



## Bağlama Operasyonları Esnasında Kopan Halat Yaralanmalarının Bulanık Hata Ağacı Yöntemi ile Analizi

Ali Cem KUZU<sup>1</sup>, Yunus Emre ŞENOL<sup>2</sup>, Özcan ARSLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Piri Reis Üniversitesi, Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Türkiye

ackuzu@pirireis.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5594-9158>

senolyunusemre@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-7247>

arslano@itu.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4769-6941>

### Öz

*Pek çok sektörde olduğu gibi denizcilik sektöründe de ölümlere, yaralanmalara, çevre kirliliklerine veya maddi hasarlara sebep olan kazalar yaşanmaktadır. Denizcilik sektörünün omurgasını oluşturan gemi taşımacılığı operasyonları, yapılan işin doğası gereği ciddi riskler barındırmaktadır. Bu riskleri yok etmek ya da kabul edilebilir risk seviyelerine indirgeyebilmek için pek çok emniyet tedbiri uygulanıyor olmasına rağmen gemi operasyonlarında yaşanan kazaların sayısı oldukça fazladır. Gemi operasyonları ile ilgili yaşanmış kazalar ve kaza istatistik raporları incelendiğinde gemi bağlama operasyonlarında yaşanmış olan kaza oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında, Hata Ağacı Analizi yöntemi ile tanker terminal operasyonları için kopan halat yaralanması riski ve buna sebep olan kök sebepler tespit edilmiş olup Bulanık Mantık yöntemi ile de sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Tanker terminal bağlama operasyonlarında görevli gemi ve sahil çalışanlarından oluşan uzman grubu görüşlerine dayandırılarak oluşturulan model ile kopan halat yaralanma kazası risk değerinin hesaplanması ve alınabilecek önlemlerle bu risk değerinin azaltılabileceğinin bilimsel bir yaklaşımla ortaya konması hedeflenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Gemi Bağlama Operasyonu, Bulanık Mantık, Hata Ağacı Analizi, Risk Değerlendirme.

## Fuzzy Fault Tree Analysis of Parted Rope Injuries During Mooring Operations

### Abstract

*As in many sectors, there are accidents in the maritime industry that cause deaths, injuries, environmental pollution or material damage. Shipping operations, which constitute the backbone of the maritime industry, have serious risks due to the nature of the work being done. Despite there exist many safety measures have been implemented to eliminate these risks or to reduce them to acceptable risk levels, the number of accidents in ship operations is quite high. When the accidents and accident statistical reports on ship operations are examined, it is seen that the rate of accidents in mooring operations is very high. Within the scope of the study, the Fault Tree Analysis (FTA) method is used to determine the risk of parted mooring line injury for tanker terminal operations and the root causes leading to this, and numerical analysis was performed by Fuzzy Logic method. It is aimed to establish a scientific model based on tanker and terminal employees' opinion that can reduce the risk by calculating the risk value of the parted mooring line injury accident and employing related preventive actions.*

**Keywords:** Mooring Operation, Fuzzy Logic, Fault Tree Analysis, Risk Assessment.

**To cite this article:** Kuzu, A. C., Şenol, Y. E. ve Arslan, Ö. (2018). Bağlama Operasyonları Esnasında Kopan Halat Yaralanmalarının Bulanık Hata Ağacı Yöntemi ile Analizi. *Journal of ETA Maritime Science*, 6(3), 215-227.

**To link to this article:** <https://dx.doi.org/10.5505/jems.2018.58661>

## 1. Giriş

Küresel ticaretin ana arterlerinden olan deniz taşımacılığı içerisinde seyir, yükleme, tahliye, manevra, demirleme bağlama operasyonları gibi pek çok operasyonu barındırır. Alınan tüm emniyet tedbirlerine rağmen bu operasyonlar esnasında yaralanmalara, can kayıplarına ve maddi hasarlara sebep olan kazalar yaşanmaktadır. Gemilerde yaşanan kazalar incelendiğinde bağlama operasyonlarındaki kaza oranının oldukça yüksek olduğu göze çarpmaktadır [21, 22]. Günümüzde gemi bağlama operasyonları için en yaygın kullanılan sistem halat ırgat donanımlı bağlama sistemidir. Deniz taşımacılığı tarihi kadar eski olan bu bağlama sistemi kullanılarak yapılan bağlama operasyonlarında insan gücüne duyulan ihtiyaç oldukça fazla olmakla beraber bağlama halatlarının kopma, ani gerilme ve işleyen halatlarda dolaşma riskleri bağlama operasyonuna katılan personeli, çevreyi, gemiyi ve limanı ciddi sonuçlar doğurabilecek şekilde tehlikeliye atmakta ve kazalara sebebiyet vermektedir. Yapılan literatür araştırması ve saha çalışmaları ile bağlama operasyonlarının yaratabileceği riskler tespit edilerek kopan halat yaralanması kazalarının risk değerlendirmesi için hata ağacı oluşturulmuştur. Saha çalışması kapsamında limanlarda ve gemilerde mevcut bağlama sistemleri incelenmiş olup, emniyetsiz durumlar yerinde tespit edilmiştir. Ayrıca gemi bağlama operasyonlarında görev alan gemi ve rıhtım personelinden bağlama operasyonları emniyeti hususundaki görüşleri alınmıştır. Literatür araştırması kapsamında ise konu ile ilgili yapılmış olan akademik çalışmaların yanı sıra kaza analiz ve istatistik raporlarına ulaşılmıştır. Böylece hata ağacında kazaya sebebiyet verebilecek kök sebepler başlangıç olayı olarak belirlenmiş ve mantık kapıları ile bir üst olaya bağlanmak suretiyle tepe olayın yani kopan halat yaralanması riskinin belirlenmesi için

uygun yapı oluşturulmuştur. Hata ağacında kullanılmış olan başlangıç olaylarının meydana gelme olasılıkları bulanık mantık yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada gemilerin bağlama operasyonlarındaki tehlikeler ve riskler detaylı şekilde irdelenmiş olup, bununla birlikte yaşanan veya yaşanması muhtemel olan halat kopma kazalarının kök sebepleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

