



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2011, Volume: 6, Number: 2, Article Number: 1A0183

ENGINEERING SCIENCES

Received: November 2010

Accepted: February 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Ayhan Menteş

İsmail Hakkı Helvacıoğlu

Istanbul Technical University

mentes@itu.edu.tr

Istanbul-Turkey

**AÇIK DENİZ YAPILARI İÇİN BULANIK TABANLI BİR GÜVENİLİRLİK ANALİZİ
UYGULAMASI**

ÖZET

Bir açık deniz yükleme/boşaltma sistemi olan çok noktalı bağlama sistemi, çeşitli su derinliklerinde kullanılabilen çeşitli boyutlardaki gemiler için uzun servis ömrü gerektiren terminal uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çeşitli operasyon şartlarında sistemin emniyet sınırlarının tahmini operasyon güvenilirliği için son derece önemli bir görevdir. İşlemler, oldukça yüksek seviyede belirsizliklere sahip olup nitel ve nicel veri karışımını içermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada sistemin emniyet analizini belirlemek için bulanık küme teorisini esas alan bir hata ağacı emniyet analizi yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca, çok noktalı bağlama sisteminde kargo hattının zarar görmesine neden olan zirve olayda her temel olayın etki ölçüsünü görmek için bulanık ağırlık göstergesine dayalı bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar yöntemin uygulamada oldukça çok yönlü ve esnek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle yöntem diğer açık deniz yapıları emniyet analiz problemlerinde rahatlıkla kullanılabilir ve uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler: Çok Noktalı Bağlama Sistemi,
Hata Ağacı Çözümlemesi, Güvenilirlik Tayini,
Bulanık Ağırlık Göstergesi,
Bulanık Küme Teorisi

A FUZZY BASED SAFETY ANALYSIS APPLICATION FOR OFFSHORE STRUCTURES

ABSTRACT

The spread mooring system which is an offshore loading/offloading system can be utilized extensively for the terminal applications that require long service life for various sizes of vessels deployed at various water depths. The estimation of the reliability limits of the system under various operation conditions is an extremely significant task for the operation safety. The operations are associated with a high level of uncertainty and contain a mixture of quantitative and qualitative data. Therefore, a fault tree reliability analysis methodology based on fuzzy set theory has been developed in this study. Furthermore, a sensitivity analysis is carried out based on the fuzzy weighted index in order to measure the impact of each basic event on the top event that lead to damage of cargo line for the spread mooring system. The results indicate that this methodology has dreadfully versatile and flexible in application. Therefore, it can easily be used and applied in reliability analysis problems for other offshore structures.

Keywords: Spread Mooring System, Fault Tree Analysis,
Reliability Assessment, Fuzzy Weighted Index,
Fuzzy Set Theory

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Açık denizde yükleme/boşaltma işlemleri için kullanılan deniz yapılarında sistem emniyetini sağlamak, kazaların önlenmesi veya en az değerlere indirilmesi açısından büyük bir önem teşkil etmektedir. Bu çeşit işlemler için sıklıkla kullanılan çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistemi, zaman zaman zorlayıcı hava koşulları altında da yükleme/boşaltma işlemlerini gerçekleştirir. Emniyetli bir şekilde yükleme/boşaltma işlemlerinin gerçekleştirebilmesi, olası kaza risk sınırlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve sistemi oluşturan bileşenlerin ve işlevsel özelliklerin doğru tahlili ile mümkün olabilmektedir. İstenilmeyen tehlikeli olaylara ya da kazalara sebep olabilecek kritik unsurlar için sistematik güvenilirlik yaklaşımlarını uygulamak, sistemin emniyet ve güvenilirliğinin tespiti, önlenmesi ve/veya azaltması açısından zorunlu hale gelmektedir.

Kazaların tahmini, önlenmesi ve azaltılması için çeşitli emniyet ve güvenilirlik analiz yöntemleri geliştirilmiş ve önerilmiştir [1]. Klasik hata ağacı (KHA) yöntemi, 1962 yılında Bell Telefon Laboratuvarlarında, kıtalararası balistik füze hedefleme kontrol sistemlerinin güvenlik değerlendirmesini gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. KHA sistem hatalarını, sistem ve sistem bileşenlerinin hatalarındaki ilişkiyi gösteren mantıksal diyagramlardır. Karmaşık sistemlerin emniyet ve güvenilirlik hesaplamalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [2].

KHA yönteminde bir sistemin zirve hata olasılığı sistemin temel bileşenlerinin hata olasılığı kesin değerler olacak şekilde hesaplanır [3]. Oysaki sistem modelleme sürecinde sistem bileşenlerinin hata oranları genelde belirsiz ve bulanık bir ortamda gerçekleşir. Pek çok olayda kaza olaylarının göreceli sıklıklarını kullanan KHA yöntemi eksik, yetersiz veya bulanık bilgilerle sonuçlanır [4]. Temel olaylar genellikle statik ve ergodik değildirler. Klasik olasılık teorilerini kullanarak, güven etkilerini ve/veya ana olayları güvenilir bir şekilde hesaplamak mümkün değildir. Bu tür zorlukların üstesinden gelebilmek için bulanık hata ağacı analizi (BHA) yöntemi sıklıkla kullanılır. BHA yöntemi, bulanık küme teorisi (BKT) ve olasılık teorisini kullanır ve belirsiz, bulanık, nitel olarak eksik ve hatalı bilgileri kullanarak işlemler yapar. Çeşitli araştırmacılar mühendislik, işletme, yönetim vb. disiplinlerde BHA yöntemini başarılı bir şekilde kullanmışlardır [5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11]

