



Hızlı Feribotlarda Makine Dairesi Kaynaklı Yangın Koşullarında Tahliye Operasyonunun Yönetimine Yönelik Benzetim Destekli Metodoloji Önerisi

Peiman Alipour SARVARI¹, Emre ÇEVİKCAN¹, Metin ÇELİK², Alp ÜSTÜNDAĞ¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Türkiye

peyman.alipour@gmail.com; ORCID ID: orcid.org/0000-0003-1235-2102

cevikcan@itu.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0001-5109-5458

ustundaga@itu.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0003-2151-4759

celikmet@itu.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0107-1380

Öz

Toplu deniz taşımacılığında artan talep ve sefer çeşitliliği neticesinde, yolcu gemilerinde daha kalabalık insan grupları bir arada bulunur hale gelmektedir. Denizcilikte acil durum tahliye operasyonunun etkin planlama ile gerçekleştirilmesi, gemilerdeki yolcular ve mürettebat için hayati öneme sahiptir. Bu makalenin amacı, gemideki yolcu faktörleri ve makine dairesi kaynaklı yangınları içeren olası senaryoları değerlendirerek, tahliye operasyonunun hızlı ve emniyetli bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu çerçevede, yolcu rotalamasını da içeren bütünsel bir yöntem geliştirilerek, literatüre katkı sağlanmıştır. Çalışmada geliştirilen yöntem kapsamında yolcuların demografik ve fiziksel özellikleri ile ilgili bilgi anket ile elde edilmiştir. Daha sonra, makine dairesi yangını koşullarında gemi acil durum tahliye operasyonu benzetimi (simülasyonu) "Maritime EXODUS V5.1" ve "SMARTFIRE V4.3" yazılımları ile yapılmıştır. Benzetim sonuçlarının istatistiksel analizi gerçekleştirilerek, tahliye faktörlerinin etkileri saptanmıştır. Geliştirilen yöntem, bir hızlı feribotta gerçek işletim şartları dikkate alınarak uygulanmıştır. Uygulama sonuçları, önerilen rotalama sistematığının etkinliğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Toplu Deniz Taşımacılığı, Acil Durum Tahliyesi, Makine Dairesi Yangını, Benzetim, Operasyon Yönetimi.

A Simulation Aided Methodology Suggestion for Managing Emergency Evacuation Operation Under Engine Room Sourced Fire Conditions

Abstract

More crowded groups of people gathers in passenger ships as a result of increasing demand and variety of navigation. Supporting marine emergency evacuation via effective planning has a vital importance for passengers and crew. The objective of the study is to provide contribution for performing evacuation in a safe and fast manner by means of evaluating scenarios including different passenger factors and engine room sourced fires. Within this framework, this study adds value to the relevant literature by proposing a holistic methodology including a novel passenger routing systematic. Within this methodology, information about demographic and physical attributes of passengers was obtained by means of questionnaire. Then, the simulation of ship emergency evacuation under engine room fire conditions was performed via Maritime

To cite this article: Sarvari, P. A., Çevikcan, E., Çelik, M. and Üstündağ, A. (2017). Hızlı feribotlarda makine dairesi kaynaklı yangın koşullarında tahliye operasyonunun yönetimine yönelik benzetim destekli metodoloji önerisi. *Journal of ETA Maritime Science*, 5(4), 362-385.

To link to this article: <https://dx.doi.org/10.5505/jems.2017.77699>

EXODUS V5.1 and SMARTFIRE V4.3. The effects of evacuation factors were determined by making statistical analysis on simulation results. The methodology is applied at a ferryboat via the consideration of real life working conditions. The results demonstrate the effectiveness of the proposed routing systematic.

Keywords: Public Marine Transportation, Emergency Evacuation, Engine Room Sourced Fire, Simulation, Operations Management.

1. Giriş

Toplu deniz taşımacılığı, dünya ekonomisinin ve ulaşım ağının önemli bir bileşenidir. Toplu deniz taşımacılığı faaliyetleri yürüten her şirket/kurum, yolcularının ve mürettebatının güvenliğini göz önüne almalıdır. Dünyada 2011-2015 yılları arasında yaşanan 12591 deniz kazasında, 477 can kaybı ve 4335 yaralanma meydana gelmiş olup, 161 gemi batmış; 4275 gemi zarar görmüştür. Bu periyotta meydana gelen kazaların %23'ü yolcu gemisi veya feribotlarda meydana gelmiştir. Bu kazalarda ölen ve yaralanan kişi sayısının toplam ölüm ve yaralanma vakalarındaki oranı ise sırası ile %17 ve %37 olarak belirlenmiştir [1]. Ülkemiz karasularında 2005-2015 yılları arasında 54 deniz kazası meydana gelmiştir. Bu kazalardan 6'sı yolcu gemisi, 10'u feribot olmak üzere 67 gemi etkilenmiştir [2]. Bu bağlamda, yolcuların acil durumlarda gemilerden güvenli tahliyelerinin sağlanması gerekmektedir.

Bu makalenin amacı toplu deniz taşımacılığında karşılaşılabilecek makine dairesi yangınlarında yolcu tahliye sürecinin uygun bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak ve bu süreçte etkili olan faktörleri ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda, toplu deniz taşımacılığı seferlerinin yolcular ve mürettebat açısından daha güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesine katkıda bulunulacaktır.

Yöntemsel olarak çalışma metodolojik yapıdadır. Metodoloji kapsamında öncelikle, yolcuların demografik ve fiziksel özellikleri ile ilgili parametreler anket yöntemi ile temin edilecektir. Daha sonra, yolcu faktörleri, çevresel faktörler, rotalama faktörleri ve yolcu gemisi faktörleri dikkate alınarak oluşturulan yolcu gemisi

tahliye süreci senaryolarının benzetimi yapılmaktadır. Benzetim aşamasında yolcuların hareket parametreleri, anket ile elde edilen yolcu özellik dağılımları ile modele yansıtılmaktadır. Metodolojinin son aşamasında tahliye faktörlerinin tahliye süresine etkisini belirlemek amacı ile senaryoların benzetim sonuçlarının istatistiksel analizi (ANOVA) yapılmaktadır.

Metodoloji adımlarının uygulanması esnasında ise İstanbul Deniz Otobüsleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. filosunun en yüksek kapasiteli feribotu olan Osman Gazi i'nin yerleşimi ve tahliye sistemlerine (konum, kapasite, hazır hale gelme) ait veri kullanılmış olup, zaman ve mekansal olarak ise bu feribotun Yenikapı-Bursa arasında Ekim 2015-Temmuz 2016 döneminde yaptığı seferler dikkate alınmıştır.

Gemilerin tasarım ve yerleşim süreçlerinde, yaşam mahalli, makine dairesi, kargo mahali, gibi bölgelerinde olası yangın durumları için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmektedir [3]. Özellikle, makine dairesi sistemlerindeki karmaşıklık düzeyinin artması ile birlikte, yağ-yakıt sistemleri, elektrik donanımları, ana ve yardımcı makineler gibi kritik sistemlere [4] yönelik emniyet prensiplerinin uygulanması önem arz etmektedir [5]. Yangın sistemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesinin yanısıra [6, 7], denizde acil durumlara müdahale ve gemiyi terk prosedürleri ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [8]. Bu metodoloji kapsamında çevresel acil durum faktörü olarak makine dairesi yangınlarına odaklanılmıştır. Bunun nedeni, yolcu gemisi yangınların %70'inin burada meydana gelmesidir [9]. Gemide ana makineler, kazanlar, pompalar, seyir esnasında devamlı olarak çalışan

unsurlardır. Bu bileşenlerin iç aksamalarında, devrelerinde, egzoz çıkışlarında çoğunlukla yüksek seviyede ısı bulunabilmektedir. Ayrıca, makine dairesinde yanıcı, patlayıcı madde yoğunluğu ve hataya meyilli işletim faaliyetleri makine dairesi yangınlarının oluşturacağı etkiyi diğer yangın konumlarına göre daha yüksek kılmaktadır.

