

# Gemi Kazan Arızalarının Bulanık DEMATEL Yöntemi ile İncelenmesi

Burak Karaçan <sup>1</sup>, Asım Sinan Karakurt <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

<sup>1</sup>burak.karacan@std.yildiz.edu.tr, ORCID: 0009-0007-3525-2637

<sup>2</sup>(sorumlu yazar), asinan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6205-9089

## ÖZET

Gemi kazanları, geminin tipine ve makinesine bakılmasının her makine dairesinde olması gereken bir makinedir. Birden fazla tipi olup karmaşık operasyonlar içeren bu makineler, gemi ana makinesinin ısıtılması, gemi yardımcı makinelerinin ısıtılması, yaşam mahali ısıtma sistemlerinin ihtiyacının karşılanması veya tankerlerde olabilen buhar türbinli pompaları çalıştırmak gibi birden fazla amaçla kullanılmaktadır. Buhar kazanları karmaşık yapılarından ve yüksek sıcaklık, yüksek basınç değerlerinde çalışmasından kaynaklı sistemlerin arıza verme ihtimali oldukça yüksektir. Çalışmada buhar kazanı arızalarını meydana getiren ve birbirini etkileyen arıza ve durumların öncelik sıralamasının yapılması, çözüm ve alınacak aksiyonların belirlenmesi çok kriterli bir karar verme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kazan sistemlerini incelemek için birden fazla kriterin karşılaştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden Bulanık DEMATEL (Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı) yöntemi kullanılmıştır. Sonuçta buhar kazanlarının da en önemli noktalarının düzenli bakım olduğu ortaya çıkmış ve sistem kaynaklı arızalarının çoğunluğunun ateşleyici kısımdan meydana geldiği bulunmuştur. Bu sonuçlara göre ateşleyici sistemin yedek parçalarının gemide bulundurulması ve bu konuda makine zabıtlarının ek olarak bilgilendirilmesi faydalı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** arıza, bulanık DEMATEL, çok kriterli karar verme, gemi kazanları.

**Makale geçmişi:** Geliş 22/09/2023 – Kabul 08/05/2024

<https://doi.org/10.54926/gdt.1362541>

# Investigation of Ship Boiler Failures with Fuzzy DEMATEL Method

Burak Karaçan <sup>1</sup>, Asım Sinan Karakurt <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul

<sup>1</sup> burak.karacan@std.yildiz.edu.tr, ORCID: 0009-0007-3525-2637

<sup>2</sup> (corresponding author), asinan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6205-9089

## ABSTRACT

Ship boilers are a machine that should be in every engine room regardless of the type and engine of the ship. These machines, which have more than one type and complex operations, are used for multiple purposes such as heating the ship's main engine, heating the ship's auxiliary machinery, meeting the needs of the living space heating systems or operating steam turbine pumps that can be in tankers. Due to the complex structure of steam boilers and their operation at high temperature and high pressure levels, the probability of failure of the systems is quite high. In the study, it is aimed to prioritize the faults and situations that cause steam boiler failures and affect each other, and to determine the solutions and actions to be taken by using decision making methods. In order to examine boiler systems, more than one criterion needs to be compared. In this study, Fuzzy DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) method that is one of the multi-criteria decision making methods, was used. As a result, it was revealed that the most important points of steam boilers are regular maintenance and it was found that the majority of system-related failures occur in the igniter part. According to these results, it would be useful to keep the spare parts of the igniter system on board and to inform the engine officers extra about this issue.

**Keywords:** failure, fuzzy DEMATEL, ship boilers, multi criteria decision making.

**Article history:** Received 22/09/2023 – Accepted 08/05/2024

## 1. Giriş

Sıcak su gerek beslenme gerek temizlik gerekse korunma amacıyla kullanılmıştır. Burada suyun bol ve yaygın bulunurluğu, farklı sıcaklıklardaki suyun farklı amaçlar için kullanılmasına olanak tanımıştır. Su buharı ise, doğal olarak özellikle tektonik hareketlerin aktif olduğu bölgelerde jeotermal kaynaklardan elde edilip geçmişte genelde tedavi etme ve temizleme amacı ile kullanılırken günümüzde ise bu kullanımlarına ek olarak elektrik üretimi, bölgesel şehir ısıtması, sera ısıtması gibi teknik amaçlar için de kullanılmaktadır. İhtiyaçların değişmesi ile doğal kaynaklardan sağlanan buhar miktarı ve kalitesi yetersiz kalmış ve bunun üzerine, 19. yüzyılın başlarında çeşitli yakıtların yakılması ile açığa çıkan enerjinin kullanılarak buharın elde edildiği ilk buhar kazanları ortaya çıkmıştır (Bunch & Hellemans, 2004).

Buhar kazanları, kimyadan tekstile, otellerden hastanelere kadar ısı yük ihtiyacı olan birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Gemi endüstrisinde ise birden fazla kullanım alanı olan bu makineler hem ana tahrik sistemlerinde hem de gemide bulunan diğer makinelere yardımcı olarak kullanılabilir. Bu nedenle tahrik sistemi buhar türbini veya buharla çalışan bir makine olmasa dahi bir geminin kazansız olması düşünülemez. Buhar kazanlarının hangi amaçla ve hangi alanda kullanılacağına göre birçok modeli vardır. Gemilerde kullanılan buhar kazanları ise kullanım tiplerine (ana kazanlar ve yardımcı kazanlar) ve çalışma prensiplerine (alev borulu kazan, su borulu kazan ve egzoz gazı buhar kazanı) göre sınıflandırılırlar. Genel olarak kazanlar, boru demetleri, emniyet valfleri, brülörler, seviye sensörleri, blöf vanası gibi temel elemanlardan oluşurlar (Flanagan, 1990).

Kazanların yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki akışkanlarla çalışmasından dolayı gerekli bakım ve onarım faaliyetlerinin zamanında ve uygun bir şekilde yapılmaması teknik sorunların yanında ilgili personellerin beden sağlıklarının bozulmasına ve hatta can kayıplarına bile neden olmaktadır (Peterson, 1997; Nakahashi vd., 2017). Gerek olası gecikmelerin ve kazaların önlenmesi ve korunma tedbirlerinin önceden alınması gerek gemilerin daha çevreci ve verimli bir şekilde işletilmesi ve gerekse gemilerdeki yedek parça stoğunun uygun ve yeterli bir şekilde yapılabilmesi için kazanlarda meydana gelen arızaların detaylıca bilinmesi büyük faydalar sağlayacaktır. Bunların yanında sorumlu personelin hangi arızalarla ne sıklıkla karşılaşacağını ve bunların önem derecesini bilmesi ve bakım ve değişim zamanlarının önceden net bir şekilde kestirilmesi de yukarıdaki çıktılar açısından olumlu sonuçlar verecektir.