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Çok noktalı bağlama sistemlerinde tankerin petrol yükleme ve boşaltma işlemleri dinamik bir ortamda gerçekleştiği ve büyük ölçüde teknik, personel hatalar ve işlevsel bozukluklarından kaynaklanan tehlikeli kazalara yol açtığı için yüksek seviyede belirsiz, eksik ve bulanık bilgiyi içermektedir. Bu nedenle, bağlama sistemlerinin davranışlarının modellenmesinde bu çeşit bilgileri hesaba katan bulanık mantık tabanlı bir güvenilirlik çözümleme yönteminin kullanılması doğru bir yaklaşım olacaktır. Yapılan çalışma çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistemlerinde oniki farklı bağlama seçeneği için güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi, en riskli/en az riskli bağlama sisteminin tespiti ve çözümlenmesinde, bulanık küme teorisi ve hata ağacı analizi yöntemini içeren melez bir yaklaşıma dayanmaktadır. Önerilen yöntem bağlama sistemlerini oluşturan ana ve ana alt olayların emniyet dağılım sınırlarını ölçmek ve değerlendirmek için bulanık tabanlı hassasiyet çözümlemesini de kapsamaktadır.

Bu çalışma, çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistemi için bulanık/belirsiz/eksik/sözel bilgiyi içerisine katabilen kullanışlı bir güvenilirlik çözümlemesi yöntemi geliştirmesi nedeniyle önemlidir.

3. BULANIK KÜME TEORİSİ VE HATA AĞACI ANALİZİ (FUZZY SET THEORY AND FAULT TREE ANALYSIS)

Bulanık küme teorisi ve bulanık mantık kavramı ilk kez Zadeh [12] tarafından ortaya atılmış ve hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çeken araştırmaya açık yeni bir bilim dalı olmuştur. Bulanık küme teorisi temelde, insan düşünce ve algılarındaki belirsizliklerle ilgilenir ve bu belirsizlikleri sayısallaştırmaya çalışır. Bu teori klasik matematiğin çok yetersiz kaldığı, özünde belirsizlik veya kesinlik içermeyen karar verme problemlerine, kesinlik kazandırıp çözümdeki sorunları ortadan kaldıran kavramlar ve yöntemler sunmaktadır.

Endüstride pek çok işlem sürecinde ele alınan bir sistemde, sistemi oluşturan bileşenlerin kesin hata oranlarını veya olasılık değerlerini bilmek çok zordur. Belirgin yaklaşım bulanık ve belirsiz bir ortamda gerçekleşen sistemlerin modellenmesinde, her bileşenin hata oranını tespit etmekte yetersiz kalmaktadır. Bir sistemin modellenmesinde başarı ya da başarısızlık durumları için kesin sınırlar çoğu durumda mevcut değildir. Doğasında bulanık, belirsiz ve eksik veri bulunan temel bileşenlerden oluşan sistemlerin emniyet analizinde, BKT'yi esas alan Bulanık Hata Ağacı (BHA) yöntemi kullanılır. BHA yönteminde, bileşenlerin kesin olasılık değerleri, bulanık gerçel sayılarla ifade edilebilmektedir.

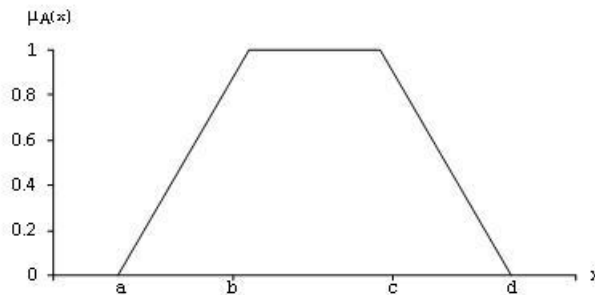
3.1. Bulanık Sayılar (Fuzzy Numbers)

Bulanık olasılık değeri bulanık bir sayıdır ve bulanık bir küme tarafından ifade edilir ve onun üyelik fonksiyonu " μ " ile ifade edilir. Bulanık sayı üçgen, yamuk vb. şekilde ifade edilebilir. Bir P_i olayının bulanık hata olasılık değeri yamuk bulanık sayı olarak 4 elemandan oluşacak şekilde aşağıdaki gibidir:

$$P_i = (p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (1)$$

Yamuk üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde temsil edilir (Şekil 1):

$$\mu_{P_i}(x) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq P_i \leq p_1 \\ \frac{P_i - p_1}{p_2 - p_1} & , p_1 \leq P_i \leq p_2 \\ 1 & , p_2 \leq P_i \leq p_3 \\ \frac{p_4 - P_i}{p_4 - p_3} & , p_3 \leq P_i \leq p_4 \\ 0 & , p_4 \leq P_i \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$