Yukarıda ifade edilen bilgiler ışığında, toplu deniz taşımacılığının yolcu potansiyeli ve tahliye etkinliğinin can güvenliği açısından taşıdığı önem bu makaleye esin kaynağı olmuştur. Bu çalışmanın, gemi tahliye süreci hususundaki uygulamalarda planlama yetkinliğini arttırması ve mevcut literatürde tahliye faktörleri ile ilgili farkındalık oluşturması beklenmektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, geliştirilen metodoloji makine dairesi yangını odağında anket, benzetim ve istatistiksel analizi bütünleştirerek toplu deniz taşımacılığında acil durum tahliye sürecinin planlanması ve analizi ile ilgili literatüre katma değer sağlamaktadır. Buna ek olarak, makalede tahliye sistemleri arasında doluluk oranını dengelenmesi hususunu dikkate alan yeni bir rotalama sistematiği geliştirilmiştir. Salonlar arası yolcu sayısı değişkenliği de bu makalede kapsamında gemi tahliyesinde bir faktör olarak ilk defa analiz edilmektedir.

Makalenin devamında ise ilgili literatür Bölüm 2'de incelenmiştir. Geliştirilen metodoloji ve adımları yönetsel olarak Bölüm 3'te açıklanmıştır. Metodolojinin hızlı feribot ortamında yapılan uygulaması Bölüm 4'te verilmiştir. Çalışma bulguları Bölüm 5'te irdelenmiş olup, sonuç ve değerlendirmeler ise Bölüm 6'da ifade edilmiştir.

2. Literatür İncelemesi

Makalenin konusu olan gemilerdeki acil durum yolcu tahliye süreci ile ilgili literatür incelendiğinde konunun insan hayatı açısından taşıdığı önem ve karmaşık bir problem olması nedeni ile çeşitli bilimsel

çalışmalarda ele alındığı gözlemlenmiştir. Örneğin, Lee vd. [10] gemilerdeki yolcu tahliye süreci üzerine geniş bir literatür incelemesi gerçekleştirmiştir. İnceleme neticesinde ise ilgili literatürde gemi hareketlerini dikkate alan ve gerçek uygulama içeren çalışmaların sayısının artması gereğine dikkat çekilmiştir. Acil durum gemi tahliyesine yönelik RFID tabanlı bir yolcu izleme sistemi kurgusu öneren Vanem ve Ellis [11], ilgili sistemin elemanları ve prensipleri ifade etmiş olup, daha sonra sistemin maliyet ve getirileri ile risk analizini bütünleştiren bir sayısal analiz yapmıştır.

Bazı araştırmalarda ise yolcu tahliye rotalarının optimizasyonu üzerinde durulmuştur [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Gemilerde acil durum yolcu tahliyesi ile yayınların önemli bir kısmı benzetim yöntemini kullanmıştır. Örneğin, Lee vd. [18] yolcuların çıkış yönü ve tersi doğrultudaki hareketleri üzerine yapmış oldukları çalışmada grup ve bireysel hareket ile farklı batma doğrultuları ve açılarını dikkate alan deney tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Dijkstra Algoritması ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile rota belirleyen Steinsholt ve Aasen [19] ise yavaş ve hızlı yangın yayılımı, yüksek panik ortamları ile düşük ve yüksek yolcu sayıları senaryolarında sağ olarak kurtulan yolcu sayısını belirlemiştir. Benzer problem üzerine çalışan Lozowicka [20] ters doğrultudaki yolcu hareketinin tahliye performansını olumsuz yönde etkilemesinin önüne geçmek amacı ile yolcu rotalama sürecinin önemine vurgu yapmıştır. Vanem ve Skjong [9] yolcu gemilerinde tahliye riskini esas almışlardır. Gece ve gündüz ortamında yangın, batma ve çarpışma gibi faktörleri dikkate alan bu çalışmada risk hesaplanırken maruziyet değerleri yukarıda bahsedilen senaryoların benzetimi ile elde edilmiştir. Brown vd. [21], cankurtaran ekipmanların gemi tahliye sürecindeki kullanım durumlarını, tahliye konusunda eğitilmiş ve eğitimsiz

iki deney grubu üzerinde test etmiştir. Elde edilen sonuçlar gemi tahliye süresi benzetiminde kullanılmıştır. Klüpfel [22] gemi tahliyesi benzetimi ile ilgili yapmış olduğu bilgilendirme amaçlı çalışmada ilgili Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization-IMO) standartlarına, gemi tahliye sürecinin özellikleri ve benzetim sistematığı ile ilgili modellerin doğruluk ve geçerlilik sınamalarının gerçekleştirilmesi konularına değinmiştir.

Gemi ortamında yürütülen tahliye süreci ve acil durumlar için bazı araştırmacılar EVAC [23], Maritime Exodus [24, 25], AENEAS [26, 27], Evacuability Index (Evi) [28, 29], Evacuation Demonstration & Modeling (EVDEMON) [30], Intelligent Model for Extrication Simulation (IMEX) [31, 32] ve Virtual Environment for Life On Ships (VELOS) [33] isimli benzetim yazılımları geliştirmiştir. Miyazaki vd [34] engelli yolcuların durumunun da dikkate alarak yolcu rotalarının grup davranışları esas

alınarak belirlendiği bir benzetim yazılımı sunmuşlardır. Pinerio vd. [35] öncelikle IMO standartları ile çok ciddi ve ciddi deniz kazalarında gözlemlenen yolcu hareketi ile ilgili hususlara değindikten sonra Ship Evacuation Simulation and Analysis, Madrid Original (SESAMO) ve SIFBUP isimli gemi tahliyesi benzetim yazılımlarına yer vermişlerdir. Cell-DEVS gemi tahliyesi benzetim yazılımını tasarlayan Ha vd. [36] ile Roh ve Ha [37] hücre esaslı bir gemi tahliyesi benzetimi yazılımı geliştirmiştir. Bu makalelerde kalabalık ve tekil durumda yolcu davranışlarında en kısa yol mantığını esas alan yolcu tahliye rotalama sistematığı modellenmiştir. Yukarıda incelenen benzetim yazılımları ile ilgili karşılaştırma yapılmış ve Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde, genel olarak, toplum hareketinin hız etkisi üzerine odaklanılmıştır. Batma durumunu göz önünde bulundurabilen yazılımlarda, bu hususun yolcu hızına etkisi modellere yansıtılmıştır. Yangın ortamının sıcaklık

Tablo 1. Acil Durum Gemi Tahliyesi Benzetim Yazılımları

	IMEX	EVAC	Evi	Maritime Exodus	Cell-DEVS	AENEAS	VELOS	SIFBUP	EVDEMON
Topluluk Faktörü	Hız	Sosyal Etkileşim	Hız	Hız	Hız	Hız	Hız-Sosyal Etkileşim	Hız	Hız
Batma	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Batma Etkisinin Etkisi	Yerçekimi	Yok	Yolcu Hızı	Yolcu Hızı	Yolcu Hızı	Yolcu Hızı	Yolcu Hızı	Yok	Yok
Yolcu Rotası Girebilme	Yok	Yok	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Yok
Yolcu Özellikleri	Yok	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Yok	Var	Yok
Yangın Modelleme	Yok	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Var	Yok	Yok
Gerçek Deniz Ortamı Dinamikleri	Yok	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
Ticari Sürüm	Yok	Yok	Var	Var	Yok	Var	Yok	Yok	Yok

ve zehirli gaz yayılımı benzetimi yapan ve bu unsurların yolculara etkisini yolcu tahliyesine yansıtan yazılımlar mevcuttur. Genel olarak ise gerçek deniz ortamında batma-çıkma, kendi ekseninde dönme vb. dinamik durumlar yazılımlara dahil edilmemiştir. Çalışmanın acil durum odağında gemi makinesi yangınları olması ve değişik yolcu rotalarının sınanması gereksinimi nedeni ile benzetim aşamasında bu vasıfları taşıyan, yolcu hareket parametrelerini yolcu karakteristiklerine göre modelleyen ve halihazırda kullanılabilir olan Maritime Exodus yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılımın gözlemlenen bir eksikliği ise acil durum anında söz konusu olan toplum davranışını dikkate almamasıdır.

Bu makalenin uygulama alanı Türk Karasuları olması nedeni ile bu sulardaki gemi kazaları ile ilgili literatüre değinmek anlamlı olacaktır. Bu bağlamda, Türk karasuları [2, 38, 39] ve özellikle İstanbul Boğazı'ndaki [40, 41] deniz kazaları ile ilgili istatistikleri ortaya koyan çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, Ulusçu vd. [42], İstanbul Boğazı gemi trafiğine yönelik risk analizi ve benzetim içeren bir metodoloji geliştirmişlerdir. Ayrıca, kaza davranışları; coğrafi, meteorolojik ve gemi trafiği koşullarındaki değişimleri içeren senaryo analizi ile irdelenmiştir. Erol ve Başar [43] 2001-2009 yılında Türk karasularında gerçekleşen 1247 gemi kazasını karar ağacı yöntemi ile analiz etmiş ve bu kazaların %60'ının insan hatası nedeni ile meydana geldiğini vurgulamıştır. Uğurlu vd. [44] İstanbul ve Çanakkale Boğazları'nda 2001-2010 yılları arasında meydana gelen 850 kazayı Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemi ile analiz etmiştir. Araştırma sonucunda gemi personelinin zihinsel ve fiziksel koşullarının iyileştirilmesinin dar ve tehlikeli su yollarında meydana gelebilecek kaza riskini azaltacağı ifade edilmiştir.