Ardy vd. (2022) bir petrokimya tesisinde yer alan kazanda meydana gelen arızaların sebeplerinin belirlenmesi ve benzer tesisler için örnek teşkil etmesi için bazı fiziksel, kimyasal ve yapısal analizler gerçekleştirmiştir. Ardy vd. (2021) bir amonyak tesisindeki atık ısı kazanında meydana gelen arıza için, benzer arızaların önlenmesi adına, uluslararası standartlar uyarınca kök neden araştırması gerçekleştirmiştir. Hong vd. (2019) bir bölgesel ısıtma sisteminin daha verimli ve sürdürülebilir işletilebilmesi için tesiste yer alan kazanda meydana gelen arızaların sebeplerini belirleyebilmek için bazı fiziksel, kimyasal ve sayısal analizler yapmışlardır. Patil vd. (2021) tekstil işlem tesisinde yer alan bir buhar kazanı için arızalanma ve tamir sürelerinin yer aldığı verileri kullanarak güvenilirlik, kullanılabilirlik ve sürdürülebilirlik (RAM) analizlerini, bir yazılım aracılığı ile gerçekleştirmiş ve kritik öneme sahip elemanlar hakkında bilgi vermiştir. Liu vd. (2017) su borulu bir kazanda ortaya çıkan arızalar için mikro ölçekli görsel taramalar ve analizler ile bazı fiziksel ve kimyasal analizler yaparak kök neden belirlemesi gerçekleştirmişlerdir. Rahman vd. (2022) tekstil endüstrisinde kullanılan kazan kazaları hakkında ilgili mevzuatlara, uzman görüşlerine ve vuku bulan hadiselere göre nütrosifik teori ile analitik hiyerarşi prosesi tabanlı bir çalışma yapmış ve kazalar hakkında önem sırası oluşturmuşlardır. Kocabaş ve Savaş (2021) tarafından yapılan çalışmada kazan blöfü sistematik olarak incelenmiş, potansiyel Arıza Modu ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemi kullanılarak enerji kaybını artıran

riskler belirlenmiş ve bu riskleri önlemek için alınacak tedbirlere yönelik en uygun ödeme süreleri hesaplanmıştır. Adumene ve Nitonye (2018) gemi kazan arızaları için, mevcut arıza oranlarına dayalı olarak genel sistemlerin arıza sıklıklarını tahmin ederek, bir risk modeli oluşturmuş ve önleyici faaliyetlerin zamanlaması konusunda bilgi vermişlerdir. Salawu vd. (2023) kazan tesisleri için önemli bir araç olan durum izleme ve güvenilirlik değerlendirmesi hakkında kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmiş ve daha fazla odaklanması gereken hususlar konusunda görüşler sunmuşlardır.

Olağan kazan arızalarının nedenleri, kazanların karmaşık yapılarından dolayı birden fazla etkene bağlı olmaktadır. Bu durumların incelenmesi ve doğru kararın verilebilmesi için çok kriterli bir karar verme (ÇKKV) yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. ÇKKV yöntemleri birden fazla etkenin bulunduğu durumlarda en uygun seçimin yapılmasına olanak tanıyan istatistiksel araçlardır. 1900'lü yıllarının ortalarından bu yana farklı yaklaşımlar kullanan ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunan farklı yöntemler geliştirilmiştir (Köksalan vd., 2011). Günümüzde ise yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi teknikler de dahil edilerek daha karmaşık sistemler için daha kapsamlı çalışmalar yapılabilmektedir. Literatürde ÇKKV yöntemleri kapsamında bulanık DEMATEL, bulanık TOPSIS, bulanık PROMETHEE, bulanık AHP, bulanık VIKOR gibi birçok teknik kullanılmaktadır (Kabadayı & Dag, 2017; Zlaugotne vd., 2020; Vassoney vd., 2021; Abdullah vd., 2023).

DEMATEL yönteminin kriterler arasındaki yapı ve ilişkileri inceleyen, etkileyen - etki ilişkilerini daha kolay analiz edilebilir hale getiren ve uzman görüşlerine dayalı olarak karmaşık problemlere çözüm getirebilen etkili bir yöntem olmasından dolayı (Thakkar, 2021) bu çalışmada kullanılmasının tercih sebebi olmuştur. Bu kapsamda ÇKKV yöntemleri kullanılan gemi merkezli çalışmalara özellikle de bulanık DEMATEL yöntemi kullanılan çalışmalara ağırlık verilmiştir. Özdemir vd. (2016) tarafından gemi operasyonları nedeniyle ortaya çıkan deniz kirliliği DEMATEL yöntemi kullanılarak incelenmiş ve olası etkilerini azaltmak için öneriler sunulmuştur. Başhan ve Demirel (2018) DEMATEL yönteminden faydalanarak gemi dizel jeneratörlerinin kritik operasyonel hatalarının değerlendirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiş ve olumsuzlukların önlenmesi için önem sırlaması yapmışlardır. Yorulmaz ve Baykan (2023) DEMATEL ve ANP yöntemlerini kullanarak gemicilik performansına etki eden faktörlerin önem derecelerini, aralarındaki etkileşimleri ve bunların gemi türlerine olan etkilerini analiz etmişlerdir. Ma vd. (2022) DEMATEL ve (Bulanık Bilişsel Harita) FCM yöntemlerini kullanarak gemi çarpışmaları üzerindeki insan faktörü etkisini araştırmış ve olası diğer faktörlerle arasındaki önem sırlamasını vermişlerdir. Kaya vd. (2022) gemilerde basınçlı hava sisteminde kullanılan kompresörlerin, teknik ve operasyonel yönden, seçiminde bulanık VIKOR yöntemini kullanarak farklı amaç fonksiyonları için işletmeler açısından en uygun seçimin yapılmasına yardımcı olmuşlardır. Balin vd. (2018) bulanık DEMATEL yöntemi kullanılarak gemi yardımcı makinelerinde meydana gelen arızaların etkileyen - etki ilişkisi üzerine bir model sunmuşlardır. Demirel vd. (2015) gemi yardımcı makinelerinde görülen, yüksek derecede önemli, arızalar için bulanık AHP yöntemi uygulaması gerçekleştirmiş ve bu arızaların önem sırasını elde etmişlerdir. Soner (2021) bulanık DEMATEL yöntemi kullanılarak gemi güvertesindeki kapalı alanlarda gerçekleşen kazaları değerlendirmiş ve bunları önleme noktasında çözümler sunmuştur. Tunçel vd. (2023) tarifeli ya da planlı seferlerde elektronik seyir haritalarının hazırlık sürecinde gecikmelere veya başarısızlıklara neden olabilecek potansiyel risk faktörlerinin belirlenmesi ve uzmanların katılımıyla bulanık analitik hiyerarşi prosesi yöntemi kullanılarak önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Başhan ve Demirel (2019) gemi kazanlarının kritik arızalarını bulanık DEMATEL yöntemi ile 15 kritik maddede incelemiş ve araştırma sonucunda; gemi kazanlarının yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışmasından kaynaklı denizde emniyet ve güvenlik için önemle dikkat edilmesi gereken makinelerden olduğunu ve buhar kazanlarındaki en kritik olayın ise düzenli bakım olduğunu belirtmişlerdir. Ahmed ve Gu (2020) gemideki operasyonel emniyet kavramlarını geliştirmek ve makine sistemi güvenilirliğinin iyileştirilmesine proaktif katkı sağlamak