Şekil 1. Yamuk bulanık sayı
(Figure 1. A trapezoidal fuzzy number)

n sayıda "ve" giriş kapısı ve $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ giriş değeri için bulanık olasılık değeri;

$$P_T^{AND} = \tilde{P}_{x_1} \tilde{P}_{x_2} \dots \tilde{P}_{x_n} \quad (3)$$

şeklinde. Eğer \tilde{P}_{x_1} ve \tilde{P}_{x_2} temel olaylar için iki bulanık olasılık değeri ise bulanık çarpım kuralı aşağıdaki gibidir [13]:

$$\tilde{P}_{x_1} \otimes \tilde{P}_{x_2} = (P_{1A}P_{2A}, P_{1B}P_{2B}, P_{1C}P_{2C}, P_{1D}P_{2D})$$

Burada,

$(P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}, P_{1D})$ ve $(P_{2A}, P_{2B}, P_{2C}, P_{2D})$ yamuk bulanık sayılardır.

n sayıda "veya" giriş kapısı ve $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ giriş değeri için bulanık olasılık değeri;

$$P_T^{OR} = 1 - \left[\left(1 - \tilde{P}_{x_1} \right) \otimes \left(1 - \tilde{P}_{x_2} \right) \otimes \dots \otimes \left(1 - \tilde{P}_{x_n} \right) \right] \quad (4)$$

Benzer bir şekilde \tilde{P}_{x_1} bir temel olayın bulanık olasılık değeri ise bulanık tamamlama kuralı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\tilde{P}_{x_1} = \left(1 - P_{1A}, 1 - P_{1B}, 1 - P_{1C}, 1 - P_{1D} \right) \quad (5)$$

Burada; P_T tepe olayının, \tilde{P}_{x_i} ise alt olayların hata olasılık değerlerini ifade eder.

3.2. Bulanık Sayıların Bulanık Olasılık Skorlarına Dönüştürülmesi (Converting Fuzzy Numbers into Fuzzy Probability Scores)

Bulanık ortamdaki problemde hesap yaparken elde edilen bulanık oranların sonuç değerleri yine bulanık sayılardır. Sonuçlar arasındaki ilişkiyi karşılaştırmak için, bulanık sayıları, belirgin sayılara dönüştürmek zorunludur. BHA yönteminde elde edilen belirgin sayılar, bulanık hata olasılık sayıları olarak ifade edilir. Bu işlem, BKT'de aynı zamanda durulaştırma olarak bilinir. Pek çok durulaştırma yöntemi mevcuttur [14, 15, 16 ve 17].

Bu çalışmada, bulanık sıralama yaklaşımı yöntemi, bulanık sayıların belirgin sayılara dönüştürülmesinde kullanılmıştır [14]. Chen ve Hwang (1992)'a göre bulanık maksimize ve minimize kümeleri aşağıdaki şekilde ifade edilirler:

$$\mu_{\max}(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{\min}(x) = \begin{cases} 1 - x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (7)$$

M'nin sağ skor, sol skor ve toplam skor (bulanık olasılık skoru) değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanırlar.

$$\mu_R(M) = \sup_x [\mu_M(x) \wedge \mu_{\max}(x)] \quad (8)$$

$$\mu_L(M) = \sup_x [\mu_M(x) \wedge \mu_{\min}(x)] \quad (9)$$

$$\mu_T(M) = [\mu_R(M) + 1 - \mu_L(M)] / 2 \quad (10)$$

3.3. Hassasiyet Analizi (Sensitivity Analysis)

Karmaşık sistemlerde, uygun tasarım değişikliklerinin belirlenebilmesi için hassasiyet analizine ihtiyaç duyulur. Hassasiyet analizinde, en iyi tasarım seçeneğini belirlemek ve sistem emniyet/güvenilirliği bakımından belirlenen çözümün etkilerini değerlendirebilmek için, sistemin en zayıf bileşenlerini hesaplamaya ihtiyaç vardır [18].

BHA yönteminde zirve olayının oluşma olasılığı, sadece sistemin durumu hakkında genel bir bilgi verir. Ancak, bir sistemin tasarımı ve işletilmesi esnasında, zirve olayına sistem kaybı, sistemin mevcut olmaması ve temel olayların sıklık kaybı şeklinde etki eden her temel olayın etkisinin yüzde dağılımını bilmeye ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistem seçeneklerinin hassasiyet analizi için, bulanık ağırlık göstergesi (BAG) kullanılmıştır. Bu gösterge, her temel olayın hata dağılım ölçümlerini esas alır. BAG tekniği için benzer uygulamalar literatürde mevcuttur [19 ve 7].

BAG farklı temel olayların dağılımlarını değerlendirmek için de kullanılabilir. Temel bir olayın BAG değeri $D(P_i, P_{t_i})$ olup, hesaplanan $P_i \otimes P_{t_i}$ değerinin sıralaması ile değerlendirilir:

$$D(P_i, P_{t_i}) = R(P_i \otimes P_{t_i}) \quad (11)$$

Burada; P_i zirve olay olasılığını; P_{t_i} ise X_i (elimine edilmiş temel olaylar)'a göre zirve olay olasılığını gösterir.