### 1.1. Literatür Araştırması

Bağlama operasyonlarında yaşanmış kazalar ve bu kazalara sebebiyet veren kök sebeplerin tespit edilebilmesi ve bağlama operasyonlarında emniyet hususunu ilgilendirebilecek çalışmalardan faydalanılabileceği için literatür araştırması yapılmıştır. Çalışmada öncelikle gemi bağlama operasyonları ile ilgili yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Konu başlığı ile ilişkilendirilebilecek akademik çalışmalardan rıhtıma bağlı çift cidarlı bir tanker için simülasyon senaryosu oluşturularak, bağlama halatlarına binen yüklerin hesabı ve analizi "Optimoor" yazılımı kullanılarak yapılmıştır [13]. Büyük petrol tankerlerinin yanaşacağı terminallerin bağlama sistemleri tasarımı ile ilgili, 200.000 detveyt tonluk bir petrol tankerinin rıhtıma bağlı durumdaki hareketlerinin analizi için simülasyon çalışması yapılmış ve "yarı durağan analiz" yöntemi ile değerlendirilmiştir [14]. Benzer bir simülasyon çalışmasında Kudela ve Diğ. 300.000 detveyt tonluk bir petrol tankerinin bağlı durumdaki hareketlerini "Optimoor" yazılımını kullanarak analiz etmiştir [15]. Uzun periyotlu dalgaların rıhtımda bağlı durumda olan büyük tankerlerin hareketlerine olan etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada, örnek simülasyon senaryosu için 266.000 m<sup>3</sup>lük bir LNG tankeri kullanılmıştır [16]. Pripic-Orsic ve Diğ. yaptıkları çalışmada, Adriyatik Denizi'nde bir rıhtım belirleyerek değişen dalga durumunun o rıhtımda

bağlı olan gemi hareketlerine etkisini değerlendirmiştir [17]. Yetkin, (2014) tanker-şamandıra bağlama sistemlerinin değişik çevre şartları altındaki dinamik davranışlarını modelleyebilmek için "Orcaflex" yazılımını kullanmıştır [18]. Molen ve Diğ., Geraldton Limanı'nda halat manevra biçiminin geliştirilmesi ile ilgili yaptıkları çalışmada farklı halat manevra sistemlerini "Quaysim" yazılımı ile analiz etmiştir [19]. Bağlama operasyonlarının emniyeti konulu çalışmada bağlama operasyonlarının riskleri belirtilmiş olup, operasyonlarda insan faktörü etkisinden bahsedilmiştir [20]. İngiltere Koruma ve Tazminat Kulübü(UK P&I Club) tarafından hazırlanmış olan raporda yaşanmış halat manevra kazaları ve bu kazaların sonucunda meydana gelen yaralanmalar, can kayıpları ve maddi hasarlar ile ilgili yirmi yıllık istatistiki veriler paylaşılmıştır [21]. Hollanda Koruma ve Tazminat Kulübü (NNPC) tarafından yayınlanmış olan halat manevraları esnasında kazaların önlenmesi ile ilgili raporda halatların kullanımı, depolanması, bakım tutumu ve kontrol edilmesi hakkında bilgilere yer verilmiştir [22]. Petrol Şirketleri Forumu tarafından yayınlanmış olan "Mooring Equipment Guideline" yayınında emniyetli halatlar, halat manevra sistemleri ve halat manevraları için oluşturulmuş prensiplere yer verilmiştir [23]. Uluslararası Denizcilik Örgütü, Emniyet Konseyi tarafından yayınlanmış olan "Gemi Yedekleme ve Halat Manevra Ekipmanları Rehberi" sirkülerinde halat manevra sistemleri için kullanılacak teçhizatlar ve bu

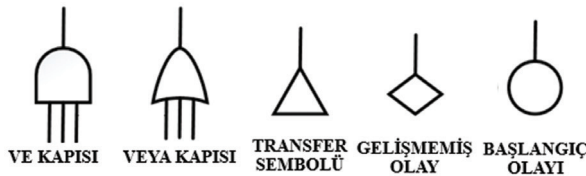
standartlardan bahsedilmiştir [24]. Yayınlanmış olan bir operasyon emniyeti çalışmasında 1997-2006 yılları arasında meydana gelen halat kazaları araştırılmış ve araştırma sonucunda gemilerin halat manevrası operasyonlarında yaşanmış 273 kaza kaydına ulaşılmıştır [25].

## 2. Metodoloji

### 2.1. Hata Ağacı Analizi

Hata ağacı analizi yöntemi, niceliksel ve niteliksel olarak karmaşık hata sistemlerinin analiz edilmesinde yaygınca kullanılan sistemik bir yaklaşım yöntemidir [1-4]. Hata ağacı analizi pek çok sektörde olduğu gibi denizcilik sektöründe de emniyet değerlendirmesi kapsamında kullanılan bir risk değerlendirme ve analiz yöntemidir. Antao ve Soares ropax türü gemilerin çatışma, karaya oturma, yangın ve batma risklerini değerlendirmek için hata ağacı analizi yöntemini kullanmıştır [26]. Gemi trafiğinin yoğun olduğu Şenzen bölgesinde, gemilerin çatışma risklerini değerlendirmek için hata ağacı analiz yöntemi kullanılmış ve bölgeye ait geçmiş kaza verileri ile trafik yoğunluğu bilgileri de kullanılarak kaza olasılık değerleri ortaya konulmuştur [27]. Hata ağacı analizinde başlangıç olayları, mantık kapıları, başlangıç olaylarının sebep olacağı ara olaylar ve tepe olay kavramları vardır. Tespit edilmiş olan başlangıç olaylar ile kök sebepler "ve", "veya" mantık kapıları ile bir üst olaya bağlanır. Şekil 1'de gösterilen mantık kapıları ile birbirine bağlanan olaylar ile en sonunda tepe olaya ulaşılır [28].

Hata ağacı analiz işlemleri problemin



**Şekil 1.** Problem Çözümünde İzlenen Metodoloji

tanımlanması ve incelenecek alanın sınırlarının belirlenmesi, hata ağacı modelinin oluşturulması, minimum kesme setleri belirlenmesi, hata ağacının mantığa uygunluğunun sözel olarak kontrol edilmesi, tepe olayın sayısal hesaplaması ve raporlama aşamalarından oluşur.