Ayrıca, IMO'nun yolcu gemisi tahliye süreci ile ilgili sunduğu basit tahliye

analizi ile ilgili kavram ve tahliye süresi formülasyonlarını içeren standartlar [45] ve ileri tahliye analizi için kullanılan yolcular ile mürettebatın farklı şekilde konumlandırıldığı ve gündüz/gece faktörünü içeren yazılım geçirme senaryoları [46, 47, 48] mevcuttur. İleri tahliye analizi, acil durum tahliyesi ile yeni bir benzetim yazılımı geliştirildiğinde, standart bir gemi yerleşimi üzerinden ve yukarıda belirtilen senaryolar dahilinde yazılımın verdiği sonuçların tutarlılığını test etmek için uygulanmaktadır. Daha önce geliştirilmiş bir yazılım ile farklı yerleşime sahip gemilerde yapılan tahliye benzetimlerinde modelin doğru kurulup kurulmadığının irdelenmesi için basit tahliye analizi ile sonuç karşılaştırılması yapılması uygun olmaktadır. Yukarıdaki bilgiler ışığında, yapılan çalışmadaki benzetim modeli, basit tahliye analizi ile sınanacaktır.

Buna ek olarak, gemi yangınlarında yolcu tahliyesi ile ilgili Fireproof (2009-2012 / Avrupa birliği 7. Çerçeve Programı) ve Fire Exit (2002-2005 / Avrupa birliği 5. Çerçeve Programı) projeleri yürütülmüştür [49].

3. Geliştirilen Metodoloji

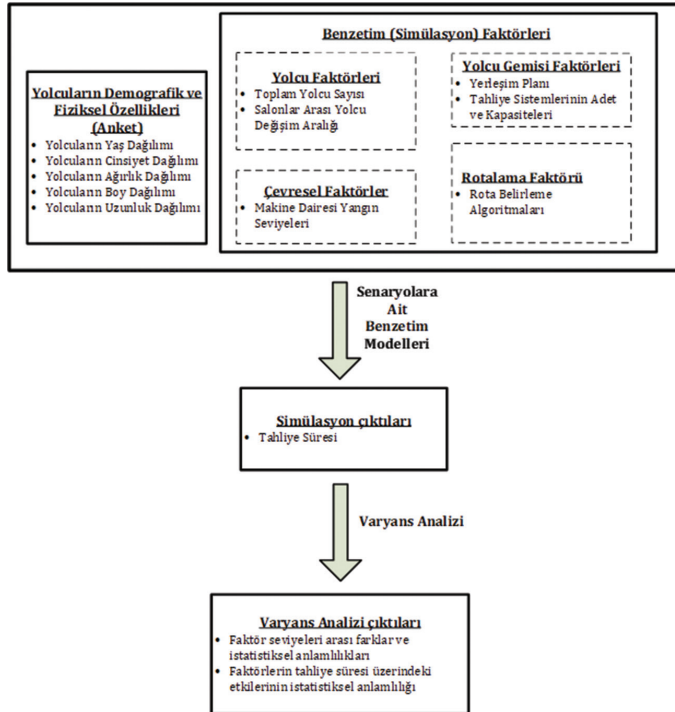
Makale kapsamında geliştirilen metodolojinin aşamaları ve bu aşamaları gerçekleştirmek için kullanılan yöntemler Şekil 1'de belirtilmiştir. Metodolojide öncelikle yolcu gemisindeki tahliye sürecinin benzetim modelleri geliştirilmiş, daha sonra istatistiksel analiz ile tahliye faktörlerinin tahliye sürecine olası etkisi belirlenmiştir. Daha sonra, karar destek sistemi ile tahliye gerektirecek acil durumlar için hazırlıklı olmak amacı ile tahliye planlaması gerçekleştirilmiştir.

Benzetim için gerekli parametrelerden olan yolcuların demografik ve fiziksel özellikleri ile ilgili veriler anket yöntemi ile temin edilmiştir. Anket tasarımında yolculardan demografik özellikler (cinsiyet,

yaş, eğitim seviyesi), fiziksel özellikler ve yüzme (boy, kilo, engel durumu, yüzme yetkinliği), sefer ve refakat ile ilgili bilgiler (yolcunun sefer sıklığı, refakat etme/edilme durumu) ve acil durum davranışı ile ilgili bilgiler (yolcunun acil durum vaka veya tatbikat tecrübesi, yolcunun gemi yerleşimi ve acil durum toplanma ve tahliye noktaları ile ilgili bilgi seviyesi, yolcunun deniz yolculuğunda acil durum ile karşılaştığındaki davranışı) temin edilmiştir. Anket tasarımında Sekaran [50]'ın önermiş olduğu prensip ve metodoloji dikkate alınmıştır.

ile mümkün olmaktadır [9, 16, 22]. Bu nedenle, geliştirilecek metodolojinin birinci aşamasında, yolcu gemilerinde tahliye sürecinin modellenmesi aşaması benzetim tekniği ile gerçekleştirilmiştir.

Bir önceki aşamada dikkate alınan benzetim senaryosu faktörlerinin tahliye performansına etkisini belirlemek amacı ile varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi modelinde yolcu sayısı, salonlar arası yolcu adedi değişkenliği, rotalama yöntemi ve makine dairesi kaynaklı yangın durumu bağımsız değişken, tahliye süresi ise bağımlı değişken olacaktır.



Şekil 1. Geliştirilen Metodoloji

Acil durum tahliye sürecinde çevresel faktörlerin seyri (yangın neticesinde zehirli gaz yoğunlaşması ve yangın esnasında yolcu hareketinin zorlaşması vb.) ve acil durumlarda ortaya çıkan stres, panik gibi psikolojik faktörlerin yolcuların davranış ve hareketlerine gerçekçi bir şekilde yansıtılması, benzetim

Çalışma kapsamında senaryoların geliştirilmesinden önce geliştirilen yolcuların zaman ve can güvenliği açısından etkin tahliyelerini sağlamak amacı ile yolcu rotalama sistematiği geliştirilmiştir. Bu bağlamda yapılan tanımlar, parametreler, değişkenler ile formülasyonlar aşağıda ifade edilmiştir.

Tanımlar

Koltuk grubu: Arasından koridor, yol veya geminin yatay eksenini geçmeyen ve tahliye noktalarına atama yapılırken bölünemeyeceği varsayılan bitişik koltuklar.

Salon: Kat içerisinde seperatör veya duvar ile ayrılmış koltuk grupları (Eğer bir salondan geminin yatay eksenini geçiyor ise mevcut salon yatay eksenini ayırdığı iki ayrı salon olarak dikkate alınır).