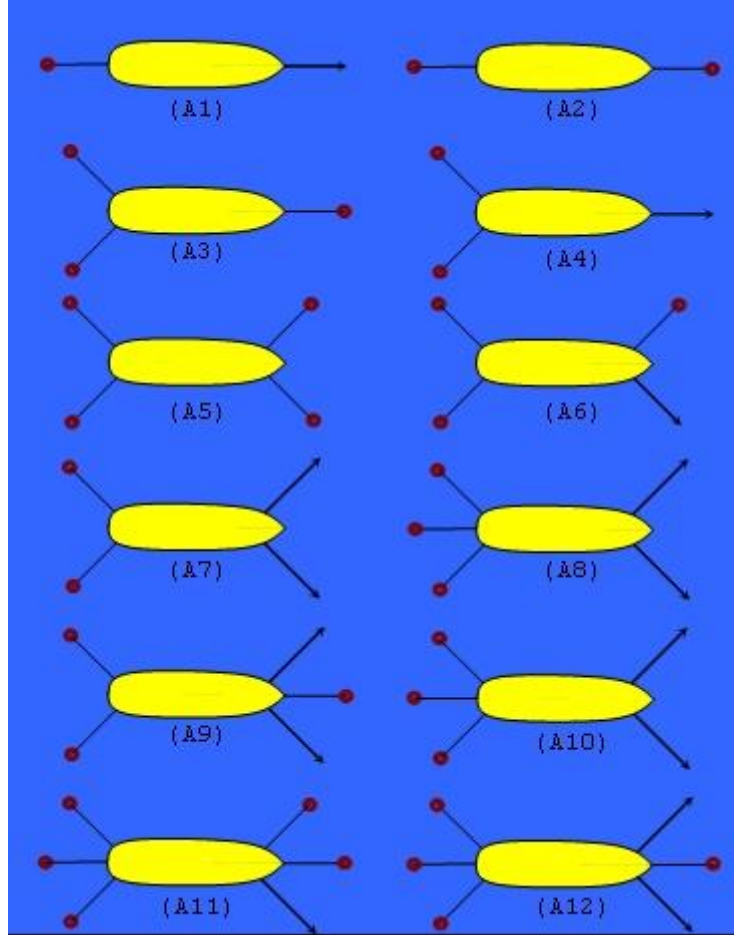
4. BULANIK TABANLI EMNİYET ANALİZ YÖNTEMİ (FUZZY BASED SAFETY ANALYSIS METHOD)

Çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sisteminde 12 farklı bağlama seçeneği için temel bileşenlerin ve zirve olayı emniyet sınırlarının analizi için yedi adımdan oluşan sistematik bir yöntem geliştirilmiştir. Analiz adımları aşağıdaki sıralanmıştır.

- Sistem modelleme ve planlama: Problemin tanımlanması, başlangıç analizi ve problem hakkında gerekli bilgilerin toplanması safhalarından oluşur.
- Risk tanımlama: Potansiyel hata sonuç senaryoları için zirve olayının ve alt olaylarının tanımlanması safhalarından oluşur.
- Hata ağacı oluşturma: Hata mantığının geliştirilmesi ve hata ağacının düzenlenmesi safhalarını içerir.
- Sıklık tayini: Temel olayların kaza sıklıklarının tespiti (kaza istatistikleri, anketler ya da benzetim sonucu elde edilen veriler yardımıyla) safhasıdır.
- Sonuç tayini: Zirve ve alt hataların olasılıklarının tespiti safhalarından oluşur.
- Risk tayini aşaması: Bu aşamada BHA yöntemi kullanılarak sistemin güvenilirlik analizi yapılmaktadır. Bu safha; derecelendirme safhası (belirgin sayıların bulanık sayılara dönüştürülmesi), hata olasılığı hesabı, durulaştırma (bulanık sayıların belirgin sayılara dönüştürülmesi) ve sıralama safhalarından oluşur.
- Risk yönetimi ve kontrol: Hassasiyet analizi bulanık ağırlıklandırma göstergesi (BAG)'yı kullanarak yapılan işlemlerin gözlemlenmesi, incelenmesi safhaları ve karar verme adımlarından oluşur.

5. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu çalışmada, Marmara Denizi'nin doğusunda kurulup, tanker yükleme/boşaltma işlemlerinde kullanılacak bir tesiste, rüzgâr, akıntı ve dalga gibi çevresel yüklere maruz kalan çok noktalı tanker - şamandıra bağlama sistemi için emniyet problemi ele alınmıştır. Bu amaçla oniki farklı bağlama sistemi seçeneği kullanılmıştır (Şekil 2, Tablo 1). Bu seçenekler, Türkiye'yi çevreleyen denizlerde kullanılan veya kullanılması muhtemel olan bağlama şekillerini kapsamaktadır.



Şekil 2. Tanker-şamandıra bağlama sistemi seçenekleri
(Figure 2. Tanker-buoy mooring system alternatives)

Olası çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistemi seçenekleri için, sistem emniyet sınırlarını hesaplayacak bulanık tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Buna istinaden uygulama alanı olarak Marmara denizinin doğusunda, çeşitli dolun tesislerinin bulunduğu bir bölge seçilmiştir. Sisteme etkileyen çevre koşullarını belirlemek için, koordinatları en yakın istasyon olan Yalova açıklarındaki (40.71° N, 29.29° E) noktası alınmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. İzmit Körfezi ve çok noktalı bağlama sistemleri
(Figure 3. Gulf of Izmit and Spread Mooring Systems)

- **Sistem Modelleme ve Planlama:** Bu çalışmada, tanker-şamandıra bağlama sistemi emniyet analizi için 12 farklı bağlama şekli kullanılmıştır (Tablo 1, Şekil.2). Uç hava koşullarında hesap yapmak için seçilen bölgede, yükleme/boşaltma yapan Tablo2'de özellikleri verilen en büyük tonajlı tanker seçilmiştir.