Mantık kapılarının matematiksel olarak ifadesi; t anında tepe olayın meydana gelme olasılığı olsun. i. başlangıç olayının t anındaki meydana gelme olasılığı olsun. j minimum kesme setinin t anındaki gerçekleşme olasılığı olsun.

“ve” Kapısı

$$q_1(t) = P(E_i(t)) \quad (1)$$

Tepe olayı meydana gelme ihtimali;

$$Q_0(t) = P(E_1(t) \cap E_2(t)) = P(E_1(t) \square E_2(t)) = q_1(t) \square q_2(t) \quad (2)$$

n adet başlangıç olayı ve bir VE Kapısı varsa;

$$Q_0(t) = \prod_{j=1}^n q_j(t) \quad (3)$$

“veya” Kapısı

$$q_1(t) = P(E_i(t)) \quad (4)$$

Tepe olayı meydana gelme ihtimali;

$$Q_0(t) = P(E_1(t) \cup E_2(t)) = P(E_1(t)) + P(E_2(t)) - E_1(t) \cap E_2(t) \\ = q_1(t) + q_2(t) - q_1(t) \square q_2(t) = 1 - (1 - q_1(t)) \square (1 - q_2(t)) \quad (5)$$

n adet başlangıç olayı ve bir VEYA Kapısı varsa;

$$Q_0(t) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - q_j(t)) \quad (6)$$

**Kesme seti değerlendirilmesi:** Minimum n adet başlangıç olayının aynı anda gerçekleşmesi durumunda minimum kesme seti meydana gelir. Minimum kesme setinin oluşması ise tepe olayının meydana gelmesi için yeterlidir. j minimum kesme

setinin t anında meydana gelme ihtimali;

$$\phi_j(t) = \prod_{i=1}^n q_{j,i}(t) \quad (7)$$

Tepe olayı değerlendirilmesi: Bu çalışmada oluşturulan hata ağacında belirlenen 43 adet başlangıç olayı ve 18 adet mantık kapısı kullanılarak kopan halat yaralanması tepe olayına ulaşılmıştır. Tablo 1’de kopan halat yaralanma kazası için oluşturulan hata ağacında kullanılmış olaylar, kısaltma ve kodlamaları ile birlikte listelenmiştir. Kopan halat yaralanma kazası hata ağacının yapısı uzman görüşleri ve operasyonel tecrübeler doğrultusunda kurgulanmıştır. Ayrıca hata ağacında yer alan başlangıç olayları uzman görüşleri ve kaza analiz raporları dikkate alınarak belirlenmiştir. Belirlenmiş olan başlangıç olaylarından bir üst olayın meydana gelmesi için tek başına yeterli olan temel olaylar "veya" kapısı ile iki ya da daha fazla temel olayın ya da ara olayın birlikte gerçekleşmesi durumunda meydana gelecek olaylar ise "ve" kapısı ile bağlanmıştır. Şekil 2’de oluşturulan hata ağacı sunulmuştur.

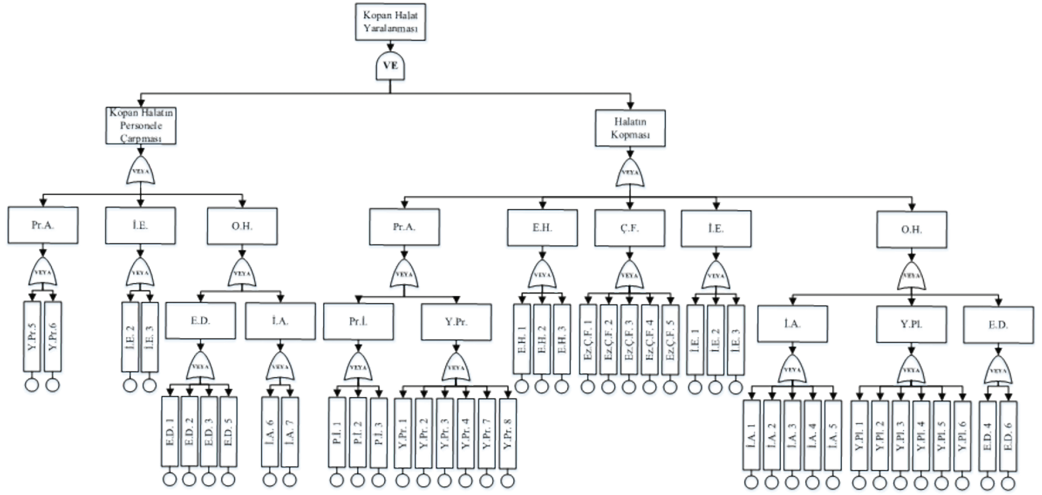
$$Q_0(t) \leq 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \phi_j(t)) \quad (8)$$

## 2.2. Bulanık Hata Ağacı Analizi

Bulanık mantık yöntemi uzmanların sözel olarak değerlendirdikleri cevapları sayısal sonuçlara dönüştürmeye yarayan bir yöntemdir. Zadeh tarafından önerilen bu yöntem zaman içerisinde geliştirilerek pek çok problemin çözümü için kullanılır hale gelmiştir [30]. Klasik mantıkta bir eleman bir kümenin ya elemanıdır ya da elemanı değildir anlayışı hakim iken, bulanık mantık yaklaşımında elemanların her küme için üyelik derecelerinden bahsedilir. Ford ve Sterman’ a göre uzmanlara danışılarak yapılan çalışmaların tam olarak objektif sonuçlar ortaya koymayacağı değerlendirilmiştir [31]. Sübjektif etkinin en aza indirgenmesi amacıyla uzmanların ağırlıklandırılması