Parametreler

- N: tahliye noktası sayısı
- M: salon sayısı
- P: koltuk grubu sayısı
- T_i: i salonundaki koltuk grupları kümesi
- SE: Salon-tahliye noktası matrisi

$$SE = \begin{bmatrix} (d_{11}, a_{11}, b_{11}) & \dots & \dots & \dots & (d_{1N}, a_{1N}, b_{1N}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (d_{M1}, a_{M1}, b_{M1}) & \dots & \dots & \dots & (d_{MN}, a_{MN}, b_{MN}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu matriste her hücre üç bileşenden (d_{ij}, a_{ij}, b_{ij}) oluşmaktadır.

d_{ij}: i salonundan j tahliye noktasına olan uzaklık i: 1,..., M j: 1,..., N

$$d_{ij} = \frac{\sum_{o \in T_i} d_{oj} \times pas_o}{tpas_i} \quad (2)$$

d_{oj}: o koltuk grubundan j tahliye noktasına olan uzaklık o: 1,..., P j: 1,..., N

pas_o: o koltuk grubunun koltuk sayısı o: 1,..., P

tpas_i: i salonunun toplam koltuk sayısı i: 1,..., M

a_{ij}: j tahliye noktasının i salonuna olan uzaklık sırası (en yakın=1, en uzak=N) i: 1,..., M j: 1,..., N

b_{ij}: j tahliye noktası i salonunun içinde veya sınırında ise 1; i salonu j tahliye noktası ile aynı katta ise 2; i salonu j tahliye noktasından daha yüksek katta ise 3; i salonu j tahliye noktasından daha alçak katta ise 4

i: 1,..., M j: 1,..., N

SG: koltuk grubu-tahliye noktası matrisi

$$SG = \begin{bmatrix} (d_{11}, a_{11}, b_{11}) & \dots & \dots & \dots & (d_{1N}, a_{1N}, b_{1N}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (d_{P1}, a_{P1}, b_{P1}) & \dots & \dots & \dots & (d_{PN}, a_{PN}, b_{PN}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Bu matriste de SE matrisinde olduğu gibi her hücrede üç bileşen (d_{oj}, a_{oj}, b_{oj}) mevcuttur.

d_{oj}: o koltuk grubundan j tahliye noktasına olan uzaklık o: 1,..., P j: 1,..., N

a_{oj}: o koltuk grubunun j tahliye noktasına olan uzaklık sırası (en yakın=1, en uzak=N)

o: 1,..., P j: 1,..., N

b_{oj}: o koltuk grubu j tahliye noktasının sınırında ise 1; o koltuk grubu j tahliye noktası ile aynı katta ise 2; o koltuk grubu j tahliye noktasından daha yüksek katta ise 3; o koltuk grubu j tahliye noktasından daha alçak katta ise 4 o: 1,..., P j: 1,..., N

RAS_{jq}: q acil durumunda j tahliye noktasının kullanılamama durumunda yolcuların aktarılacağı alternatif çıkış noktası j: 1,..., N q: batma, yana yatma, yangın

cap_j: j noktasında bulunan tahliye sisteminin kapasitesi j: 1,..., N

LSA_j: tahliye noktası j'den yolcu aktarılabilir tahliye noktaları kümesi j: 1, N

Değişkenler

C_j: j tahliye noktasındaki tahliye sistemine atanan yolcu sayısı

AS: Kısmi veya tam olarak bir tahliye noktasına atanan salon kümesi

Tahliye düzgünlük indeksi:

$$ESI = \sum_{j=1}^N |UR_j - AUR| \quad (4)$$

Tahliye noktası j'nin doluluk oranı:

$$UR_j = \frac{C_j}{cap_j} \quad j: 1, \dots, N \quad (5)$$

AUR: Tahliye noktası ortalama doluluk oranı

$$AUR = \frac{\sum_{j=1}^N UR_j}{N} \quad (6)$$

Geliştirilen rotalama sistemiği Ek A'da sunulmuştur. Beş modülden oluşan sistemiğin birinci modülü dahilinde öncelikle tahliye noktaları, salonlar ve koltuk gruplarına yönelik parametreler belirlenmektedir. Daha sonra, ikinci modül kapsamında yolcu salonları tahliye noktalarına atanmaktadır. Makro seviyede yapılan bu atamada salonlar ve tahliye noktaları arasındaki uzaklık (birincil ölçüt) ve kat farklarının (ikincil ölçüt) azaltılması amaçlanmaktadır. Tahliye noktalarına yönelik kapasite kısıtları altında herhangi bir salon bir tahliye noktasına tam veya kısmi olarak atanabilmektedir. Salon atama aşamasından sonra kapasite kısıtından dolayı salonlar içerisinde bir tahliye noktasına atanamayan koltuk grupları üçüncü modülde kapasite kısıtlarını ve ikinci modülde elde edilen yolcu akışlarını bozmayacak şekilde tahliye rotasına dahil edilmektedir. Bu aşamaya kadar rotalama mesafe odaklı olarak yürütülmektedir. Bu bağlamda, tahliye noktaları arasındaki yoğunluk farklılıklarını dengeleyerek tahliye süresini kısaltmak amacı ile dördüncü modülde bir dengeleme algoritması sunulmuştur (Ek B). Algoritma, değişik noktalarda bulunan tahliye sistem kapasitelerinin farklı olmasından dolayı kapasite doluluk oranları üzerinden hesaplama yapmaktadır. Tahliye noktaları doluluk oranı dengeleme algoritması bazında yoğunluğu ortalamanın üzerinde olan tahliye noktalarından ortalama altı yoğunluğa sahip tahliye noktalarına kapasite ve akış kısıtları altında aktarım yapılmaktadır. Beşinci modülde ise acil durum senaryosu gereği kullanılmayacak tahliye noktası olması durumunda yolcuların yönlendirilecekleri tahliye noktaları belirlenmektedir.

Yukarıda belirtilen değişkenlerin,

rotalama sistemiği neticelendiğinde ortaya çıkan değerleri, Şekil 1'deki metodoloji kapsamında benzetim modelinin yolcu rotalama parametreleri olmaktadır.

4. Uygulama

İDO-İstanbul Deniz Otobüsleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin gerçekleştirdiği seferler içerisinde metodolojinin uygulanması için seçilen feribot yıl boyunca araçlı yolcu taşımacılığının gerçekleştirildiği en uzun hat (45 deniz mili) olan Yenikapı-Bursa seferi (İDO A.Ş. Yenikapı-Bursa seferi kapsamında 2016 yılında toplam 1.154.088 yolcu taşımıştır.) yapan Osman Gazi-I feribotudur. Köprü güverte, üst güverte, mezanin güverte, ana güverte ve katamaran tekneler katlarından oluşan bu feribot İDO filosundaki en yüksek kapasiteli deniz taşıtıdır. Osman Gazi-I feribotunun yolcu içeren katları ve profil resmi EK C'de verilmiştir. Osman Gazi-I feribotu yolcu kapasitesi 1200 kişi olup, 16 mürettebat mevcuttur. Feribotta garaj birinci ve garaj giriş katlarının iskele-sancak taraflarında 200'er kişi kapasiteli, üst güverte katı sancak tarafında 250, üst güverte katı iskele tarafında 300 yolcu kapasiteli 6 adet tahliye sistemi bulunmaktadır. Tahliye sistemlerinin her biri yaklaşık bir dakikada hazır hale gelebilmektedir.

Anketin nihai uygulama aşamasından önce, 30 kişilik bir grup üzerinden ön uygulama gerçekleştirilmiş ve anket son haline getirilmiştir. Örneklem sayısının belirlenmesi amacı ile aşağıdaki formül kullanılmıştır [51].

$$n = \frac{p \times q \times Z_{\alpha}^2}{d^2} \quad (7)$$

n: Örneklem büyüklüğü

p: Kategorinin gözlenme oranı

q=(1-p): X'in gözlenmeme oranı

α: Önem düzeyi

d: Örneklem hatası

Örneklem sayısının belirlenmesi esnasında ise ± 0.05 örnekleme hatası ve $\alpha = 0.05$ önlem düzeyi ile örneklem sayısı değişik p-q konfigürasyonlarında 245 ve 384 olarak bulunmuştur. Ayrıca, belirlenen en yüksek örneklem büyüklüğü (384), Sekaran [50]'de verilen anakütle-örneklem tablosuna göre 1.000.000 kişinin üzerinde bir anakütleyi temsil etmektedir. Bu sayı çalışmada örneklem boyutunda alt limit olarak kullanılmış olup, saha çalışması esnasında anket 1563 kişiye yöneltilmiş olup, örneklem boyutu olarak 594 kişiden yanıt alınmıştır (yanıtlama oranı: %38). Örnekleme yöntemi olarak ise sistematik örnekleme yöntemi uygulanmıştır. Yöntem kapsamında koltuk numarasına göre başlangıçtan itibaren sabit aralıktaki eleman örnekleme alınmıştır. Uygulamada sabit aralık 8 olarak alınmıştır. Bir adımda hesaplanan koltuk numarasındaki kişinin anketi yanıtlamayı kabul etmemesi, anketi doldurmaya haiz olmaması veya koltuğun boş olması durumlarında ise bir sonraki koltuğa odaklanılmıştır. Gün

ve mevsimsellik açısından homojenlik sağlamak amacı ile Ekim 2015, Aralık 2015, Şubat 2016, Nisan 2016 ve Temmuz 2016 aylarında ve bu aylarda birinci hafta pazartesi, çarşamba; ikinci hafta salı, cuma; üçüncü hafta perşembe, pazar; dördüncü hafta ise cumartesi günü olmak üzere 35 gün anket uygulanmıştır. Daha sonra, kategori oranları belirlenerek, yolcu özelliklerinin benzetim modeline tutarlı bir şekilde yansıtılması sağlanmıştır. Anket sonuçlarının makalede kullanılan kısmı ise Tablo 2'dedir.