Tablo 1. Tanker-şamandıra bağlama sistemi seçenekleri
(Table 1. Tanker-buoy mooring system alternatives)

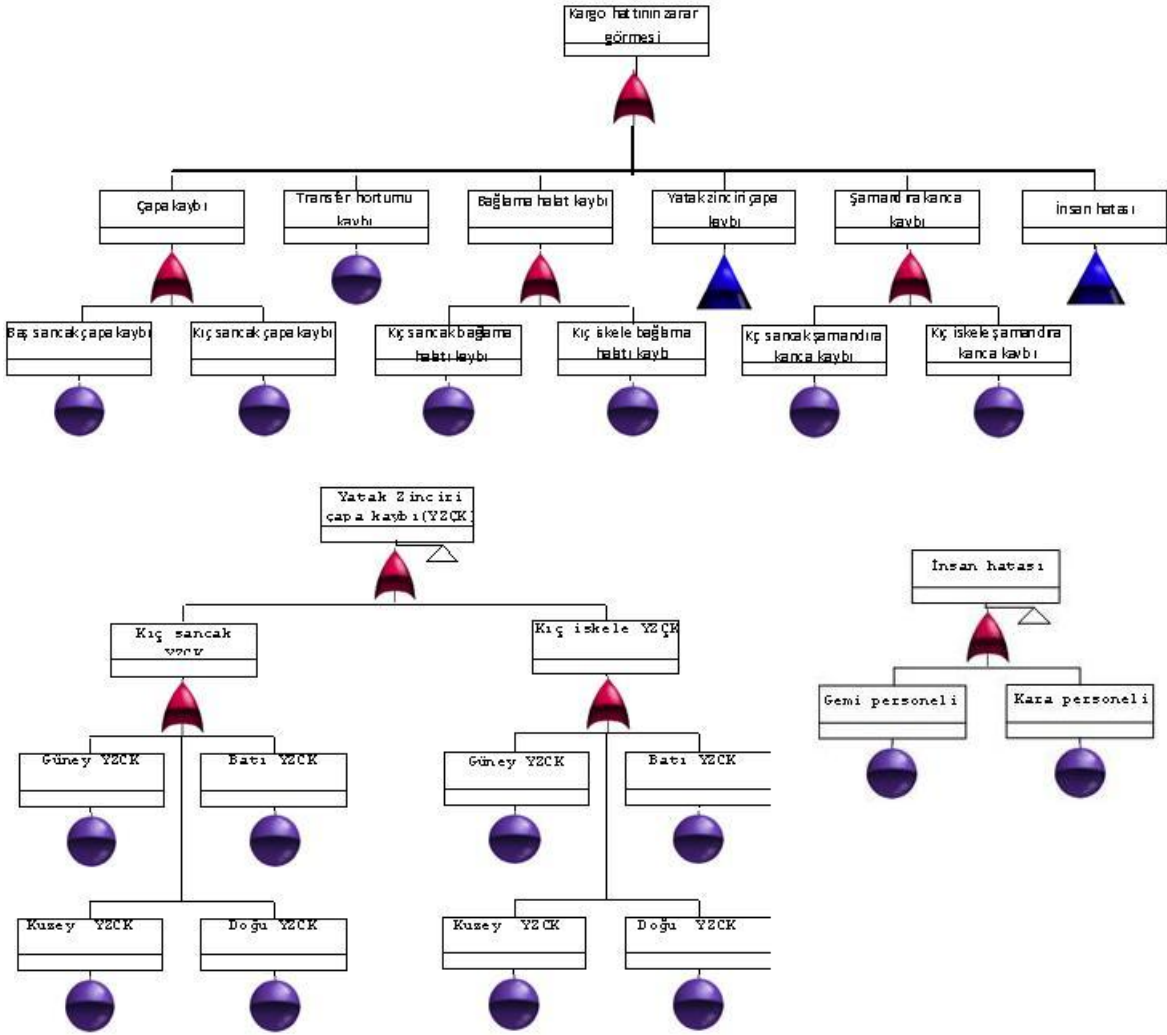
Tanker - şamandıra bağlama şekli	
A1	Baş merkezde 1 çapa ve kış merkezde 1 şamandıra
A2	Baş ve kış merkezde 1 şamandıra
A3	Baş merkezde 1, kış sancak ve iskelede 1 şamandıra
A4	Baş merkezde 1 çapa, kış sancak ve iskelede 1 şamandıra
A5	Baş sancak ve iskelede, kış sancak ve iskelede 1 şamandıra
A6	Baş sancakta 1 çapa, baş iskelede, kış sancak ve iskelede 1 şamandıra
A7	Baş sancak ve iskelede 1 çapa, kış sancak ve iskelede 1 şamandıra
A8	Baş sancak ve iskele 1 çapa, kış merkez, sancak ve iskele 1 şamandıra
A9	Baş sancak ve iskele 1 çapa, baş merkez ve kış sancak, iskele 1 şamandıra
A10	Baş sancak ve iskele 1 çapa, kıçta merkezde, sancak ve iskele 1 şamandıra
A11	Baş sancak 1 çapa, baş merkez, iskele ve kış merkez, sancak, iskele 1 şamandıra
A12	Baş sancak, iskele 1 çapa, baş ve kış merkez, kış sancak ve iskele 1 şamandıra