**Tablo 1.** Hata Ağacında Kullanılan Olaylar ve Kodları

Kodlar		Olayın Tanımı	
Prosedür Aksaklıkları (Pr.A.)	Yanlış veya Eksik Prosedür (Y.Pr.)	Y.Pr.1 Y.Pr.2 Y.Pr.3 Y.Pr.4 Y.Pr.5 Y.Pr.6 Y.Pr.7 Y.Pr.8	Bakım-Tutum Aksaklıkları Denetleme Aksaklıkları SWL, BHC Test ve Markalama Aksaklığı Ekipman Kullanma Talimatı Eksikliği Geri Tepme Alanı(Snap-Back Zone) Belirleme ve Markalama Aksaklığı Risk Değerlendirme Aksaklığı Kaptan-Pilot Bilgi Akış Prosedüründe Hata Halatların Pervaneye Dolanma Riski ile İlgili Uyarı Eksikliği
	Prosedür İhlali (P.İ.)	P.İ.1 P.İ.2 P.İ.3	Yapılan İş Hafife Alma, Sıradanlaştırma Eğitimsizlik Ticari Baskı
Operasyon Hatası (O.H.)	İletişim Aksaklığı (İ.A.)	İ.A.1 İ.A.2 İ.A.3 İ.A.4 İ.A.5 İ.A.6 İ.A.7	Yanlış Bilgilendirme Yabancı Dil Aksaklığı Yanlış Verilen Komut İletişim Cihazlarında Aksaklık Verilen Komutu Yanlış Algılama ve Uygulama Tehlikeyi Fark Eden Personelin Manevra Ekibini Uyarmaması Gemi, Rıhtım veya Römorkör Personeli Arasında Yaşanan İletişim Problemi
	Yanlış Planlama (Y.Pl.)	Y.Pl.1 Y.Pl.2 Y.Pl.3 Y.Pl.4 Y.Pl.5 Y.Pl.6	Yanlış Römorkör Seçimi K.Ü. Organizasyon Planlama Hatası Yanlış Halat Seçimi Yanlış Zamanlama(Trafik ve Hava Durumu) Yanlış Bağlama Metodu Seçimi Yanlış Rıhtım Planlama
	Emniyetsiz Davranış (E.D.)	E.D.1 E.D.2 E.D.3 E.D.4 E.D.5 E.D.6	Yük Binen Halata Yakın Durma Görevli Olmadığı Halde Manevra Sahasında Bulunma Manevra Esnasında Başka İşle Uğraşma Halatlara Aşırı Yük Bindirilmesi Manevrada Yanlış Yerde Konuşlanma Halatların Pervaneye Dolandırılması
Çevresel Faktörler (Ç.F.)	Engellenemez Çevresel Faktörler (Ez.Ç.F.)	Ez.Ç.F.1 Ez.Ç.F.2 Ez.Ç.F.3 Ez.Ç.F.4 Ez.Ç.F.5	Sert Rüzgar Yüksek Gel-Git Geçiş Yapan Gemi Etkisi Yüksek Dalga Şiddetli Akıntı
Ekipman Hatası (E.H.)		E.H.1 E.H.2 E.H.3	Yanlış Dizayn Yanlış Ekipman Seçimi Bakımsız ve Yıpranmış Ekipman
İnsan Etkisi (İ.E.)		İ.E.1 İ.E.2 İ.E.3	Eğitimsiz Personel Tecrübesiz Personel Eksik Konsantrasyon ve Yorgun Personel



**Şekil 2:** Kopun Halat Yaralanması Kazası Hata Ağacı

yapılarak, uzman değerlendirmeleri sonucu elde edilen verilerin daha objektif olması sağlanır [8]. Bulanık hata ağacı analizi, denizcilğin de dahil olduğu pek çok disiplinler arası problemin çözümünde yaygın şekilde kullanılmaktadır [5-12]. Bulanık hata ağacı analiz işlemleri başlangıç olaylarının ayrıştırılması, olasılıkları bilinmeyen başlangıç olaylarının olasılık hesabı, uzmanların derecelendirilmesi, değerlendirilmelerin toplanması, bulanık sonuçların berraklaştırılması, berraklaştırılan sonuçların hata oranına dönüştürülmesi ve tepe olayının hesaplanması aşamalarından oluşur.

### 2.2.1. Başlangıç Olaylarının Ayrıklaştırılması

Yöntemin ilk aşamasında meydana gelme olasılıkları bilinen başlangıç olayları ile meydana gelme olasılıkları geçmiş verilerle tespit edilemeyen başlangıç olaylarının ayrıştırılması yapılır. Bu çalışmada tespit edilen başlangıç olaylarının meydana gelme olasılıkları tespit edilemediği için tümü bulanık mantık yöntemi ile tespit edilmiştir.

### 2.2.2. Başlangıç Olaylarının Olasılıklarının Hesaplanması

Literatürde olasılıkları bilinmeyen olayların olasılık hesabı için genellikle istatistiksel yöntem, bilinene dayalı tahmin yöntemi veya uzman değerlendirmesi yöntemi kullanılır.

### 2.2.3. Başlangıç Olaylarının Ayrıklaştırılması

Her uzman için uzmanlık alanları, tecrübeleri, eğitim düzeyleri gibi kıstaslara bağlı olarak ağırlıklandırıp, özgün derecelendirmelerin gerçekleştirildiği aşamadır. Bu çalışmada heterojen uzman grubunun değerlendirmelerinden faydalanılmıştır. Heterojen uzman grubu uzmanların tümünün aynı meslekte olmadığı durum için kullanılır. Literatürde, konuya farklı yaklaşım açıları getirmesi nedeni ile heterojen uzman grubu daha avantajlı olarak değerlendirilmektedir.

### 2.2.4. Başlangıç Olaylarının Ayrıklaştırılması

Bu çalışmada Hsu ve Chen (1994) tarafından önerilen, uzmanların verdikleri

farklı sözel cevapların toplanarak tek bir cevap haline getirilmesi ve bulanık mantık yöntemine uygun formata dönüştürülmesi yaklaşımı uygulanmıştır.

