis için her zaman yedek elektrik sistemi olmalıdır. Vanalar, yüklerinde herhangi bir dengesizliğin olup olmadığı

belirlemek için periyodik olarak kontrol edilmelidir. Tesisin tasarımı ve havalandırma koşulları güvenli çalışmaya uygun ortam sağlamalıdır. Patlama ve diski ve contaları seçimi teknik şartnamelere uygun olmalıdır. Sızdırmazlık ortamı için doğru tercih yapılmalıdır. Acil durum alarmının aktifliği de önem arz etmektedir.

#### *4.2. Bakım-Onarım kriterinin değerlendirilmesi*

Ağırlık tablosu incelendiğinde ikinci önem verilmesi gereken faktörün 0,279'luk ağırlık puanı ile "Bakım-Onarım" olduğu görülmektedir. Hidrojen enerji tesislerinde kazalara sebebiyet veren önemli faktörlerden biri yetersiz bakımdır. Bu sebeple enerji tesisinin düzenli denetim ve bakımı büyük önem arz etmektedir. Akış sistemlerindeki çıkmaz borular, vanalar risk oluşturan önemli komponentlerdir. İlgili teknik personeller tarafından belli periyotlarla sistem bileşenlerinin bakımlarının yapılması, ihtiyaca binaen onarımın ivedilikle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca güvenlik cihazlarının çalışır durumda olduğu ve kalibrasyonları da dikkat edilmesi gereken hususlardır.

#### *4.3. Tasarım Hatası kriterinin değerlendirilmesi*

"Tasarım hatası" 0,142'lik ağırlık puanı ile önceliklendirme içinde üçüncü sırada yer almaktadır. Tasarım hatasına bağlı riskleri en aza indirmek için öncelikle malzeme seçiminin düzgün yapılması (uygun alaşım malzemelerin kullanımı) gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda herhangi bir deformasyona uğramayan boru vb. ekipman malzemeleri tercih edilmesi önemlidir. Hidrojen gazının salınımını engellemek için küçük çaplı vana kullanımı, tesis tasarımı yapılırken kurulum yerine dikkat edilerek tasarımın yapılması bu faktöre bağlı riskleri azaltmak için kullanılabilir.

#### *4.4. Yönetim kriterinin değerlendirilmesi*

"Yönetim" faktörüne bağlı riskleri önlemek için öncelikle yönetimi riskler ve sonuçları konusunda yeterince bilgilendirmek gerekmektedir. Bu konular; eksik işlemler ve bakımın ihmal edilmemesi, bakım-onarım prosedürlerinin tam olarak yerine getirildiğinden emin olunması, çalışanlar ile doğru iletişim kurulması ve gerekli bilgilendirmelerin zamanında yapılması, operatör denetiminin yapılması ve yetersiz denetimi engelleme, hidrojen sızıntısı tespit ekipmanlarının gerektiği gibi olması, tehlike durumu için yazılı acil durum prosedürlerinin oluşturulması, uygun emir zinciri gibi konularda yapılabilir.

#### *4.5. Operatör hatası kriterinin değerlendirilmesi*

Son faktör, 0,08'lik ağırlık puanına sahip olan "Operatör hatası"dır. Bu faktör değerlendirildiğinde personele tehlikeli sahalarda çalıştığı için özel eğitim verilmesi gerekliliği öncelikli olarak ele alınmalıdır. Operatörlere, kullanacakları makine-teçhizatlar ile ilgili eğitim verilmelidir. Aynı zamanda tehlike anında kullanabilmesi için "yangın söndürme malzemeleri (su ve nitrojen gibi) kullanımı eğitimi", "yüksek sıcaklık ve elektriği yanlış kullanmanın tehlikeleri eğitimi" gibi eğitimlerin verilmesi

kaza riskini düşürür. Operatörlerin disiplinini sağlamak için sürekli olarak izlem altında tutulmaları gerekmektedir. Operatörler, bireysel karar vermesine gerek kalmayacak şekilde iş akışı içinde çalışmalıdır. Ayrıca operatörlerin müdahale süresini arttırmak için de uygun eğitimlerin verilmesi uygundur. Bu şekilde artan operatör tepki süresi ile operatörlerin üzerindeki baskı azalır ve tesisteki kazaların sayısında azalma olur.

Yapılan çalışmanın neticesinde hidrojen enerji tesisinin kurulum yeri, kara olarak belirlenmiştir. Yalnız, günümüzde hidrojen üretim tesislerinin fosil kaynaklardan enerji temin etmesi arzulanmamaktadır, gereken enerjiyi yeşil enerji kaynaklarından elde etmesi istenmektedir. Hidrojen üretimi için de elektroliz yöntemi üzerinde çalışılmaktadır. Gerekli elektrolizör kapasiteleri sağlanarak sudan yeşil hidrojen üretimi sağlamak istenmektedir. Bunun için hidrojen üretim tesislerinin deniz/okyanus kıyı şeridinde yapılması mantıklı görülmektedir. Sonraki çalışmalarda hem su kaynaklarına yakınlık hem de risk faktörlerini göz önüne alan yer seçimi problemleri üzerinde çözümler yapılabilir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması söz konusu değildir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

### **Kaynaklar**

- Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R., Khan F. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2021; 72(3): 104569.
- Albertus P., Manser JS., Litzelman S. Long-duration electricity storage applications. *Economics, and Technologies Joule* 2020; 4(1): 21–32.
- Apra JL. Hydrogen energy demonstration plant in Patagonia: Description and safety issues. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009; 34(10): 4684–4691.
- Bermudez JM., Hannula İ. Hydrogen. Iea 2021. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- Brauers WKM., Zavadskas EK. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics* 2006; 35(2): 445-469.
- Chang Y., Zhang C., Shi J., Li J., Zhang S., Chen, G. Dynamic Bayesian network based approach for risk analysis of hydrogen generation unit leakage. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(48): 26665-26678.
- Correa-Jullian C., Groth KM. Data requirements for improving the quantitative risk assessment of liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022; 47(6):4222-4235.