Benzetim yapılacak senaryolar oluşturulurken, yolcu sayısı, α ile seviyelendirilmiş olup, aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$YS = \alpha \times TCAP \quad (8)$$

YS: Yolcu sayısı

α : Yolcu sayısı seviye katsayısı

TCAP:Geminin yolcu kapasitesi

Salonlar arası yolcu değişkenliği ise aşağıdaki şekilde formüle edilmiş olan yolcu değişkenliği katsayısı (β) ile ilişkilendirilmiştir.

$$\beta = \left| \frac{x_{alt-orta\ salon,iskele}}{tcap_{alt-orta\ salon,iskele}} - \frac{x_{alt-orta\ salon,sancak}}{tcap_{alt-orta\ salon,sancak}} \right| = \left| \frac{x_{üst\ salon,iskele}}{tcap_{üst\ salon,iskele}} - \frac{x_{üst\ salon,sancak}}{tcap_{üst\ salon,sancak}} \right| = \left| \frac{x_{alt\ salon,ön}}{tcap_{alt\ salon,ön}} - \frac{x_{alt\ salon,arka}}{tcap_{alt\ salon,arka}} \right| \quad (9)$$

Tablo 2. Anket Sonuçları

Faktör	Seviye/Seçenek	Oran	Faktör	Seviye/Seçenek	Oran
Yaş	≤17	0.04	Cinsiyet	Kadın	0.48
	18-25	0.22		Erkek	0.52
	26-35	0.235	Boy (cm.)	≤150	0.04
	36-45	0.23		151-160	0.135
	46-55	0.155		161-170	0.305
	56+	0.12		171-180	0.35
		181-190		0.15	
Ağırlık (kg.)	≤50	0.03	≥191	0.02	
	51-60	0.03			
	61-70	0.265			
	71-80	0.29			
	81-90	0.265			
	91-100	0.105			
	≥101	0.015			

X_i : i salonunda bulunan yolcu sayısı
 $tcap_i$: salonu yolcu kapasitesi

Yolcu sayısı ve yolcu değişkenliği seviyelerine karşılık gelen α değerler aralıkları Tablo 3'te belirtilmiştir.

geçerliliği IMO'nun MSC/Circ.1033 nolu kılavuzu esas alınarak sınınmıştır [46]. Bu kılavuzda tahliye süresi için kullanılan semboller aşağıdaki gibidir.

A: Farkındalık süresi

Tablo 3. Yolcu Sayısı ve Salonlar Arası Yolcu Değişkenliği Seviye Katsayısı Aralıkları

Yolcu Sayısı Seviyesi	α Değeri Aralığı	Yolcu Değişkenliği Seviyesi	β Değeri Aralığı
Düşük	[0,29; 0,30]	Düşük	[0,05; 0,10]
Orta	[0,59; 0,60]	Orta	[0,15; 0,20]
Yüksek	[0,89; 0,90]	Yüksek	[0,25; 0,30]

Yolcu rotalama yöntemlerinden En Yakın Mesafe Algoritması (EYMA) EK A'da belirtilen rotalama sistematığının birinci, ikinci ve üçüncü modüllerinden oluşmaktadır. Tahliye Noktaları Doluluk Oranı Dengeleme Algoritması (TNDODA) ise bu sistematığın dördüncü modülüdür. Benzetim yazılımının otonom yaptığı rotalama ise Maritime Exodus Rotalaması olarak ifade edilmiştir (MER). Ayrıca küçük boyutlu makine dairesi yangınlarında 6 nolu; büyük boyutlu makine dairesi yangınlarında ise 5 ve 6 nolu tahliye sistemleri kullanılamamaktadır. Yukarıdaki bilgiler ışığında ortaya 81 senaryo (3*3*3*3) ortaya çıkmış olup, ilgili faktörler ve seviyeleri/türleri Tablo 4'te mevcuttur.

T: Dolaşım süresi

E: Filika vb. binme süresi

L: Suya iniş süresi

γ : emniyet faktörü

δ : ters akış faktörü

t_r : Akış süresi

$t_{merdiven}$: Merdiven iniş/çıkış süresi

t_{kat} : Yerleşimde yolcu bulunan bir katı (en uzak noktadan kapı/merdivene kadar) dolaşım süresi

$t_{toplanma}$: Toplanma noktasına en yakın kapı veya merdivenden ulaşım süresi

N: İlgili koridor veya rotadaki yolcu sayısı

F_c : Yolcu akışı

F_s : Özgül yolcu akışı

W_c : Kapı/merdiven genişliği

Tablo 4. Benzetim Senaryo Faktörleri ve Seviyeleri

Yolcu Sayısı Seviyesi	Salonlar Arası Değişkenlik Seviyesi	Yangın Durumu	Rotalama Yöntemi
Düşük	Düşük	Yok	EYMA
Orta	Orta	Küçük	EYMA+TNDODA
Yüksek	Yüksek	Büyük	MER

Benzetim sonuçlarında homojenlik sağlamak amacı ile her senaryonun benzetimi 5 koşumda gerçekleştirilmiştir. Tahliye süreçlerinin ve yangın ortamlarının benzetiminde sırası ile Maritime Exodus V5.1 ve SMARTFIRE V4.3 yazılımları kullanılmış olup, tahliye sürecinde bulunan yolcuların fiziksel özellikleri için anket sonuçları dikkate alınmıştır. Benzetimin

$L_{merdiven}$: Merdiven uzunluğu

L_{kat} : Kat dolaşım mesafesi

$L_{toplanma}$: Toplanma noktasına en yakın kapı veya merdivenden ulaşım mesafesi

$V_{merdiven}$: Merdiven iniş/çıkış hızı

V_{kat} : Kat dolaşım hızı

$V_{toplanma}$: Toplanma noktasına en yakın kapı veya merdivenden ulaşım hızı

Yukarıda ifade edilen faktörler aşağıdaki

şekilde formüle edilmektedir.

$$\text{Tahliye süresi} = (A+T) + 2/3(E+L) \quad (10)$$

$$T = (\gamma + \delta) * (t_F + t_{\text{merdiven}} + t_{\text{kat}} + t_{\text{toplanma}}) \quad (11)$$

$$t_F = N / F_c \quad (12)$$

$$F_c = F_s * W_c \quad (13)$$

$$t_{\text{merdiven}} : L_{\text{merdiven}} / V_{\text{merdiven}}$$

$$t_{\text{kat}} : L_{\text{kat}} / V_{\text{kat}}$$

$$t_{\text{toplanma}} : L_{\text{toplanma}} / V_{\text{toplanma}}$$

Gündüz senaryosunda farkındalık süresi 300 saniye, güvenlik faktörü 2, ters akış faktörü ise 0,3 alınmaktadır. V_{merdiven} , V_{kat} , V_{toplanma} değerleri ise yolcu yoğunluklarına göre IMO kılavuzundaki [38] tablolardan bulunmaktadır. Osman Gazi-I feribotunda tahliye sistemleri olarak can salları aktif hale getirdiğinden formüldeki filika vb. binış (E) ve suya iniş süresi (L) süreleri dahil edilmemiştir. Tahliye süresi hesaplanırken, en uzun rota olarak, köprü güvertede bulunan yolcuların garaj giriş katta bulunan tahliye sistemlerinden tahliyesi için izledikleri rota dikkate alınmıştır. Yukarıdaki bilgiler dahilinde tahliye süresi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır: $t_F = [246/(1,28*1,8)] + [123/(1,275*1,8)] = 160,36$ saniye
 $t_{\text{merdiven}} = (3,4 / 0,55) * 3 \text{ merdiven} = 18,55$ saniye
 $t_{\text{kat}} = (13/0,69) + (18/0,87) = 39,53$ saniye
 $t_{\text{toplanma}} = 5/0,1 = 50$ saniye
Tahliye süresi = $300 + ((2+0,3)*(160,36 + 18,55 + 39,53 + 50)) = 917,41 \approx 917$ saniye

IMO formülasyonunda yangın ve batma etkisi dikkate alınmadığından, Osman Gazi-I feribotunun 1186 yolcu (tam kapasite) ile yangın ve batma durumları olmadan tahliye benzetimi yapılmış olup; ortaya çıkan sapma değerleri özellikle geliştirilen rotalama yöntemleri için (EYMA (%11,21); EYMA+TNDODA (%2,05)) oldukça makul seviyededir. Tahliye benzetiminin IMO formülasyonunda bulunmayan yolcu davranışı etkisi altında gerçekleştiği de göz önünde bulundurulduğunda, feribot ortamının ve tahliye sürecinin benzetim ortamında doğru ve geçerli bir şekilde modellendiği sonucuna varılmaktadır.