Tablo 2. LPG tankeri özellikleri
(Table 2. Properties of the LPG tanker)

Deplasman	Δ (ton)	125832
Tam boy	LOA (m)	250,0
Genişlik	B (m)	38,71
Tasarım su çekimi	Tdesign (m)	16,17
Boyuna rüzgar kesit alanı	AL (m ²)	3601,4
Enine rüzgar kesit alanı	AT (m ²)	857,2
Blok katsayısı	C _B	0,804
Malzeme sayısı/numarası	EN	3617/U43
Çapa ağırlığı	kg	11100
Zincir çapı	mm	92
Zincir ağırlığı	kg/m	190
Malzeme sayısı	EN	3617

Önceden olmuş kaza istatistikleri, bağlama operasyonu sırasında yapılan gözlemler, bağlama işlemlerinden sorumlu uzman ve personel ile yapılan görüşme ve anketlerle gerekli bilgiler toplanmıştır. Bu sonuçlardan gemi hareketi nedeniyle oluşan kargo hattı kaybı (kopması) sistemin güvenilirliğini en fazla tehlikeye sokacak unsur olduğu görülmüştür.

- **Risk Tanımlama:** Birinci aşamada bahsedilen kargo hattı kaybı (zarar görmesi veya kopması) zirve olay olarak seçilmiştir. Ana alt olay kayıpları; tanker çapa kaybı, bağlama halatı kaybı, şamandıra yatak zincirleri çapa kaybı, şamandıra kanca kaybı, transfer hortumu kaybı ve insan hatası olarak seçilmiştir.
- **Hata Ağacı Oluşturma:** Zirve olay en tepede olmak üzere, hata ağacı diyagramı tepeden başlayarak aşağıya doğru oniki farklı bağlama seçeneği için ayrı ayrı oluşturulmuştur. A7 için oluşturulan hata ağacı Şekil 4' de görülebilir.



Şekil 4. A7 için hata ağacı diyagramı
(Figure 4. Fault tree diagram for A7)

- **Frekans Tayini:** Çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistem seçeneklerinin her biri, OrcaFlex™ programı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra değişik çevre koşulları altında simülasyon çalıştırılmış, her seçenek için risk oluşturan tüm alt bileşenlerin hata frekansları hesaplanmıştır. OrcaFlex™ simülasyonlarından elde edilen sonuçlar ve istasyon bölgesi için rüzgar, dalga ve akıntı olasılık indeksi değerleri kullanılarak sistemde kayıp oluşturan her bileşen için frekans tayini yapılmıştır. Rüzgar ve dalga kuvvetlerinin yön ve büyüklüğünün belirlenmesinde, Türkiye kıyıları rüzgâr ve derin deniz dalga atlası, akıntı kuvvetlerinin yön ve büyüklüğünün tespitinde ise, seyir hidrografi ve oşinografi daire başkanlığının akıntı haritaları kullanılmıştır. Bu verilere göre seçilen bölgede en yüksek rüzgar hızı 60 knot, yıllık en büyük belirgin dalga yüksekliği $H_s=3$ m ve en büyük akıntı hızı 2.5 knot olarak elde edilmiştir. Hakim rüzgâr ve dalga yönünün değişikliği göz önünde tutularak simülasyon çalışmalarında ana ve ara yönler için (kuzey, k.batı, k.doğu, güney, g.batı, g.doğu, doğu ve batı) hesaplar yapılmıştır. Farklı tanker-şamandıra bağlama seçenekleri için, şamandıralar ile gemi arasındaki bağlama halatının boşunun alındığı ve şamandıranın ön gergili olduğu kabul edilmiştir.

Her simülasyonda alt olaylara etkiyen gerilme değerleri, bu olayların en yüksek dayanma gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır. Bu en yüksek değeri geçen her değer sistemde bir hata olarak kabul edilmiştir.

- **Sonuç Tayini:** Bu adımda OrcaFlex simülasyon sonuçları analiz edilmiştir. Tanker çapa kaybı, bağlama halatı kaybı, şamandıra yatak zincirleri çapa kaybı, şamandıra kanca kaybı ve transfer hortumu kaybı olaylarında, çapa, halat dizayn gerilme değerlerini aşan gerilme kuvvetleri ve transfer hortumu için gemi ortasındaki yer değiştirme miktarlarını analiz edilmiştir. Bu değerleri aşan değerler kullanılarak alt bileşenlere ait hata frekansları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, 20 yıllık dizayn ömrüne sahip çok noktadan bağlı tanker-şamandıra sistemi için, Yarımca rüzgar olasılık indeksi değeri ile çarpılmıştır. Sonuç olarak, 12 farklı bağlama seçeneği için yukarıda bahsedilen ana alt olayların hata oranları hesaplanmıştır.

Tanker-şamandıra bağlama sistemi için sistem emniyetini etkileyen bir faktör de insan hatasıdır. Bağlama seçeneklerinde personel hatası (kara personeli, gemi personeli) bulanık olasılık oranlarının elde edilmesi için bir anket ile bu çeşit sistemlerde uzman olan karar vericilere danışılmıştır. Uzmanlara sorulan anketlerden elde edilen bulanık olasılık skorları bulanık hata oranlarına dönüştürülmelidir.