- Cristina Galassi M., Papanikolaou E., Baraldi D., Funnemark E., Håland E., Engebo A., Haugom GP., Jordan T., Tchouvelev AV. HIAD-hydrogen incident and accident database. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; 37(22): 17351-17357.
- Gökler SH. Optimal site selection for electric vehicle charging stations: Analysis with hybrid FUCOM and geographic information systems. *Energy* 2024; 307: 132659-132673.
- Gölcük İ., Durmaz ED., Şahin R. Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2023; 38(1): 57-69.
- Groth KM., Hecht ES. HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7485-7493.
- Groth KM., Hecht ES., Reynolds JT. Methodology for assessing the safety of Hydrogen Systems : HyRAM 1 . 0 technical reference manual. Sandia Report 2015; March: 1-44.
- Groth KM., Tchouvelev AV. A toolkit for integrated deterministic and probabilistic risk assessment for hydrogen infrastructure. *Probabilistic Safety Assessment and Management* 2014: 1-11.
- Hadef H., Negrou B., Ayuso TG., Djebabra M., Ramadan M. Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(20): 11855-11865.
- Hansen OR. Hydrogen infrastructure-Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environmental Protection* 2020; 143: 164–176.
- Haugom GP., Friis-Hansen P. Risk modelling of a hydrogen refuelling station using Bayesian network. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2389-2397.
- Honselaar M., Pasaoglu G., Martens A. Hydrogen refuelling stations in the Netherlands: An intercomparison of quantitative risk assessments used for permitting. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(27): 12278–12294.
- Huang Y., Ma G. A grid-based risk screening method for fire and explosion events of hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(1): 442–454.
- Jafari MJ., Zarei E., Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; 37(24): 19241-19249.
- Kasai N., Fujimoto Y., Yamashita I., Nagaoka, H. The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016; 41(30): 13308-13314.
- Kim J., Lee Y., Moon I. An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(11): 6387-6398.
- Lachance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2381-2388.

- LaFleur AC., Muna AB., Groth KM. Application of quantitative risk assessment for performance-based permitting of hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7529-7535.
- Lam CY., Fuse M., Shimizu T. Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(36): 20572-20586.
- Li X., Han Z., Zhang R., Zhang Y., Zhang L. Risk assessment of hydrogen generation unit considering dependencies using integrated DEMATEL and TOPSIS approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(53): 29630–29642.
- Lowesmith BJ., Hankinson G., Chynoweth S. Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014; 39(35): 20516–20521.
- Malakhov AA., Avdeenkova AV., du Toit MH., Bessarabov DG. CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(15): 9231–9240.
- Mirza NR., Degenkolbe S., Witt W. Analysis of hydrogen incidents to support risk assessment. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(18): 12068-12077.
- Mohammadfam I., Zarei E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015; 40(39): 13653-13663.
- Moonis M., Wilday AJ., Wardman MJ. Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society. *Process Safety and Environmental Protection* 2010; 88(2): 97-108.
- Moradi R., Groth KM. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. In *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(23): 12254-12269.
- Najjar YSH. Hydrogen safety: The road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013; 38(25): 10716-10728.
- Nasseri H., Chen HK., Huo KZ., Lo YF. A Hybrid grey decision methodology in social sustainable supplier selection. *Sustainability* 2023;15: 11777-11781.
- Nila B., Roy J. A new hybrid MCDM framework for third-party logistics provider selection under sustainability perspectives. *Expert Systems with Applications* 2023; 234: 121009-121033.
- Nemati A., Hashemkhani Zolfani S., Khazaelpour P. A novel gray FUCOM method and its application for better video games experiences. *Expert Systems with Applications* 2023; 234: 121041-121061.
- Norouzi N. An overview on the renewable hydrogen generation market. *International Journal of Energy Research* 2021; 7513(1): 1–2.

- Pamučar D., Stević Ž., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry* 2018; 10(9): 1-22.
- Pasman HJ. Challenges to improve confidence level of risk assessment of hydrogen technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2407-2413.
- Pu L., Shao X., Zhang S., Lei G., Li Y. Plume dispersion behaviour and hazard identification for large quantities of liquid hydrogen leakage. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 2019; 14(2): 2299.
- Shi J., Chang B., Khan F., Chang Y., Zhu Y., Chen G., Zhang C. Stochastic explosion risk analysis of hydrogen production facilities. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(24): 13535-13550.
- Skjold T., Siccama D., Hisken H., Brambilla A., Middha P., Groth KM., LaFleur AC. 3D risk management for hydrogen installations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7721-7730.
- Spada M., Burgherr P., Boutinard Rouelle P. Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(19): 9470–9481.
- Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020; 68.
- Yoo BH., Wilailak S., Bae SH., Gye HR., Lee CJ. Comparative risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021; 46(71): 35511–35524.
- Zarei E., Khan F., Yazdi M. A dynamic risk model to analyze hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021; 46(5): 4626-4643.
- Zhiyong L., Xiangmin P., Jianxin M. Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010; 35(13): 6822-6829.
- Zhiyong L., Xiangmin P., Jianxin M. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(6): 4079-4086.