Metodoloji kapsamındaki istatistiksel analiz aşamasında ifade edilen değişkenler dikkate alınarak ANOVA yapılmıştır. İstatistiksel model IBM SPSS Statistics v22 programında kurulmuş olup, faktörlerin ana ve ikili etkileri incelenmiştir. Analiz 0,05 önem düzeyinde yapılmıştır. Öncelikle yapılan Shapiro Wilk W testi neticesinde bağımlı değişken değerlerinde normalitenin sağlandığı ifade edilebilir (test istatistiği=0,972, $p=0,075 > 0,05$). Levene's Test Of Equality of Error Variances sonuçlarına göre bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerdeki gruplara göre varyans eşitliği sağlanmıştır (tahliye süresi için $p=0,528 > 0,05$).

Tablo 5. Faktörlerin ve Faktörler Arası Etkileşimlerin Etkileri

Bağımsız Değişken ve Etkileşimleri	F	p	Kısmi Eta Kare
Yolcu Sayısı	1645,098	0,000	0,986
Salonlar Arası Değişkenlik	305,193	0,000	0,927
Rotalama Yöntemi	730,003	0,000	0,968
Makine Dairesi Yangını	712,068	0,000	0,967
Rotalama Yöntemi * Makine Dairesi Yangını	4,035	0,007	0,252
Salonlar Arası Değişkenlik * Makine Dairesi Yangını	1,366	0,260	0,102
Yolcu Sayısı * Makine Dairesi Yangını	403,742	0,000	0,971
Salonlar Arası Değişkenlik * Rotalama Yöntemi	0,204	0,935	0,017
Yolcu Sayısı * Rotalama Yöntemi	12,957	0,000	0,519
Yolcu Sayısı * Salonlar Arası Değişkenlik	5,474	0,001	0,313
R Kare= 0,994 (Ayarlanmış R Kare= 0,991)			

Tablo 5'e bakıldığında her bir bağımsız değişkenin tahliye süresi bağımlı değişken üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu görülmektedir ($p < 0,05$). Model tahliye süresindeki değişimin %94,4'ünü açıklamaktadır. Yolcu sayısı tahliye süresine en çok etki eden faktör olarak karşımıza çıkmıştır. Faktör etkileşimlerinin etkisine bakıldığında yolcu sayısının diğer bağımsız değişkenler ile olan ikili etkileşimleri tahliye süresi üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

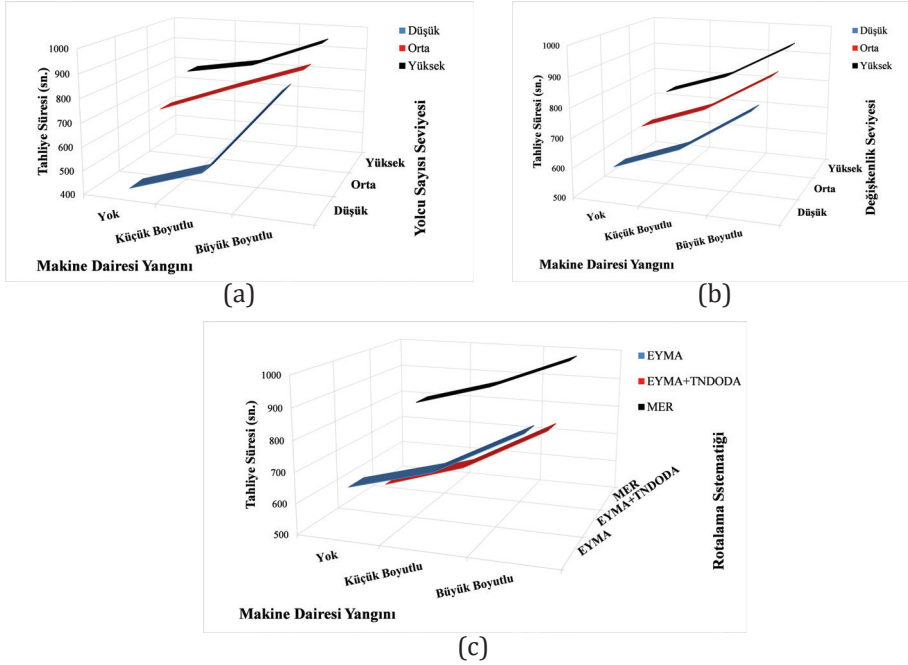
Bunun dışında rotalama ve yangın etkileşimi de yüksek etki derecesine sahiptir. Faktör grupları için ortalamalar ve ortalamalar arası ikili karşılaştırmalar ve farkların anlamlılık seviyeleri Tablo 6'da mevcuttur. Yolcu sayısının tüm seviyeleri arasındaki tahliye süresi farkı istatistiksel olarak anlamlıdır. Aynı durum, farklı rotalama yöntemleri, değişkenlik seviyeleri

ve yangın durumları için de geçerlidir.

Şekil 2, makine dairesi yangınları ile diğer faktörlerin etkileşimini görsel olarak sunmaktadır. Bu şekil, Tablo 2'de belirlenen senaryoların benzetimi neticesinde bulunan tahliye süreleri neticesinde ortaya çıkmıştır. Anket neticesinde belirlenmiş olan yolcuların fiziksel özelliklerinin (yaş, boy, kilo, cinsiyet) kategori oranları (Tablo 1) Maritime Exodus V5.1 ile kurulan benzetim modeline girilmiş olup, bu özelliklere bağlı olan yolcu hareket parametrelerinin tutarlı bir şekilde benzetime yansımaları sağlanmıştır. Şekil 2'deki yatay düzlemde eş zamanlı olarak incelenecek faktörler bulunmaktadır. Örneğin, Şekil 2(a) farklı makine dairesi yangın durumlarının değişik yolcu sayısı seviyelerindeki etkisini göstermektedir. Bu şekle göre, yolcu sayısı grupları arası farklar

Tablo 6. Faktör Grupları için Ortalamalar Arası İkili Karşılaştırmalar

Faktör: Yolcu Sayısı				
Seviye Ortalamaları	Seviye (I)	Seviye (J)	(I-J)	Anlamlılık (p)
Düşük: 601,432 Orta: 784,670 Yüksek: 922,438	Düşük	Orta	-183,238*	0,000
		Yüksek	-321,007*	0,000
	Orta	Yüksek	-137,769*	0,000
Faktör: Salonlar Arası Yolcu Değişkenliği				
Seviye Ortalamaları	Seviye (I)	Seviye (J)	(I-J)	Anlamlılık (p)
Düşük: 699,483 Orta: 770,870 Yüksek: 838,187	Düşük	Orta	-71,388*	0,000
		Yüksek	-138,705*	0,000
	Orta	Yüksek	-67,317*	0,000
Faktör: Rotalama Yöntemi				
Seviye Ortalamaları	Seviye (I)	Seviye (J)	(I-J)	Anlamlılık (p)
EYMA: 740,673 EYMA+TNDODA: 679,606 MER: 888,260	EYMA	EYMA+TNDODA	61,067*	0,000
		MER	-147,587*	0,000
	EYMA+TNDODA	MER	-208,654*	0,000
Faktör: Makine Dairesi Yangını				
Seviye Ortalamaları	Seviye (I)	Seviye (J)	(I-J)	Anlamlılık (p)
Yok: 673,532 Küçük: 751,808 Büyük: 883,199	Yok	Küçük	-78,276*	0,000
		Büyük	-209,667*	0,000
	Küçük	Büyük	-131,391*	0,000
(*) 0,05 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır.				