**Benzerlik derecesi:** Her bir uzman görüşünün (“R”) ikili benzerlik dereceleri “S” ile gösterilsin.  $E_u$  ve  $E_v$  uzmanlarının görüşlerinin ( $R_u$  ve  $R_v$ ) benzerlik derecesi hesaplanacaktır. Bulanık mantık yönteminde uzmanların her bir ifadesi ise  $\tilde{R}_u = (r_{u1}, r_{u2}, r_{u3}, r_{u4})$  ve  $\tilde{R}_v = (r_{v1}, r_{v2}, r_{v3}, r_{v4})$  olarak ifade edilmektedir.  $\tilde{R}_v = (r_{v1}, r_{v2}, r_{v3}, r_{v4})$   $r_{u1}, r_{u2}, r_{u3}$  ve  $r_{u4}$  bulanık sayılar olarak da adlandırılan üyelik fonksiyonlarının uç noktalarını ifade etmektedir.  $u$  ve  $v$  uzmanlarının görüşlerinin benzerlik oranı Bağıntı 9’da gösterilmiştir.

$$S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |r_{ui} - r_{vi}| \quad (9)$$

Benzerlik oranı için verilen  $S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \in [0,1]$  bağıntısı bu oranın en çok 1 olabileceğini göstermektedir. Oranın 1 değeri alması durumunda uzmanların ifadelerinin aynı olduğu çıkarımı yapılır.

**Ortalama benzerlik derecesi:** Ortalama benzerlik derecesi (AA) tüm uzmanların ifadelerinin benzerlik derecesinin ortalaması anlamına gelir. “N” toplam uzman sayısını ifade etmektedir.

$$E_u (u = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

$$AA(E_u) = \frac{1}{N-1} \sum_{u \neq v} S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \quad (11)$$

**Bağlı ortalama benzerlik derecesi (RA):** Her bir uzmanın, tüm uzmanların ifadelerine oranının göstergesidir. Bir başka deyişle, bir uzmanın ifadesinin diğer tüm uzmanların ifadeleri ile benzerlik derecesini ifade eder.

$$RA(E_u) = \frac{AA(E_u)}{\sum_{u=1}^N AA(E_u)} \quad (12)$$

**Konsensüs Katsayısı:** “w” uzmanların ağırlık derecelerini göstermektedir.  $\beta$  indirgeme katsayısı ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) olarak ifade edilir ve uzmanların ağırlıklandırma işlemi sonucunda kazandıkları dereceler, karar verici tarafından artırılması veya azaltılmasını sağlamaktadır. Bu çalışma için  $\beta$  değeri 1 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

$$CC(E_u) = \beta \cdot w(E_u) + (1 - \beta) \cdot RA(E_u) \quad (13)$$

**İfadelerin toplanması ( $\tilde{R}_{AG}$ ):**

$$\tilde{R}_{AG} = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (14)$$

**2.2.5. Bulanık Sonuçların Berraklaştırılması**

Bu çalışmada, literatürde en çok kullanılan ağırlık merkezine göre berraklaştırma yöntemi uygulanmıştır. Berraklaştırılmış çıktı değeri  $X^*$ , üyelik fonksiyonlarının toplamı  $\mu_i(x)$  ve çıktı değişkeni  $x$ .

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x) \cdot x dx}{\mu_i(x)} \quad (15)$$

Yukarıda belirtilen berraklaştırma bağıntısı üçgen ve yamuk şeklindeki bulanık sayıları için kullanılmaktadır. Tüm bulanık sayılar için geçerli olan genel berraklaştırma işlemi Bağıntı 16’ da verilmiştir.

$$X^* = \frac{\int_{r_2-r_1}^{r_4-r_1} \frac{x-r}{r_2-r_1} x dx + \int_{r_2}^{r_3} x dx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} x dx}{\int_{r_2-r_1}^{r_4-r_1} \frac{x-r}{r_2-r_1} dx + \int_{r_2}^{r_3} x dx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} dx} = \frac{1}{3} \frac{(r_4+r_3)^2 - r_4r_3 - (r_1+r_2)^2 + r_1r_2}{r_4+r_3-r_2-r_1} \quad (16)$$

**2.2.6. Berraklaştırılan Sonuçların Hata Oranına Dönüştürülmesi**

Onisawa elde edilen bulanık sonuçların hata oranı ( $HO_0$ ) için doğrudan kullanılamayacağını ve hata olasılığına ( $HO_1$ ) dönüştürülmesi gerektiğini savunmuştur [32-34]. Buna göre, gerçeğe

yakın hata olasılıkları Bağntı 17 ve Bağntı 18'de belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$HO_1 = \begin{cases} \frac{1}{10^K}, & HO_0 \neq 0 \\ 0, & HO_0 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$K = \left[ \left( \frac{1 - CFP}{CFP} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (18)$$

### 2.2.7. Minimum Kesme Setlerinin ve Tepe Olayının Hesaplanması

Tepe olayın (TO) meydana gelmesi için yeterli olan minimum sayıdaki başlangıç olayının kombinasyonları minimum kesme seti (MCS) olarak isimlendirilir. Her tepe olayının kendine özgü sayıda minimum kesme seti oluşmaktadır. Minimum kesme setlerinin meydana gelme olasılıkları ( $P(MCS_i)$ ) ile tepe olayın meydana gelme olasılığı ( $P(TO)$ ) arasındaki ilişki Bağntı 19'da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} P(TE) &= P(MCS_1 \cup MCS_2 \cup \dots \cup MCS_N) = P(MCS_1) + P(MCS_2) \\ &+ \dots + P(MCS_N) - (P(MCS_1 \cap MCS_2) + (P(MCS_1 \cap MCS_3) \\ &+ \dots + (P(MCS_i \cap MCS_j) \dots) + (-1)^{N-1} P(MCS_1 \cap MCS_2 \cap \dots \cap MCS_N) \end{aligned} \quad (19)$$

## 3. Kopan Halat Yaralanması Bulanık Hata Ağacı Uygulaması

Bu çalışmada kopan halat yaralanma kazası olayına bulanık mantık yaklaşımı ile hata ağacı uygulaması, tanker terminal bağlama operasyonlarında görevli gemi ve sahil çalışanlarından oluşan 10 kişilik uzman grubuna danışılmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Hata ağacında yer alan başlangıç olaylarının tepe olayının meydana gelmesi üzerindeki etkilerini tespit etmek amacı ile uzman grubuna danışılmış olup, uzman değerlendirmelerine bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır.