amacıyla, kazan işlemleri sırasında en kötü durum senaryolarının belirlenmesi için geçmiş kaza verileri ve raporlarını bulanık mantık yöntemi ile inceleyerek olası arızaları ve riskleri ölçeklendirmişlerdir.

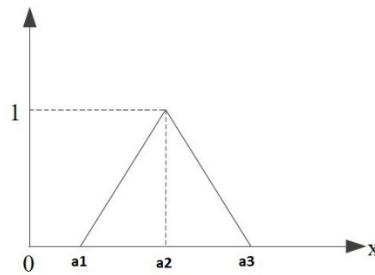
Literatürde yer alan güncel çalışmalar ışığında ve mevcutlardan farklı olan yönü ile bu çalışma için gemi kazanlarında sıklıkla görülen 20 arıza - kaza türü belirlenmiştir. İncelenen arıza – kaza sayısının literatürdeki benzer çalışmalardan fazla olmasında görüşlerine başvurulmuş uzmanların tecrübeleri etkili olmuştur. Bu çalışmada hem tasarım hem de işletme şartları için çevreci, güvenli ve verimli bir sistem ortaya koyabilmek adına, incelenen olaylar çerçevesinde, etki oranı en yüksek olanların tespiti amacıyla, bulanık DEMATEL yöntemi kullanılmıştır.

## 2. Araştırma Yöntemi

### 2.1. Bulanık Mantık ve Bulanık Küme

Aristo'dan bugüne dek klasik mantıkta aidiyet 0 ve 1 ile ölçümlenmekte ve değer bulmaktadır. Ancak, gerçek şartlarda ise ne 0 ne de 1 olmayan ya da ne siyah ne de beyaz olan ama gerçekte var olan, sınıflandırılmamış fiziksel veya zihinsel süreçler mevcuttur. Aradaki değerleri tanımlama ve aidiyet oluşturma adına Zadeh (1965) tarafından bulanık mantık – bulanık küme önermesi yapılmış ve bu önerme gerek sosyal gerekse teknik birçok alanda karşılık bulmuştur. Bu önermede aidiyet, uzman kişi ve grupların yardımı ile az etkili, normal etkili, çok fazla etkili gibi dilsel kavramlarla ifade edilmekte sonrasında ise bu ifadelere nicelik atfedilmektedir. Böylelikle önermelerin birbirleri arasındaki ilişkiler ve etki dereceleri ortaya çıkarılmış olmaktadır.

Chang ve Lin (2002) tarafından belirtilen bulanık sayılar hakkında bazı önemli notasyon ve bilgiler aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. Üçgensel bulanık sayılar  $(a_1, a_2, a_3)$  şeklinde, Şekil 1'deki gibi, gösterilebilir ve  $\tilde{A}$  bulanık sayısının üyelik fonksiyonu Denklem 1'deki gibi belirtilir. Bulanık sayılar sırasıyla; en küçük, orta ve en büyük olası değerleri göstermektedir.



Şekil 1. Üçgensel bulanık sayılar

$$f_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{(x-a_1)}{(a_2-a_1)}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ \frac{(a_3-x)}{(a_3-a_2)}, & a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (1)$$

$\tilde{A}$  ve  $\tilde{B}$  bulanık sayıları  $(a_1, a_2, a_3)$  ve  $(b_1, b_2, b_3)$  şeklinde belirlendiğinde aralarında yapılacak olan işlem operasyonu Denklem 2-5'teki şekildedir.

$$\tilde{A}(+) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(+)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (2)$$

$$\tilde{A}(-) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(-)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3) \quad (3)$$

$$\tilde{A}(\times)\tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(\times)(b_1, b_2, b_3) = (a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3) \quad (4)$$

$$\tilde{A}(\div)\tilde{B} = (a_1, a_2, a_3)(\div)(b_1, b_2, b_3) = (a_1/b_1, a_2/b_2, a_3/b_3) \quad (5)$$

$\tilde{\omega}_{ij}^k = (a_{1ij}^k, a_{2ij}^k, a_{3ij}^k)$  k tane uzman görüşüne göre, i kriterinin j kriterini etkileme değerini gösterir ve normalleştirme işlemleri de Denklem 6-9 kullanılarak yapılmaktadır.

$$xa_{1ij}^k = (a_{1ij}^k - \min a_{1ij}^k) / \Delta_{min}^{max} \quad (6)$$

$$xa_{2ij}^k = (a_{2ij}^k - \min a_{2ij}^k) / \Delta_{min}^{max} \quad (7)$$

$$xa_{3ij}^k = (a_{3ij}^k - \min a_{3ij}^k) / \Delta_{min}^{max} \quad (8)$$

$$\Delta_{min}^{max} = \max r_{ij}^n - \min l_{ij}^n \quad (9)$$

Sol (ls) ve sağ (rs) normalize değerleri için Denklem 10-11 kullanılmaktadır.

$$xls_{ij}^k = xa_{2ij}^k / (1 + xa_{2ij}^k - xa_{1ij}^k) \quad (10)$$

$$xrs_{ij}^k = xa_{3ij}^k / (1 + xa_{3ij}^k - xa_{2ij}^k) \quad (11)$$

Durulaştırma için crisp değerlerinin hesaplanmasında Denklem 12-13 kullanılmaktadır.

$$x_{ij}^k = [xls_{ij}^k(1 - xls_{ij}^k) + xrs_{ij}^k \times xrs_{ij}^n] / (1 - xls_{ij}^k + xrs_{ij}^k) \quad (12)$$

$$\tilde{\omega}_{ij}^k = \min a_{ij}^n + x_{ij}^n \Delta_{min}^{max} \quad (13)$$

k tane uzman tarafından yapılan anketler Denklem 14' ten faydalanılarak integre edilmektedir.