Şekil 2. Makine Dairesi Yangını Durumlarında Yolcu Sayısı (a), Değişkenlik (b) ve Rotalama Yöntemleri (c) Faktör Gruplarının Tahliye Süresi Değişimi

belirginleşmektedir. Ancak, bu husus sadece yüksek yolcu seviyesinde görülemediği. Bu sonucun, yangın esnasında oluşabilecek can kayıplarının yüksek yolcu sayısı seviyelerinde artabilmesi neticesinde ortaya çıktığı düşünülmektedir. Şekil 2(b)'ye bakıldığında, farklı makine dairesi yangın durumları, yolcu sayısı değişkenliği seviyeleri arası eğilimi değiştirmemiştir. Bu durum, makine dairesi yangını ile yolcu sayısı değişkenliği arasında bir anlamlı bir etkileşimin söz konusu olmadığını vurgulamaktadır. Şekil 2(c)'ye göre, en yüksek tahliye süreleri büyük boyutlu yangınlarda ve MER yolcu rotalaması ile gerçekleşmiştir. Ayrıca, yolcu rotalama faktöründe "Tahliye Noktaları Doluluk Oranı Dengeleme Algoritması"nın etkisi, farklı yangın durumlarında yakın farklar oluşturmuştur.

5. Tartışma

Bu makalede elde edilen sonuçlar ve yazarların tahliye sürecine katma değer

sağlayacağını düşündükleri hususlar aşağıda belirtilmiştir.

- Yolcu rotalama, ilgili literatürde tahliye faktörü olarak irdelenmiştir. Ancak, bu çalışmalarda yolcu rotalamasında sadece mesafe ölçütü dikkate alınmıştır [12, 13]. Bu nedenle, tahliye sistemlerinin kapasite doluluk oranı arasında denge sağlanmasının tahliye sürecini daha etkin hale getireceği düşüncesi ile yeni bir rotalama sistematigi geliştirilmiş ve "Tahliye Noktaları Doluluk Oranı Dengeleme Algoritması", en kısa mesafe odaklı rotalamaya göre tahliye süresi açısından %8,9 oranında kısalma sağlamıştır (Tablo 6).
- Yolcu salonlarındaki yolcu sayıları arasında oluşabilecek farklılık, acil durumlarda bu salonlara yakın tahliye sistemlerinde yoğunluk oluşturabilmektedir. Bu durum daha önce literatürde incelenmemiş olup, çalışma kapsamında salonlar arası

yolcu sayısı değişkenliği faktörü altında seviyelendirilmiş (Formül 9) ve benzetim senaryolarına yansıtılmıştır (Tablo 4). Uygulama neticesinde, Osman Gazi-I feribotu için yolcu sayısı değişkenliği tahliye süresi performansında %16,5'e varan farklılık oluşturmuştur (Tablo 6).

- Yangın durumlarında kullanılamayacak tahliye sistemlerinin konfigürasyonu acil durum senaryosuna göre değişkenlik arz etmektedir [7, 16]. Bu durum, daha önce literatürde sayısal olarak irdelenmemiş olup, tahliye performansında büyük farklılıklar oluşturduğu çalışma neticesinde ortaya çıkmıştır. 5 nolu tahliye sisteminin kullanılmadığı küçük boyutlu makine dairesi yangınında tahliye süresi %10,4 artmıştır. 5 ve 6 nolu tahliye sistemlerinin kullanılmadığı büyük makine dairesi yangını durumunda bu oran %23,7 olmuştur. Ancak halihazırda toplu deniz taşımacılığı tahliye yönetiminde sadece tüm tahliye sistemlerinin kullanılabilir olduğu durum göz önüne alınmaktadır. Yapılacak tatbikatlarda özellikle mürettebatın bu tip durumlara hazırlanması kritik başarı faktörüdür.
- IMO standartları, gemideki acil durumlarda mürettebat için çok pratik ancak değişik tahliye durumlarını dikkate almayan sabit talimatları kapsamaktadır [46, 47]. Acil tahliye, çok değişken senaryolarda gerçekleştirilecek zamana bağlı bir yarış durumudur ve yolcuların sorumlu mürettebat tarafından tahliye boyunca etkin yönlendirilmesi tahliye planının performansını artıracaktır. Özellikle tek kapısı bulunup diğer salonlara veya merdiven başına çıkan salonlarda karmaşaya meyilli bir ortam oluşturabileceğinden, acil durumlar için bu noktalarda yönlendirici mürettebat bulundurulmalıdır. Bu husus, Osman Gazi-I feribotunda, köprü güvertedeki tüm yolcuların, üst güverteye merdivenle inişi anında tahliye sistemi 5 ve 6'ya

dengeli bir şekilde dağılabilmeleri için de gözlemlenmiştir.

- Gemi yerleşimlerinin binalara kıyasla daha karmaşık yapıda olması ve gemilerde bulunan yolcuların gemi yerleşimi ile ilgili bilgi seviyesinin nispeten düşük olması sebebi ile [17], özellikle acil durumlarda fayda sağlaması açısından gemi yerleşimi ilgili görsellerden daha yoğun bir şekilde faydalanılması önem arz etmektedir.
- Yolcu-mürettebat takip sistemlerinin yolcu gemilerinde acil durum tahliyesi için kullanılabilirliği operasyonel ve ekonomik olarak olurludur [11]. Bu sistemler ile optimizasyon tekniklerinin bütünleştirilmesi, acil durum yolcu rotalamasında gerçek zamanlı bir ortam sağlayacaktır. Böylece, değişik yangın ve diğer acil durum koşullarında ve farklı yolcu yoğunluklarında klasik acil durum planları ve role cetvellerine göre daha etkin tahliye sonuçları alınabilecektir.

Yukarıdaki ifadeler incelendiğinde, projenin tahliye yönetimiyle ilgili yöneticilerin planlama ve kontrol yeteneğini geliştireceği düşünülmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, gemi tasarımı ve mürettebat sayısı ile ilgili mevzuatlar ile ilgili yürütülen faaliyetleri destekler niteliktedir.

6. Sonuç ve Öneriler

Toplu deniz taşımacılığında karşılaşılan kazaların neden olduğu önemli kayıplar ve yolcu sayılarındaki artış nedeniyle, yolcuların ve mürettebatın tahliyesi ile ilgili konular giderek artan bir ilgi görmüştür. Bu konuda uluslararası denizcilik sözleşmelerinde yeni gereklilikler tanımlanmaktadır. Gemi inşaatı ve işletimi esnasında tahliye faktörlerinin analizi konusunda farkındalık ve çıkarımlar sağlayacak olan istatistiksel yöntemler, deniz acil durum tahliye kazaları ve uygulamaları ile ilgili geçmiş deneyimleri ve verileri temel alan çok

basit ve uygulanabilir çözümler sunabilme potansiyeline sahiptir. Yukarıdaki ifadeler ışığında yapılan çalışmada; toplu deniz taşımacılığına yönelik benzetim ile modelleme esaslı kapsamlı bir metodoloji geliştirilmiştir. Uygulama aşamasında, olasılık ve maruziyet hususları dikkate alındığında en yüksek riskli yangın türü olan makine dairesi kaynaklı yangın durumlarında, hızlı feribotların tahliye operasyonu irdelenmiştir.

Geliştirilen medoloji kapsamında senaryoların benzetiminin ardından yapılan istatistiksel analiz (ANOVA) neticesinde, yolcu rotasının hem tahliye süresi üzerinde anlamlı etkisinin çıkması bu hususun kritikliğini gözler önüne sermektedir (Tablo 5). Öncelikle gemilerin tasarım aşamasında tahliye benzetimlerinin yapılması ve gemilerde eğitim ve talim uygulamaları ile tahliye etkinliğinin sınanması ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Önerilen yöntemin uygulanması ile elde edilecek neticeler, gemi üstünde gerçekleştirilen tahliye operasyonu senaryolarını da şekillendirebilir. Öte yandan, yolcu sayısının yanı sıra salonlar arası yolcu değişkenliğinin tahliye süresindeki etkisinin önemi belirlenmiştir (Tablo 5). Bu konuda gemilerdeki yolcu dağılımları ile ilgili bir kontrol sistemi geliştirmesi önerilmektedir. Bu nedenle toplu deniz taşımacılığı yapan şirketlerin biletleme sistemlerinde bu hususa özen göstermeleri anlamlı olacaktır. Ayrıca, gemilerdeki salonların yerleşime yolcu kapasitesi açısından dengeli dağılımı gemi inşası aşamasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir noktadır. Yukarıda belirtilen rotalama ve yolcu sayısı değişkenliği ile ilgili sonuçlar istatistiksel analizde faktör etkilerinin anlamlılık seviyelerinden çıkarılmıştır (Tablo 5).