### 3.1. Bulanık Halat Ağacı Uygulamasında Uzmanların Ağırlıklandırılması

Bulanık mantık yönteminin uygulanması

aşamasında değerlendirmeleri yapan uzmanlar mesleki yeterlilikleri, operasyon tecrübeleri ve eğitim düzeyleri dikkate alınarak ağırlıklandırılmıştır. Böylece her uzmanın verdiği sözel cevapların aynı etkiye sahip olmaması sağlanarak, subjektif etki minimize edilmeye çalışılmıştır. Uzman ağırlıklandırma parametreleri ve her bir parametrenin uzman ağırlık değerine etkisi Tablo 2'de gösterilmiştir. Kopan halat yaralanması kazasını değerlendiren uzmanların ağırlıklandırma değerleri ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

2 ve 8 numaralı uzmanlar % 13 oranında ağırlık değeri ile en yüksek oranda ağırlık değerine sahip iki uzman olarak tespit edilmiştir. Dolayısı ile bulanık hata ağacı hesaplamalarında bu iki uzman tarafından yapılmış olan değerlendirmeler en yüksek etkiye sahip olmuştur.

**Tablo 2.** Uzman Ağırlıklandırma Parametreleri ve Puanlama Değerleri

Parametreler	Sınıflandırma	Puanlama
Mesleki Yeterlilik	Kılavuz Kaptan	5
	Gemi Kaptanı	4
	Terminal Operasyon Sorumlusu (TOS)	3
	2. Kaptan	2
	Personel	1
Operasyon Tecrübesi (yıl)	$\geq 16$	5
	11 - 15	4
	6 - 10	3
	3 - 5	2
	$\leq 2$	1
Eğitim Düzeyi	Doktora	5
	Yüksek Lisans	4
	Lisans	3
	Ön Lisans	2
	Orta Öğretim	1



**Tablo 3.** Halat Yaralanma Kazasını Değerlendiren Uzmanların Ağırlıklandırması

Uzman Numarası	Mesleki Yeterlilik	Operasyon Tecrübesi (yıl)	Eğitim Düzeyi	Ağırlık Faktörü	Ağırlık (w)
1	2. Kaptan	3-5	Doktora	9	0,09
2	Gemi Kaptanı	6 - 10	Doktora	12	0,13
3	2. Kaptan	3-5	Yüksek Lisans	8	0,08
4	Kılavuz Kaptan	6 - 10	Lisans	11	0,12
5	TOS	3 - 5	Lisans	8	0,08
6	Personel	≥ 16	Orta Öğretim	7	0,07
7	2. Kaptan	6-10	Lisans	8	0,08
8	Kılavuz Kaptan	11 - 15	Lisans	12	0,13
9	Gemi Kaptanı	6 - 10	Yüksek Lisans	11	0,12
10	TOS	11 - 15	Ön Lisans	9	0,09

### 3.2. Bulanık Hata Ağacı Uygulama Sonuçları

Bulanık mantık yönteminin uygulanması hesaplanmış değerleri Tablo 4' te paylaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda tepe olayının yani "Kopan Halat Yaralanma Kazası" olayının meydana gelme olasılığı 0,0479 olarak tespit edilmiştir. Bu da her 100 tanker terminal bağlama operasyonunda yaklaşık olarak 5 kopan halat yaralanması kaza potansiyelinin olduğunu gösterir.

**Tablo 4.** Başlangıç Olaylarının Hesaplanmış Hata Oranları

Başlangıç Olayı	Hesaplanmış Değerler	Başlangıç Olayı	Hesaplanmış Değerler
Y.Pl.1	0,006294283	İ.E.3	0,02788049
Y.Pl.2	0,007332459	Y.Pr.1	0,0111209
Y.Pl.3	0,00998467	Y.Pr.2	0,0075971
Y.Pl.4	0,012957697	Y.Pr.3	0,000090
Y.Pl.5	0,01118467	Y.Pr.4	0,00025
Y.Pl.6	0,00787393	Y.Pr.5	0,0181778
E.D.1	0,019847437	Y.Pr.6	0,0119466
E.D.2	0,011525135	Y.Pr.7	0,0091587
E.D.3	0,010106613	Y.Pr.8	0,0002214
E.D.4	0,023912295	P.İ.1	0,0140531
E.D.5	0,018484234	P.İ.2	0,0304606
E.D.6	0,010457345		

Tablo 4'te hesaplanmış değerleri verilmiş olan başlangıç olaylarından tepe olayının oluşmasında en etkili olanı, "Prosedür İhlali" ara olayını meydana getiren başlangıç olaylarından 0,0304606 değeri ile "Eğitimsizlik" olduğu saptanmıştır. En etkili olduğu saptanan diğer başlangıç olayları ise "İnsan Etkisi" ara olayını meydana getiren başlangıç olaylarıdır. Elde edilen sonuçlara göre "Kopan Halat Yaralanma Kazası" tepe olayının gerçekleşmesinde en etkili başlangıç olaylarının doğrudan veya dolaylı olarak insan kaynaklı olduğu görülmüştür.

### 3.3. Bulanık Hata Ağacı Uygulamasında Minimum Kesme Setleri

Yüksek olasılık değerine sahip olan başlangıç olayları ve tepe olayının, en kısa yoldan meydana gelmesine vesile olması sebebi ile minimum kesme setlerinin tespit edilmesi ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Meydana gelme olasılıkları en yüksek olan ilk 20 minimum kesme setine ait olasılık değerleri ve tepe olayı riskinin hesaplanan değeri Tablo 5'te verilmiştir.