$$\tilde{\omega}_{ij}^k = 1/k(\tilde{\omega}_{ij}^1 + \tilde{\omega}_{ij}^2 + \dots + \tilde{\omega}_{ij}^k) \quad (14)$$

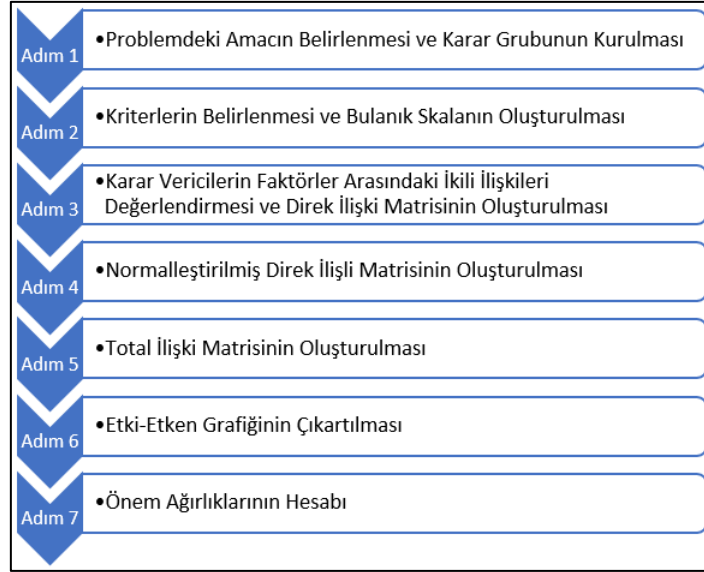
## 2.2. Bulanık DEMATEL Yöntemi

DEMATEL yönteminde duruma ait problemler belirlenir, bu problemlerin aralarındaki ilişkiye katsayılar atanır, gerekli matris hesaplamaları yapılır ve ortaya etkileyen – etki grafiği çıkartılıp incelenir (Tzeng & Huang, 2011). Buradaki önemli noktalardan biri ise problem belirleme ve katsayı atamasının alanında uzman kişiler tarafından yapılması gerekliliğidir. Bu amaçla bulanık küme yaklaşımı kullanılarak farklı bulanık DEMATEL yöntemleri önerilmiştir. Bulanık DEMATEL yöntemi, DEMATEL yönteminin bulanık küme teorisi kullanılarak uygulanmasıdır. En belirgin özelliği katsayılar atamasında 0, 1, 2, 3, 4 yerine (0,0; 0,0; 0,25), (0,25; 0,50; 0,75) gibi katsayılar atanmasıdır.

Bulanık DEMATEL yöntemi araştırmacılar tarafından birkaç farklı uygulama şekli ile yapılmıştır. Bu çalışmada Şekil 2'de gösterilen ve (Başhan & Demirel, 2019) tarafından da kullanılan uygulama yöntemi ele alınmıştır. Bulanık DEMATEL yönteminde, bulanık sayılarla işlem yapıldığından işlem sonunda anlaşılabilir ve mantıksal sayılara dönülmesi gerektiği için bazı durulaştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışmamızda Opricovic ve Tzeng (2003) tarafından yapılan çalışmada kullanılan durulaştırma yöntemi uygulanmış ve hesaplamaların tamamı Ms Excel kullanılarak yapılmıştır.

Çözümleme sürecinde ilk adım olarak problemle ilgili bilgiler ve örnekler toplanır, problemde işlenecek amaç belirlenir. Ardından alanında uzman kişilerden oluşan bir grup belirlenir. Ardından elde bulunan örnekler ve uzman kişilerin tecrübelerine göre kriterler ve kullanılacak bulanık ölçek belirlenir. Daha sonra bu kriterler arasında ikili karşılaştırılma yani bir kriterin diğer kriteri ne derece etkilediği belirtilir.

Ancak bu karşılaştırmayı net bir şekilde yapmak zor olduğu için bulanık ölçek kullanılır. Bu ölçekte kriterler arası etkileşim dilsel değişken olarak düşünülmüş ve çok az etkili, az etkili, normal etkili, çok etkili ve çok fazla etkili olmak üzere tanımlanmış olan beş dilsel terimle ifade edilmiştir. Bu dilsel terimler ve üçgen bulanık sayılar, Tablo 1'deki gibi, gösterilmiştir.



Şekil 2. DEMATEL yöntemi çözümleme adımları

Tablo 1. Bulanık dilsel ölçek ve üçgen bulanık sayılar

Dilsel ifadeler	Üçgen bulanık sayılar
Çok Az Etkili	(0.00; 0.00; 0.25)
Az Etkili	(0.00; 0.25; 0.50)
Normal Etkili	(0.25; 0.50; 0.75)
Çok Etkili	(0.50; 0.75; 1.00)
Çok Fazla Etkili	(0.75; 1.00; 1.00)

Üçüncü adımda ise üçgen bulanık sayılar kullanılarak ve faktörler karşılaştırılarak  $A = n \times n$  bir ilk direk ilişki matrisi oluşturulur, Denklem 15. Ayrıca  $T_{ij}$ ,  $i$  faktörünün  $j$  faktörünü etkileme derecesini belirtir.

$$A = [t_{ij}]_{n \times n} \quad (15)$$

Devamında  $A$  direk ilişki matrisine temel alınmasıyla,  $S$  normalleştirilmiş ilişki matrisi Denklem 16-17 ile bulunur, ( $k$  tane uzman).

$$S = k \times A \quad (16)$$

$$k = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (17)$$

Beşinci adımda normalize edilmiş ilişki matrisi  $S$ 'nin, birim matrisi  $I$  ile Denklem 18'e göre,  $T$  toplam ilişki matrisi elde edilir.

$$T = S(I - S)^{-1} \quad (18)$$

Altıncı adımda Denklem 19-21 kullanılarak toplam ilişki matrisindeki satır ve sütunların toplamıyla  $D$  ve  $R$  vektörleri elde edilir. Etkileyen – Etki grafiğinin oluşturulabilmesi için  $(D-R)$  ve  $(D+R)$  vektörlerinin bir grafiğe konulması gerekmektedir. Bu grafikte yatay eksen  $D+R$  “önem”, dikey olan  $D-R$  eksenini “ilişki” belirtir.  $D-R$ 'nin 0'dan büyük olması “etkileyen”, 0'dan küçük olması “etki” kısmını belirtir.