Bulanık hata oranı (BHO), bulanık olasılık sayıları (BOS) kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [20].

$$BHO = \begin{cases} 1/10^k, & BOS \neq 0 \\ 0, & BOS = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Bu denklemde, $k = \lceil 1 - BOS \rceil^{1/3} \times 2.301$,dır.

- **Bulanık Tabanlı Risk Tayini:** BHA yönteminde, bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak her bağlama seçeneği için bulanık sayılar yamuk bulanık olasılık sayılarına dönüştürülür. Denklem (3.4) kullanılarak, 12 bağlama seçeneği için zirve olayının bulanık hata olasılık skorları elde edilir.

Daha sonra, denklem (8), (9) ve (10) kullanılarak bulanık olasılık sayıları, belirgin sayılara dönüştürülür. Böylece 12 farklı bağlama seçeneği için zirve olay hata olasılıkları hesaplanmış olur (Tablo 3).

Tablo 3. Çok noktalı bağlama sistemleri için zirve hata olasılık değerleri

(Table 3. Top event probability values for spread mooring systems)

Seçenekler	Yamuk Bulanık Sayı Zirve olay olasılığı				Durulaştırma		
	P_{iA}	P_{iB}	P_{iC}	P_{iD}	Sağ skor	Sol skor	Topam skor
A ₁	0,012005	0,017968	0,029817	0,035703	0,035494	0,982138	0,026678
A ₂	0,015293	0,022867	0,037873	0,045306	0,044972	0,977305	0,033833
A ₃	0,010757	0,016098	0,026705	0,031972	0,031804	0,983988	0,023908
A ₄	0,008233	0,012328	0,020476	0,024528	0,024429	0,987722	0,018353
A ₅	0,004965	0,007439	0,012372	0,014831	0,014794	0,992579	0,011108
A ₆	0,004242	0,006357	0,010577	0,012681	0,012654	0,993656	0,009499
A ₇	0,002941	0,004409	0,007340	0,008804	0,008791	0,995597	0,006597
A ₈	0,003488	0,005228	0,008701	0,010434	0,010416	0,994781	0,007817
A ₉	0,003392	0,005084	0,008463	0,010149	0,010132	0,994924	0,007604
A ₁₀	0,001034	0,001551	0,002584	0,003100	0,003098	0,998450	0,002324
A ₁₁	0,001272	0,001907	0,003177	0,003812	0,003809	0,998094	0,002858
A ₁₂	0,000878	0,001317	0,002195	0,002633	0,002632	0,998683	0,001974
A ₁	0,012005	0,017968	0,029817	0,035703	0,035494	0,982138	0,026678

Elde edilen sonuçların bir kısmı aşağıda verilmektedir:

- o A1 yerine A2 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %27 artmakta (2 noktadan bağlı sistemler için)
- o A4 yerine A3 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %30 artmakta (3 noktadan bağlı sistemler için)
- o A7 yerine A5 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %68 artmakta (4 noktadan bağlı sistemler için)
- o A10 yerine A8 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %236 artmakta (5 noktadan bağlı sistemleri için)
- o A12 yerine A11 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %45 artmaktadır (6 noktadan bağlı sistemler için).

Tüm tanker-şamandıra bağlama seçenekleri hata olasılıkları dikkate alındığında, A12 yerine A2 seçilirse zirve olayı hata olasılığı %1614 artış göstermektedir.

- **Risk Yönetimi ve Kontrol:** Sistem alt bileşenleri için elde edilen verileri gözden geçirerek, tanker-şamandıra bağlama sistemi için optimum emniyet seviyesi elde edilebilir.

Denklem (11) kullanılarak hata ağacında sistem alt bileşenlerinin hata olasılık değerleri (önem dereceleri) elde edilir. Bu sonuçlardan; A1, A2, A3, A5, A6, A7, A8 ve A9 seçeneklerinde bağlama halat kaybı, A4 seçeneğinde çapa kaybı, A10 ve A11 seçeneklerinde ise kanca kaybı en kritik sistem alt bileşeni olarak elde edilmiştir. Kaza olasılığı yüksek olan sistem bileşeninin sistem üzerindeki zararı çok büyüktür. Bu nedenle, tüm bağlama seçenekleri için, sistem alt bileşenlerinin risk sınırlarını belirlemek son derece önemlidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, çok noktalı tanker-şamandıra bağlama sistemi emniyet analizi için bulanık tabanlı bir hata ağacı analizi yöntemi geliştirilmiş ve yöntemin uygulaması oniki farklı tanker-şamandıra bağlama sistemi için yapılmıştır. Önerilen yöntem bulanık ve sözel özellikler gösteren bağlama sistemi emniyet analizi için uygundur. Önerilen güvenilirlik analizi yöntemi Yarımca bölgesindeki bir yükleme/boşaltma terminalindeki uç çevre yükleri etkisi altındaki en

yüksek tonajdaki bir tankere uygulanmıştır. Bu bağlama seçenekleri için güvenilirlik indeksleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. 12 farklı tanker-şamandıra bağlama sistemi için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, zirve hata olasılıkları artış miktarlarının %27 ile %1614 arasında değiştiği görülmüştür. Bağlama şekillerini 2, 3, 4, 5 ve 6 noktadan bağlı bağlama şekillerine göre de karşılaştırmak mümkündür.