Oluşturulan hata ağacında "Kopan Halat Yaralanması" tepe olayına sadece "kopan halatın personele çarpması" ara olayı ile "halatın kopması" ara olayı "ve" kapağı ile bağlı olduğundan bu iki ara olayı oluşturan başlangıç olaylarından birer

**Tablo 3. Halat Yaralanma Kazasını Değerlendiren Uzmanların Ağırlıklandırması**

Başlangıç Olayı	Hesaplanmış Değerler	Başlangıç Olayı	Hesaplanmış Değerler
Y.Pr.5*Y.Pl.1	0,000114416	İ.E.2*E.D.4	0,000574795
Y.Pr.5*Y.Pl.2	0,000133288	İ.E.2*E.H.3	0,000573037
İ.E.3*P.İ.2	0,000849257	E.D.5*P.İ.2	0,000563041
İ.E.2*P.İ.2	0,000732202	Y.Pr.5*P.İ.2	0,000553706
İ.E.3*İ.E.1	0,000730599	İ.E.3*Ez.Ç.F.1	0,000550247
İ.E.3*E.D.4	0,000666686	E.D.1*İ.E.1	0,000520095
İ.E.3*E.H.3	0,000664647	İ.E.2*İ.A.3	0,000495944
İ.E.2*İ.E.1	0,000629898	E.D.5*İ.E.1	0,000484373
E.D.1*P.İ.2	0,000604565	Y.Pr.5*İ.E.1	0,000476342
İ.E.3*İ.A.3	0,000575229	E.D.1*E.D.4	0,000474598
Tepe olay risk değeri: 0,0479			

tanesi minimum kesme seti oluşması için yeterli olmuştur. Dolayısı ile yüksek olasılık değerine sahip olan başlangıç olaylarının meydana getirdiği minimum kesme setlerinin tepe olayının oluşmasındaki etkisi daha yüksek olmuştur. Bu çalışmada tepe olayına etkisi en yüksek olan minimum kesme setini “Eğitimsizlik” ile “Eksik konsantrasyon ve yorgun personel” başlangıç olaylarının oluşturduğu tespit edilmiştir. “Eğitimsizlik” başlangıç olayının meydana gelme sıklığı hizmet içi eğitim uygulamaları ve bağlama operasyonları ile ilgili eğitim değerlendirme standartlarının uluslararası kural koyucular tarafından belirlenerek uygulanması olarak belirlenmesi sureti ile minimize edilebilir. İle “Eksik konsantrasyon ve yorgun personel” başlangıç olayının meydana gelme sıklığı ise personel çalışma saatlerinin ILO (Uluslararası Çalışma Örgütü) standartlarına uygun olması ve denetlenmesi ve personel motivasyonunu artıracak iş ve yaşam standartlarının sağlanması sureti ile minimize edilebilir. Bu faaliyetler gerçekleştirildiği takdirde kaza riski azaltılmış olur.

#### 4. Sonuç

Kopan halat yaralanması kazasının kök sebeplerinin incelendiği bu çalışma,

bulanık hata ağacı analizi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kopan halat yaralanması kazalarında insan kaynaklı hataların yoğunlukta olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile kopan halat yaralanma kazası riskinin azaltılabilmesi için öncelikle “Eğitimsizlik” ve “Eksik Konsantrasyon ve Yorgun Personel” başlangıç olaylarının üzerine gidilmesi ve düzeltici faaliyetlerin geliştirilmesi gerekliliği sonucu çıkarılmıştır. Bu çalışma ile tanker terminal bağlama operasyonu yönetim paydaşları olan gemi kaptanlarına, kılavuz kaptanlara ve terminal bağlama operasyonu sorumlularına kopan halat yaralanması kazası riskine neden olan tüm kök sebepleri bir arada görerek kontrol altında tutabilmeleri yönünde sistematik bir yaklaşım sunulmuştur. Bu çalışmada bağlama operasyonları tanker-terminal bağlama operasyonları ile sınırlandırılmıştır. Dolayısı ile tanker dışındaki gemilerde ve rıhtım dışında gerçekleştirilen, şamandıra bağlama operasyonu, gemi-gemi bağlama operasyonu gibi, bağlama operasyonları için kullanılması uygun değildir. İlerleyen çalışmalarda, kopan halat yaralanma kazası risk değerinin yok edilmesi ya da kabul edilebilir risk değerlerine indirgenebilmesi amacıyla risk kontrol seçeneklerinin belirleneceği ve bunların

fayda maliyet analizinin yapılacağı bir çalışma da yapılacaktır. Ayrıca tankerlerin rıhtım bağlama operasyonları dışında kalan bağlama operasyonlarını da içine alan bir çalışma yapılacaktır. Bu sayede alınacak önlemlerin getireceği maliyetlerin ve buna karşılık kopan halat yaralanması kazası riskinin azaltılmasına yönelik elde edilecek faydaların karşılaştırılabilmesi için operasyon yönetim paydaşlarına karar desteği sağlanmış olacaktır.

Çalışmada kullanılan Hata Ağacı Analizi yönteminin bazı zafiyetleri bulunmaktadır. Bunlar; oldukça ayrıntılı ve genelde zaman alıcı olması, analizcinin yaklaşımına göre aynı olay için özellikle şeklen farklılık gösterebilmesi, ayrıntılı teknik bilgi ve dokümana ihtiyaç duyulması ve olaylar arasındaki ilişkinin yalnızca alt-üst olaylar arasında gerçekleştirilebilmesi olarak sıralanması mümkündür. İlerleyen çalışmalarda belirtilen bu zayıf yönlerin en aza indirildiği, olaylar arasındaki hiyerarşik ilişkinin yalnızca alt-üst yönlü değil aynı zamanda yatay seviyede de kurgulanmasına imkan veren Bayesian Network yöntemi veya alternatif olarak hataları olasılıklarına ve benzerliklerine göre sıralayarak sistemlerin potansiyel hata türlerini analiz eden Hata Modu ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemi ile yaralanmalı halat kazası riskinin hesaplanması yapılacaktır.