$$T = [t_{ij}]_{n \times n}, \quad i, j=1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

$$D = [\sum_{i=1}^n t_{ij}]_{1 \times n} = [t_i]_{n \times 1} \quad (20)$$

$$R = [\sum_{j=1}^n t_{ij}]_{1 \times n} = [t_j]_{n \times 1} \quad (21)$$

Son olarak da elde edilen  $D$  ve  $R$  değerlerini Denklem 22-23 kullanarak önem ağırlıkları hesaplanır.

$$w_i = \left\{ (\tilde{D}_i^{def} + \tilde{R}_i^{def})^2 + (\tilde{D}_i^{def} - \tilde{R}_i^{def})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (23)$$

### 3. Analizler ve Değerlendirme

Gemi buhar kazanları, gemide birçok sistemi doğrudan ve dolaylı etkileyen makinelerdir. Bundan kaynaklı yaşanan arızalar gemide işletme ve güvenlik problemleri yaratması olağandır. Yüksek sıcaklık ve basınçta çalışan bu sistemlerde sıklıkla arıza ve hataların ortaya çıkması gözlemlenebilirken nadiren de olsa ölümcül kazalar da oluşmaktadır. Üretici firmaların beyan ettikleri muhtemel arızalardan (Parthiban, 2009; Triad, 2015), deneyimli gemi personellerin karşılaştıkları arızalardan ve uzman görüşlerinden (Wankhede, 2018) yola çıkılarak Tablo 2'deki 20 adet olası kazan arızası belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Olası gemi kazan arızaları

<b>C1</b>	Yakıt/gaz kaçağı	<b>C11</b>	Emniyet valfi arızası
<b>C2</b>	Tıkalı süzgeç	<b>C12</b>	Yakıt nozulu arızası
<b>C3</b>	Besleme suyu pompası arızası	<b>C13</b>	Otomatik hava damperi açılma arızası
<b>C4</b>	Kazan suyu seviye sensörü arızası	<b>C14</b>	Pilot brülör ateşleyici arızası
<b>C5</b>	Pilot brülör valf arızası	<b>C15</b>	Alevlenme arızası
<b>C6</b>	Alevgözü sensörü arızası	<b>C16</b>	Hotwell tankı düşük seviye alarmı
<b>C7</b>	Ana solenoid valf arızası	<b>C17</b>	Genel korozyon problemleri
<b>C8</b>	Hava akımı draft fanı arızası	<b>C18</b>	Kazan yakıt pompası arızası
<b>C9</b>	Yanma güvenliği anormal	<b>C19</b>	Hava ayarının düzensiz olması
<b>C10</b>	Su veya buhar boru kaçaqları	<b>C20</b>	Kazan çalışmasının çok uzun sürmesi

Faktörleri değerlendiren uzman ekip gerek saha deneyimi gerekse teorik alt yapısı olan ve en az lisans mezunu olup alanlarında en az beş yıl çalışmış kişilerden oluşmaktadır. Bu kapsamda belirlenen dört uzmandan ikisi başmühendis, bir tanesi deneyimli gemi kazan servisi, bir tanesi de enspektör olarak görev yapmaktadır. İkinci çözümleme adımı kapsamında, uzman değerlendirmeleri sonucunda elde edilen 4 adet matris ortak olarak değerlendirilip Tablo 3'te verilen bulanık sayı matrislerine dönüştürülmüştür. Her bir uzman Tablo 4'te gerçek örnek olarak verilen matrisleri, kriterlerin birbirine olan etkileme derecelerini Tablo 1'deki üçgen bulanık sayılardan belirleyerek oluşturmuştur.



**Tablo 3.** Bulanık sayı matrisleri

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	...	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>
<b>C1</b>	(1.00;1.00;1.	(0.50;0.75;1.	(0.00;0.00;0.	...	(0.75;1.00;1.	(0.50;0.75;1.	(0.50;0.75;1.
<b>C2</b>	(0.50;0.75;1.	(1.00;1.00;1.	(0.00;0.00;0.	...	(0.75;1.00;1.	(0.25;0.50;0.	(0.50;0.75;1.
<b>C3</b>	(0.00;0.00;0.	(0.00;0.00;0.	(1.00;1.00;1.	...	(0.00;0.00;0.	(0.00;0.00;0.	(0.75;1.00;1.
...	...	...	...	...	...	...	...
<b>C1</b>	(0.75;1.00;1.	(0.75;1.00;1.	(0.00;0.00;0.	...	(1.00;1.00;1.	(0.50;0.75;1.	(0.75;1.00;1.
<b>C1</b>	(0.50;0.75;1.	(0.50;0.75;1.	(0.00;0.00;0.	...	(0.50;0.75;1.	(1.00;1.00;1.	(0.50;0.75;1.
<b>C2</b>	(0.50;0.75;1.	(0.50;0.75;1.	(0.75;1.00;1.	...	(0.75;1.00;1.	(0.50;0.75;1.	(1.00;1.00;1.

Uzmanların değerlendirmesi sonucu oluşturulan her bir 20x20 matris için, durulaştırma yönteminin 9, 11, 12, 13 ve 14 numaralı denklemleri uygulanmıştır. Ardından oluşturulan 20x20 matrislerin her hücresi için ortalama değer hesaplanarak, üçüncü çözümleme adımı kapsamında, Tablo 4'te bulunan direk ilişki matrisi oluşturulmuştur.

**Tablo 4.** Direk ilişki matrisi

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	...	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>
<b>C1</b>	1.00	0.29	0.00	...	0.71	0.32	0.17
<b>C2</b>	0.42	1.00	0.05	...	0.84	0.31	0.26
<b>C3</b>	0.00	0.00	1.00	...	0.00	0.14	0.47
...	...	...	...	...	...	...	...
<b>C18</b>	0.48	0.47	0.00	...	1.00	0.43	0.47
<b>C19</b>	0.35	0.42	0.17	...	0.34	0.88	0.34
<b>C20</b>	0.35	0.40	0.42	...	0.42	0.26	0.50

Dördüncü çözümleme adımında direk ilişki matrisi ile 2 ve 3 numaralı hesaplamaların yapılması sonucunda Tablo 5'teki normalleştirilmiş direk ilişki matrisi oluşmuştur.

**Tablo 5.** Normalleştirilmiş direk ilişki matrisi

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	...	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>
<b>C1</b>	0.11	0.03	0.00	...	0.07	0.03	0.02
<b>C2</b>	0.04	0.11	0.01	...	0.09	0.03	0.03
<b>C3</b>	0.00	0.00	0.11	...	0.00	0.01	0.05
...	...	...	...	...	...	...	...
<b>C18</b>	0.05	0.05	0.00	...	0.11	0.05	0.05
<b>C19</b>	0.04	0.04	0.02	...	0.04	0.09	0.04
<b>C20</b>	0.04	0.04	0.04	...	0.04	0.03	0.05

Oluşturulan normalleştirilmiş ilişki matrisinin, 4 numaralı işleme sokulması ile de beşinci çözümleme adımı olarak Tablo 6'daki toplam ilişki matrisi oluşturulmuştur.