BHA yönteminde, bulanık ağırlık indeksi kullanılarak hata ağacında tepe olayı tetikleyen her ana ve alt olaylar için frekans değerleri hesaplanmıştır. Bulanık ağırlık indeksi, her bir bağlama seçeneğinde, sistemi oluşturan ana ve alt bileşenlerin zayıf ve güçlü yönlerini ortaya çıkararak, sistem ve sistem bileşenlerinin analizine olanak sağlamaktadır. Bu sonuçlar, sistem tasarımı yapanlar için sistem bileşenlerini yeniden gözden geçirip, zayıf olan bileşenlerde birtakım değişiklikler yapmaları açısından oldukça önemlidir. Yapılan emniyet analiz hesaplamalarında, önerilen yöntemin gerek uygulama aşamaları ve gerekse elde edilen sonuçlar, yöntemin çok kolay ve kullanışlı olduğunu göstermiştir. Çok noktalı bağlama sistemleri ve sistem bileşenlerinin güvenilirlik haritasını çıkartmak amacıyla geliştirilen BHA yöntemi, yapılacak küçük değişikliklerle deniz endüstrisinde pek çok işlem sürecinde güvenilirlik analizi işlemlerinde rahatlıkla kullanılabilir bir yapıya sahiptir.

Bu çalışmanın devamında, malzeme özellikleri ve operasyon kısıtlamaları gibi değişkenlerde hesaba katılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın bir bölümü Strathclyde üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu üniversitede gerçekleştirilen akademik çalışmalar sırasında desteklerini esirgemeyen Sayın Dr. Osman Turan, Prof. Dr. Atilla İncecik ve tüm akademik ve idari personele teşekkür ederiz. Ayrıca Tinçel Vakfı, İTÜ Rektörlüğü ve Türk Loydu'na verdikleri maddi destekten dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Vose, D., (2008). Risk Analysis: A Quantitative Guide. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, England.
2. Chang, J.R., Chang, K.H., Liao S.H., and Cheng, C.H., (2006). The Reliability of General Vague Fault-Tree Analysis on Weapon Systems Fault Diagnosis. Soft Comput. 10(7), 531-542.
3. Yuhua, D. and 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, 83-88.
4. Singer, D., (1990). A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis. Fuzzy Sets and Systems, 34, 145-155.
5. Turan, O., Olcer, A.I. and Martin, P.L., (2003). Risk Assessment of Loss of Life for Fishing Vessels in Fuzzy Environment. The Journal of Safety and Reliability, 23(2), 19-38.
6. Abhulimen, K.E., (2009). Model for Risk and Reliability Analysis of Complex Production Systems: Application to FPSO/Flow-Riser System. Computers and Chemical Engineering, 33, 1306-1321.
7. Ferdous, R., Khan, F., Veitch, B., and Amyotte, P.R., (2009). Methodology for computer aided fuzzy fault tree analysis. Proc. Safety and Environmental Protection, 87(4), 217-226.
8. Zio, E., Baraldi, P., and Popescu, I.C., (2009). A fuzzy decision tree method for fault classification in the steam generator of a pressurized water reactor. Annals. of Nuclear Energy, 36(8), 1159-1169.

9. Dokas, I.M., Karras, D.A., and Panagiotakopoulos, D.C., (2009). Fault tree analysis and fuzzy expert systems: Early warning and emergency response of landfill operations. *Environmental Modelling & Software*, 24, 8-25.
10. Celik, M., Lavasani, S.M., and Wang, J., (2010). A risk-based modelling approach to enhance shipping accident investigation. *Safety Science*, 48, 18-27.
11. Mentes, A., (2010) Açık Deniz Yapıları Bağlama Sistemlerinin Dizaynında Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Uygulanması. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye.
12. Zadeh, L.A., (1965). Fuzzy sets, *Information and Control*, 8, 338-353.
13. Tanaka, H., Fan, L.T., Lai, F.S., and Toguchi, K., (1983). Fault-tree analysis by fuzzy probability. *IEEE Transactions on Reliability*, 32, 150-163.
14. Chen, S.J. and Hwang, C.L., (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Berlin, Springer.
15. Cheng C.H., (1998). A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method. *Fuzzy Sets Syst.* 95(3), 307-317.
16. Chen S.H., (1999). Ranking generalized fuzzy number with graded mean integration. *Proceedings of the Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress*, 2, 899-902, Taipei, Taiwan, Republic of China.
17. Chen, S.J. and Chen, S.M., (2006). Fuzzy risk analysis based on the ranking of generalized trapezoidal fuzzy numbers. *Appl. Intell.*, 26, 1-11.
18. Contini, S., Scheer, S., and Wilikens, M., (2000). *Sensitivity Analysis for System Design Improvement*. Joint Research Centre, Institute for Systems, Informatics and Safety, Ispra (VA), Italy.
19. Cheong, W.C. and Lan Hui, L.A., (2004). Web access failure analysis-fuzzy reliability approach. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, 12(1), 65-73.
20. Swain, A.D. and Guttmann, H.E., (1983). *Handbook of human reliability with emphasis on nuclear power plant applications*. NUREG/CR-1278-F, Sandia National Labs, NM.