### Kaynaklar

- [1] IMO (International Maritime Organisation) (1997). Interim guidelines for the application of formal safety assessment to the IMO Rulemaking process. MSC circular 829.
- [2] IMO (2000). Decision parameters including risk acceptance criteria. Submitted by Norway. MSC circular 72/16. Retrieved from: <http://research.dnv.com/skj/FsaLsaBc/MS72-16.pdf>
- [3] IMO (2002, 2004, 2006, 2013). Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making Process. MSC circular 1023/MEPC/Circ.392.
- [4] Senol, Y. E., Aydogdu, Y. V., Sahin, B., & Kilic, I. (2015). Fault tree analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5232-5244.
- [5] Uğurlu, Ö., Köse, E., Yıldırım, U., & Yüksekıldız, E. (2015). Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Maritime Policy & Management*, 42(2), 163-185.
- [6] Kum, S., & Sahin, B. (2015). A root cause analysis for Arctic Marine accidents from 1993 to 2011. *Safety science*, 74, 206-220.
- [7] Turan, O., Öiçer, A. İ., & Martin, P. L. (2003, March). Risk assessment of loss of life for fishing vessels in fuzzy environment. In *Safety and reliability* (Vol. 23, No. 2, pp. 19-38). Taylor & Francis.
- [8] Senol, Y. E., & Sahin, B. (2016). A novel real-time continuous fuzzy fault tree analysis (RC-FFTA) model for dynamic environment. *Ocean Engineering*, 127, 70-81.
- [9] Mentis, A., & Helvacioğlu, I. H. (2011). An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems. *Ocean Engineering*, 38(2-3), 285-294.
- [10] Pan, N. F. (2006). Evaluation of building performance using fuzzy FTA. *Construction Management and Economics*, 24(12), 1241-1252.
- [11] Yuhua, D., & Datao, Y. (2005). Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(2), 83-88.

- [12] Mao, G. Z., Tu, J. W., & Du, H. B. (2010, October). Reliability evaluation based on fuzzy fault tree. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2010 IEEE 17th International Conference on* (pp. 963-966). IEEE.
- [13] Flory, J.F. & Ractliffe, A. (1994). Mooring arrangement management by computer, *Ship Operations, Management and Economics Symposium*, New York, USA: Merchant Marine Academy.
- [14] Das, S.N., Kulkarni, S., & Kudale, M. D. (2015). Design of safe mooring arrangement for large oil tankers, *Procedia Engineering* 116 ( 2015 ) 528 – 534.
- [15] Kudale, A., Vidula, Sohoni V., & Sadhana, Kulkarni S. (2016). Mooring System for Very Large Ships at Berth, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol.6(4), 163-171.
- [16] Shi, X.Y., Zhang N.C., Chen, C.B., Jiang, H.Z., Cui, L. (2014). Experimental Study of characteristics of motions of a large mooring ship in long-period waves. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 240-246.
- [17] Prpic-Orsic, J., Slapnicar, V., Turk, A. (2014). Berth operability estimation related to ship motion. *Transactions of FAMENA*, Vol.38 No.1, pp 13-24.
- [18] Yetkin, M. (2014). Tanker Şamandıra Baülama Sistemlerinin Yapay Sinir Ağları Tekniğıyle Optimizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Molen, van der W., Scott,D., Taylor, D. & Elliot, T. (2015). Improvement of mooring configurations in Geraldton Harbour. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2016; 4(1):3.
- [20] Sluiskes, B. (2016). Safety in Mooring. *Terra et Aqua* Number 143, pp.14-19. Retrieved from:<https://www.iadcdredging.com/ul/cms/terraetaqua/document/4/8/5/485/485/1/article-safety-in-mooring-143-2.pdf>.
- [21] UK P&I Club (2009). Understanding Mooring Incidents. Retrieved March 14, 2017 from:[https://www.ukpandi.com/fileadmin/uploads/ukpi/LP%20Documents/LP\\_Reports/UnderstandingMooringIncidents.pdf](https://www.ukpandi.com/fileadmin/uploads/ukpi/LP%20Documents/LP_Reports/UnderstandingMooringIncidents.pdf).
- [22] NNPC (2015). Preventing accident during (un)mooring operations. Noord Nederlandsche P&I Club. Retrieved from: [http://www.nnpczeevaart.nl/hst/n07n06p/nnpc.nsf/0/B3012021C8574AB3C1257E6600360E70/\\$FILE/NNPC\\_MOORING\\_ENG\\_LR.pdf](http://www.nnpczeevaart.nl/hst/n07n06p/nnpc.nsf/0/B3012021C8574AB3C1257E6600360E70/$FILE/NNPC_MOORING_ENG_LR.pdf).
- [23] OCIMF (2008). Mooring Equipment Guidelines, 3rd Edition. Oil Companies International Marine Forum.
- [24] IMO (2005a). Guidance on shipboard towing and mooring equipment. MSC circular 1175.
- [25] DMA (2006). Safety Study from the division for investigation of maritime accidents, Danish Maritime Authority. Mooring accidents on board merchant ships between 1997-2006.
- [26] Antao, P. & Soares, C., G. (2006). Fault-tree models of accident scenarios of RoPax vessels. *International Journal of Automation and Computing*, 3(2):107-116.
- [27] Chen, P., Mou, J. & Li, Y. (2015). Risk analysis of maritime accidents in an estuary: a case study of Shenzhen Waters, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 42 (114), 54–62.
- [28] Larsen F., W. (1974). Fault Tree Analysis Technical Report 4556. Retrieved from: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/774843.pdf>

- [29] Dhillon, B.S. (2008). Mining equipment reliability, maintainability, and safety, Doi.org/10.1007/978-1-84800-288-3.
- [30] Zadeh, L. A. (1965). Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3), 338-353.
- [31] Ford, D. Sterman, J. D. (1998). Expert knowledge elicitation to improve mental and formal models. *System Dynamics Review*, 14(4), 309-340, doi:10.1002/(SICI)1099-1727(199824)14:4<309.
- [32] Onisawa, T. Nishiwaki, Y. (1988). Fuzzy human reliability analysis on the Chernobyl accident. *Fuzzy Sets and Systems*, 28(2), 115-127, doi: 10.1016/0165-0114(88)90194-7 .
- [33] Onisawa, T. (1990). An application of fuzzy concept to modelling or reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 37(3), 267-286, doi:10.1016/0165-0114(90)90026-3.
- [34] Onisawa, T. (1996). Subjective analysis of system reliability and its analyzer. *Fuzzy Sets and Systems*, 83(2), 249-269, doi:10.1016/0165-0114(95)00381-9.