Altıncı çözümleme adımında ise toplam ilişki matrisine 5, 6 ve 7 numaralı formüller uygulanarak  $D$ ,  $R$ ,  $D+R$  ve  $D-R$  değerleri bulunarak Tablo 7 oluşturulmuştur. Bulunan değerler kullanılarak Şekil 3'teki  $(D+R)-(D-R)$  etkileyen – etki ilişki grafiği çizdirilmiştir.

**Tablo 6.** Toplam ilişki matrisi

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>...</b>	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>
<b>C1</b>	0.29	0.16	0.06	...	0.27	0.19	0.20
<b>C2</b>	0.27	0.28	0.08	...	0.34	0.23	0.26
<b>C3</b>	0.09	0.07	0.18	...	0.10	0.10	0.16
<b>...</b>	...	...	...	...	...	...	...
<b>C18</b>	0.28	0.22	0.08	...	0.36	0.24	0.28
<b>C19</b>	0.26	0.21	0.11	...	0.28	0.31	0.28
<b>C20</b>	0.20	0.16	0.13	...	0.23	0.18	0.24

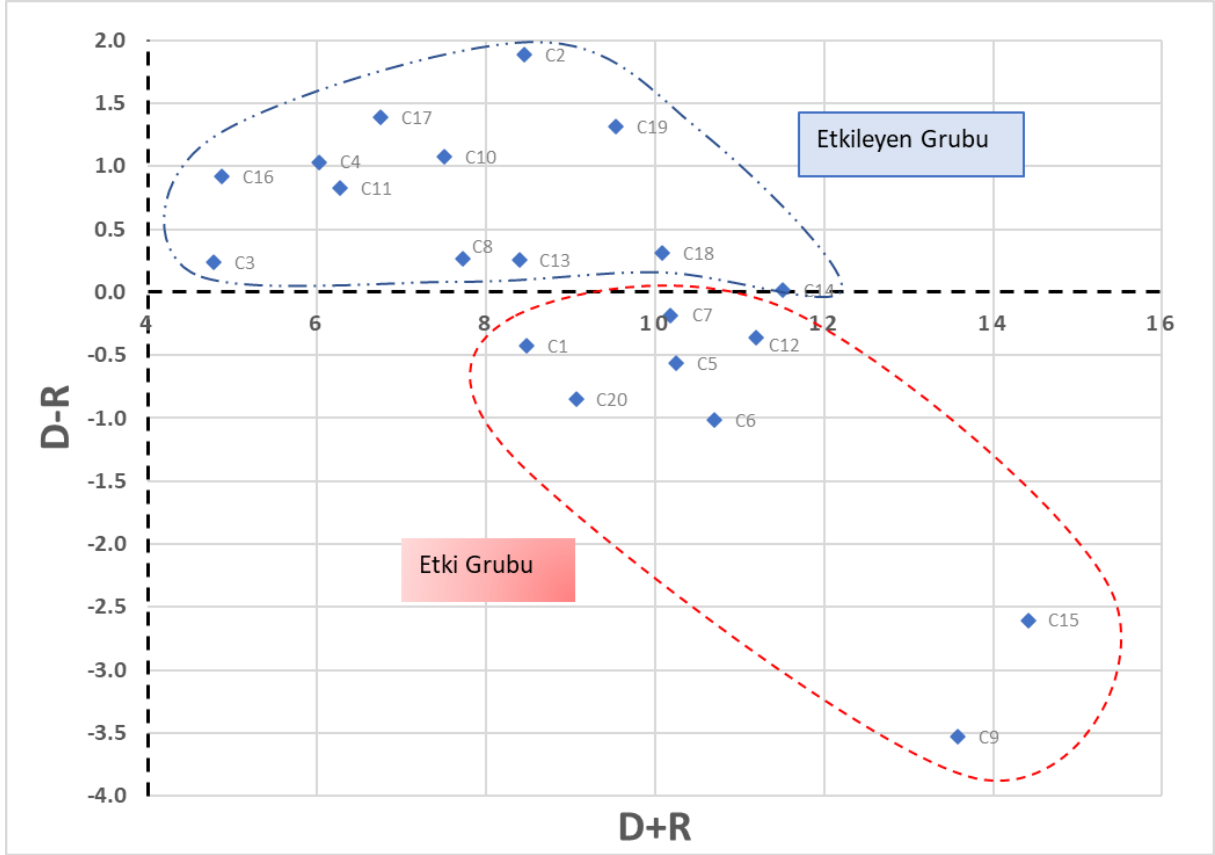
**Tablo 7.** Faktörlerin D+R ve D-R değerleri

<b>Faktör</b>	<b>D</b>	<b>R</b>	<b>D+R</b>	<b>D-R</b>	<b>Faktör</b>	<b>D</b>	<b>R</b>	<b>D+R</b>	<b>D-R</b>
<b>C1</b>	4.0	4.5	8.5	-0.4	<b>C11</b>	3.6	2.7	6.3	0.8
<b>C2</b>	5.2	3.3	8.4	1.9	<b>C12</b>	5.4	5.8	11.2	-0.4
<b>C3</b>	2.5	2.3	4.8	0.2	<b>C13</b>	4.3	4.1	8.4	0.3
<b>C4</b>	3.5	2.5	6.0	1.0	<b>C14</b>	5.8	5.8	11.5	0.0
<b>C5</b>	4.8	5.4	10.2	-0.6	<b>C15</b>	5.9	8.5	14.4	-2.6
<b>C6</b>	4.8	5.9	10.7	-1.0	<b>C16</b>	2.9	2.0	4.9	0.9
<b>C7</b>	5.0	5.2	10.2	-0.2	<b>C17</b>	4.1	2.7	6.8	1.4
<b>C8</b>	4.0	3.7	7.7	0.3	<b>C18</b>	5.2	4.9	10.1	0.3
<b>C9</b>	5.0	8.6	13.6	-3.5	<b>C19</b>	5.4	4.1	9.5	1.3
<b>C10</b>	4.3	3.2	7.5	1.1	<b>C20</b>	4.1	5.0	9.1	-0.8

Şekil 3'ten *D-R* değeri negatif olan C1, C5, C6, C7, C9, C12, C15 ve C20 faktörlerinin etkilenen (sonuç) grubunda, *D-R* değeri pozitif olan C2, C3, C4, C8, C10, C11, C13, C14, C16, C17, C18 ve C19 faktörlerinin ise etkileyen (sebebe) grubunda olduğu görülmektedir. Bu durumda etkileyen grubunda en yüksek *D-R* değerine sahip olan arızanın C2 (tıkalı süzgeç) arızası olduğu, ardından gelen C17 (genel korozyon problemleri) ve C19 (hava ayarının düzensiz olması) arızalarının ikinci ve üçüncü sırada etkileyen derecesine sahip olduğu söylenebilir. Bu arızaların oluşması diğer faktörlere de arıza yaptırması veya işlevini önlemesi anlamına gelir. Bu sebeple sistemde bulunan süzgeçlerin düzenli periyotlarla temizlenmesi, korozyon oluşumunu önlemek için kullanılan suyun iyi arıtılması, blöf sisteminin düzenli ve iyi çalışması, hava ayarı yapan parçaların bakımının düzenli yapılması veya bunun için gemide yedek parça bulundurulması, buhar kazanı operasyonunun daha sağlıklı ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için alınması gerek önlemler olabilir. Aksi yöndeki en düşük *D-R* değerine sahip olan C9 (yanma güvenliği anormal) kriterinin diğer kriterlerin yüksek etkisi sonucu ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Son olarak yedinci çözümle adımında yer alan hesaplamalar sonucu faktörlerin önem ağırlıkları Tablo 8'de hesaplanmıştır. Tablo 8'deki faktörlerin önem ağırlığı sıralamasına göre ise; en yüksek önem ağırlığıyla C15 (alevlenme arızası) bulunmaktadır. Bu ifade alevlenme arızasının kazan arızalarındaki en önemli ve en kritik hata olduğunu belirtmektedir. C9 (yanma güvenliği anormal), C14 (pilot brülör arızası) ve C12 (yakıt nozulu arızası) gibi arızaların ise takip eden önem derecelerine sahip olduğu görülmekle birlikte bu arızalar alevlenme arızasının sebep ve sonuçları ile de ilişki içerisinde olabilmektedir. Alevlenme arızaları genellikle, diğer etkenlerden kaynaklı meydana geldiği için,

makinenin alevlenme sistemlerinin bakımı ve bu sistemin yedek parçalarının bulundurulması buhar kazanlarının operasyonlarının güvenli bir şekilde devam ettirilmesi açısından öneminin yüksek olduğu belirlenmiştir. Önem ağırlığı tablosunda en altlara bakıldığında ise, C3 (besleme suyu pompası arızası) ve C16 ('hotwell' tankı düşük seviye alarmı) bulunmaktadır. Bu doğrultuda, besleme suyu pompası arızası ile hotwell tankı su seviyesinin düşmesinin buhar kazanları için kritik arızalar olmadığı sonucuna ulaşılabilmektedir.



Şekil 3. Etkileyen – Etki ilişkisi grafiği

Tablo 8 Faktörlerin önem ağırlıkları

Faktör	Önem Ağırlığı	Faktör	Önem Ağırlığı
C1	0.040	C11	0.022
C2	0.042	C12	0.071
C3	0.013	C13	0.040
C4	0.021	C14	0.075
C5	0.059	C15	0.121
C6	0.065	C16	0.014
C7	0.058	C17	0.027
C8	0.034	C18	0.057
C9	0.111	C19	0.052
C10	0.032	C20	0.047

#### 4. Sonuç

Buhar kazanları, endüstriyel ve enerji üretimi sektörlerinde yoğunlukla kullanıldığı gibi denizcilik endüstrisinde de bir geminin olmazsa olmazlarından. Bulanık DEMATEL analizi, faktörler arasındaki ilişkileri belirler ve etkilerini ölçerken belirsizlikleri de dikkate alır. Bu sayede, hangi faktörlerin diğerlerine göre daha önemli olduğu, kazanın performansına ve işleyişine olan etkileri daha net bir şekilde anlaşılabilir. Bu analizden çıkan sonuçlar, buhar kazanlarının tasarımı, işletimi ve bakımıyla ilgili stratejik kararları desteklemek için kullanılabilir. Analiz, enerji verimliliğini artırmak, emisyonları kontrol altında tutmak, güvenlik standartlarını iyileştirmek ve operasyonel maliyetleri optimize etmek gibi hedeflere ulaşmak için yol gösterici olabilir.

Bu çalışmadan çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde ise; kazanların ateşleyici sistemlerinin bakım yöntemleri hakkında gemi adamlarını ve özellikle makine zabıtlarını bilgilendirmek, gemide bu sistemin olası yedek parçalarını bulundurmamak; sistemin işleyişini güvenli ve kesintisiz sağlamak, bakım maliyetlerini en aza indirmek ve enerji verimliliğini artırmak için atılacak iyi adımlar olduğu ortaya çıkmıştır. Endüstriyel alanda kullanılan her sistemin de ihtiyacı olduğu üzere, makine ve sistemlerin düzenli bakıma tabi tutulması optimal işleyiş sağlamanın, üretimin kendini göstermeyen fakat diğer yandan da en önemli noktasıdır. Literatürdeki çalışmalardan da benzer sonuçların alınması hem uzmanların karşılaştıkları arıza türlerinin benzerliğini hem de uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Gerek DEMATEL gerekse diğer ÇKKV yöntemleri kullanılarak gemilerdeki diğer sistemlerin analiz edilmesi, gemilerin genel yedek parça ve bakım planlarının oluşturulması noktasında yardımcı olacaktır. Bu kapsamda yakın gelecekte literatürde sıklıkla kullanılan ÇKKV yöntemleri kullanılarak bir gemide yer alan tüm sistemlerin analizinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

#### Kaynaklar

Abdullah, F. M., Al-Ahmari, A. M., & Anwar, S. (2023). An Integrated Fuzzy DEMATEL and Fuzzy TOPSIS Method for Analyzing Smart Manufacturing Technologies. *Processes*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/pr11030906>

Adumene, S., & Nitonye, S. (2018). Application of Probabilistic Model for Marine Steam System Failure Analysis under Uncertainty. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 08(02), Article 02. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2018.82003>

Ahmed, S., & Gu, X.-C. (2020). Accident-based FMECA study of Marine boiler for risk prioritization using fuzzy expert system. *Results in Engineering*, 6, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100123>

Ardy, H., Nurimam, A., Hamdani, M., Firmansyah, D., Aditya, D. M., Setiawan, A. R., & Wibowo, A. (2022). Failure Analysis of Bank-Wall Side Boiler Tube in a Petrochemical Plant. *Metals*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/met12122064>

Ardy, H., Putra, Y. P., Anggoro, A. D., & Wibowo, A. (2021). Failure analysis of primary waste heat boiler tube in ammonia plant. *Heliyon*, 7(2), e06151. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06151>

Balin, A., Demirel, H., Celik, E., & Alarcin, F. (2018). Fuzzy DEMATEL Model Proposal For The Cause And Effect Of The Fault Occurring In The Auxiliary Systems Of The Ships' Main Engine. *International Journal of Maritime Engineering*, 160(A2), Article A2. <https://doi.org/10.5750/ijme.v160iA2.1053>

Başhan, V., & Demirel, H. (2018). Evaluation of Critical Operational Faults of Marine Diesel Generator Engines by Using DEMATEL Method. *Journal of ETA Maritime Science*, 6(2), 119-128. <https://doi.org/10.5505/jems.2018.24865>

Başhan, V., & Demirel, H. (2019). Application of fuzzy DEMATEL technique to assess most common critical operational faults of marine boilers. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 545-555.

Bunch, B. H., & Hellems, A. (2004). *The History of Science and Technology*. Houghton Mifflin, Boston.

Cheng, C.-H., & Lin, Y. (2002). Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142(1), 174-186. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00280-6)

Demirel, H., Ünlügençoğlu, K., Alarçin, F., & Balin, A. (2015). Application Of Fuzzy Analytic Hierarchy Proses For Error Detection Of Auxilary Systems Of Ship Main Diesel Engines. *International Journal of Maritime Engineering*, 157(A2), Article A2. <https://doi.org/10.5750/ijme.v157iA2.952>

Flanagan, G. T. H. (1990). *Marine Boilers (3.)*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam.

Hong, M., Chae, H., Kim, W. C., Kim, J.-G., Kim, H., & Lee, S. Y. (2019). Failure Analysis of a Water Wall Boiler Tube for Power Generation in a District Heating System. *Metals and Materials International*, 25(5), 1191-1201. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00267-6>

Kabadayı, N., & Dag, S. (2017). Bulanık DEMATEL ve Bulanık Promethee Yöntemleri İle Kablo Üretiminde Makine Seçimi (SSRN Scholarly Paper 3391530). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3391530>

Kaya, A., Başhan, V., & Ust, Y. (2022). Selection of marine type air compressor by using fuzzy VIKOR methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 236(1), 103-112. <https://doi.org/10.1177/14750902211028791>

Kocabaş, C., & Savaş, A. F. (2021). Reducing Energy Losses of Steam Boilers Caused by Blowdown with Using the FMEA Method. *Smart Science*, 9(2), 70-79. <https://doi.org/10.1080/23080477.2021.1898794>

Koksalan, M., Wallenius, J., & Zionts, S. (2011). Multiple criteria decision making: From early history to the 21st century (s. 198). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. <https://doi.org/10.1142/8042>

Liu, S. W., Wang, W. Z., & Liu, C. J. (2017). Failure analysis of the boiler water-wall tube. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 9, 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2017.06.002>

Ma, L., Ma, X., Lan, H., Liu, Y., & Deng, W. (2022). A data-driven method for modeling human factors in maritime accidents by integrating DEMATEL and FCM based on HFACS: A case of ship collisions. *Ocean Engineering*, 266, 112699. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112699>

Nakahashi, K., Sato, Y., Tamura, K., Ishikawa, T., & Okamoto, M. (2017). Explosion of the auxiliary boiler (Marine Accident Investigation Report MA2017-12). Japan Transport Safety Board.

Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 11(05), 635-652. <https://doi.org/10.1142/S0218488503002387>

Özdemir, Ü., Yılmaz, H., & Başar, E. (2016). Investigation of Marine Pollution Caused by Ship Operations with DEMATEL Method. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(2), 315-320. <https://doi.org/10.12716/1001.10.02.14>

Parthiban, K. K. (2009). Boiler Trouble Shooting Guide. Venus Energy Audit System. [https://www.academia.edu/23773119/boiler\\_trouble\\_shooting\\_guide?auto=download](https://www.academia.edu/23773119/boiler_trouble_shooting_guide?auto=download)

- Patil, S. S., Bewoor, A. K., & Patil, R. B. (2021). Availability Analysis of a Steam Boiler in Textile Process Industries Using Failure and Repair Data: A Case Study. *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*, 7(021002). <https://doi.org/10.1115/1.4049007>
- Peterson, D. G. (1997). Anatomy of a Catastrophic Boiler Accident. *National Board BULLETIN*, Summer. <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=226>
- Rahman, M. A., Karmaker, C. L., Ahmed, T., Khan, M. I., Morshed, A. K. M. M., & Ali, S. M. (2022). Modelling the causes of boiler accidents: Implications for economic and social sustainability at the workplace. *Heliyon*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09601>
- Salawu, E. Y., Akerekan, O. E., Afolalu, S. A., Kayode, J. F., Ongbali, S. O., Edun, B. M., Airewa, I., & Awoyemi, O. O. (2023). Condition monitoring and reliability assessment, an essential tool for Boiler Plant Maintenance—A review. *E3S Web of Conferences*, 430, 01228. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001228>
- Soner, O. (2021). Application of fuzzy DEMATEL method for analysing of accidents in enclosed spaces onboard ships. *Ocean Engineering*, 220, 108507. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108507>
- Thakkar, J. J. (2021). Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL). İçinde J. J. Thakkar (Ed.), *Multi-Criteria Decision Making* (ss. 139-159). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8_9)
- Triad. (2015). *Operations and Maintenance Manual—Low and High Pressure Steam Boilers*. Triad Boiler Systems.
- Tunçel, A. L., Arslan, Ö., & Akyüz, E. (2023). An Application of Fuzzy AHP Using Quadratic Mean Method: Case Study of ENC Preparation Process for Intended Voyages. *Journal of ETA Maritime Science*, 11(1), 56-66.
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making (0 bs)*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b11032>
- Vassoney, E., Mammoliti Mochet, A., Desiderio, E., Negro, G., Piloni, M. G., & Comoglio, C. (2021). Comparing Multi-Criteria Decision-Making Methods for the Assessment of Flow Release Scenarios From Small Hydropower Plants in the Alpine Area. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.635100>
- Wankhede, A. (2018). *Boiler Safety on Ships – Common Risks And Safety Features*. <https://www.linkedin.com/pulse/boiler-safety-ships-common-risks-features-anish-wankhede>
- Yorulmaz, M., & Baykan, Y. (2023). Gemicilik Performans Faktörlerinin Gemi Türlerine Etkisinin Bulanık DEMATEL ve ANP Yöntemleriyle İncelenmesi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1224708>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zlaugotne, B., Zihare, L., Balode, L., Kalnbalkite, A., Khabdullin, A., & Blumberga, D. (2020). Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparison. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 454-471. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0028>