Bir diğer yandan, makine dairesi yangınlarının değişik büyüklüklerinde senaryoların benzetimi neticesinde ortaya oldukça farklı tahliye performansları

ortaya çıkmıştır. Artan makine dairesi yangını büyüklüklerinde sıcaklık ve zehirli maddeler açısından maruziyetin ve kullanılmayan tahliye sistemi adedinin artışının neden olduğu düşünülen bu sonuç, yangın boyutları arası ikili farkların istatistiksel anlamlılığı ile ilgilidir (Tablo 6) ve çok boyutlu olarak Şekil 2 ile desteklenmiştir.

Makale konusu ile ilgili olarak gelecekte yapılabilecek çalışmalardan ilki değişik acil durum senaryolarında mürettebat sayısı ve konumu ile yolcu rotalarını içeren tahliye karar destek sistemidir. Ayrıca gelecek araştırmalarda tahliye süresinin yanında can kaybı sayısı da dikkate alınmalıdır. Son olarak, Ajan Temelli Benzetim yoluyla acil durumlarda yolcu davranışlarını ve eğilimleri dikkate alarak tahliye modellemesi gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 215M246 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

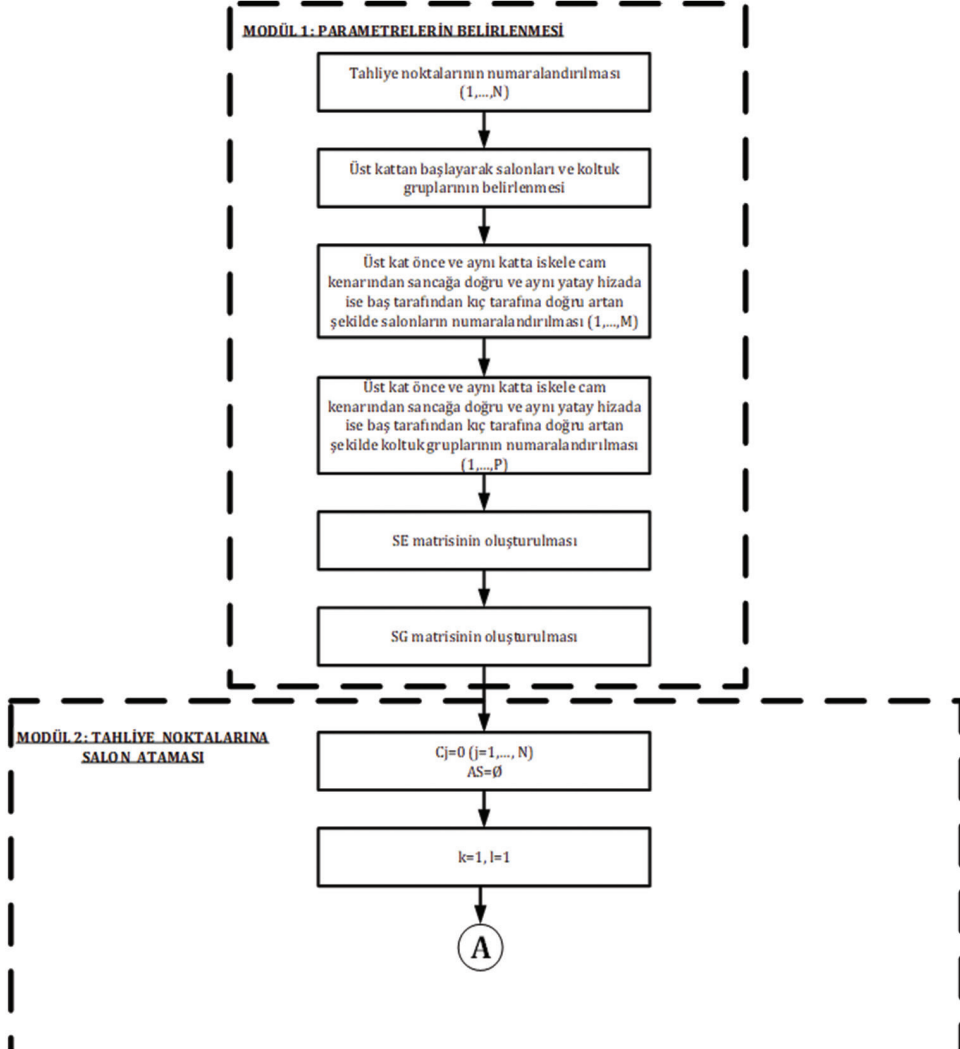
- [1] European Maritime Safety Agency. (2016). Annual overview of marine casualties and incidents 2016, <http://www.standard-club.com/media/2519681/annual-overview-of-marine-casualties-incident-2016.pdf>, Erişim Tarihi: 25/09/2017.
- [2] Bolat, F. (2016). Analysis of ship accidents in turkey from 2005 to 2015, International Journal of Engineering Research & Technology, 2016:5(12):478-481.
- [3] Kang, H. J., Choi, J., Lee, D. ve Park, B.J. (2017). A framework for using computational fire simulations in the early phases of ship design, Ocean Engineering, 2017:129:335-342.
- [4] Kim, S. W., Wall, A. ve Wang, J. (2006). Fire-risk modelling of machinery space: an application of approximate

- reasoning approach (Fuzzy Averaging Method) in passenger ship engine room, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2006:16(1):48-56.
- [5] Papadopoulos, Y. ve Petersen, U. (2003). Combining ship machinery system design and first principle safety analysis, 8th International Marine Design Conference, Atina, Yunanistan
- [6] Martins, M. R. ve Goyano, F. H. T. C. (2007). Preliminary hazard analysis of fire systems of tankers, Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Lizbon, Portekiz,
- [7] Su, S., Wang, L., Nie, Y. ve Gu, X. (2012). Numerical computation and characteristic analysis on the center shift of fire whirls in a ship engine room fire, *Safety Science*, 2012:50:12-18.
- [8] Akyuz, E. (2016). Quantitative human error assessment during abandon ship procedures in maritime transportation, *Ocean engineering*, 2016:120: 21-29.
- [9] Vanem, E. ve Skjong, R. (2006). Designing for safety in passenger ships utilizing advanced evacuation analyses-A risk based approach", *Safety Science*, 2006:44:111-135.
- [10] Lee, D., Kim, H., Park, J.-H. ve Park, B.-J. (2003). The current status and future issues in human evacuation from ships, *Safety Science*, 2003:41:861-876.
- [11] Vanem, E. ve Ellis, L. (2010). Evaluating the cost-effectiveness of a monitoring system for improved evacuation from passenger ships. *Safety Science*, 2010:48: 788-802.
- [12] Liu, C. ve Oiu, C. (2011). A Flow-Dependent Secondary-shortest Path Algorithm for Naval ship Evacuation, *Applied Mechanics and Materials*, 2011:66:1812-1816.
- [13] Chu, C. W., Lu, H. A. ve Pan, C. Z. (2013). Emergency Evacuation Route for the Passenger Ship, *Journal of Marine Science and Technology*, 2013:21(5):515-521.
- [14] Sarshar, P., Radianti, J., Granmo, O.C., ve Gonzalez, J. J. (2013). A Bayesian Network Model for Evacuation Time Analysis during a Ship Fire, *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Dynamic and Uncertain Environments (CIDUE)*, 16-19 Mart, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6595778>, Erişim Tarihi: 29/04/2015.
- [15] Deere, S. J., Galea, E. R. ve Lawrence, P. J. (2009). A systematic methodology to assess the impact of human factors in ship design", *Applied Mathematical Modelling*, 2009:33:867-883
- [16] Azzi, C., Pennycott, A., Mermiris, G. ve Vassalos, D. (2011). Evacuation Simulation Of Shipboard Fire Scenarios, *Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*, Baltimore, Maryland, Ağustos15-16, www.researchgate.net, Erişim Tarihi: 29/04/2016.
- [17] Wang, W. L., Liu S. B., Lo, S. M. ve Gao, L. J. (2014). Passenger Ship Evacuation Simulation and Validation by Experimental Data Sets, *Procedia Engineering*, 2014:71:427-432.
- [18] Lee, D., Park, J. H. ve Kim, H. (2004). A study on experiment of human behavior for evacuation simulation, *Ocean Engineering*, 2004:31:931-941.
- [19] Steinsholt, H. B. ve Aasen, D. (2013). Examining Ant Colony Optimization Performance for Ship Evacuation, *Universitetet I Agder, Yüksek Lisans Tezi*
- [20] Lozowicka, D. (2010). Problems of opposite flow of people during evacuation from passenger ships, *Scientific Journals Maritime University*

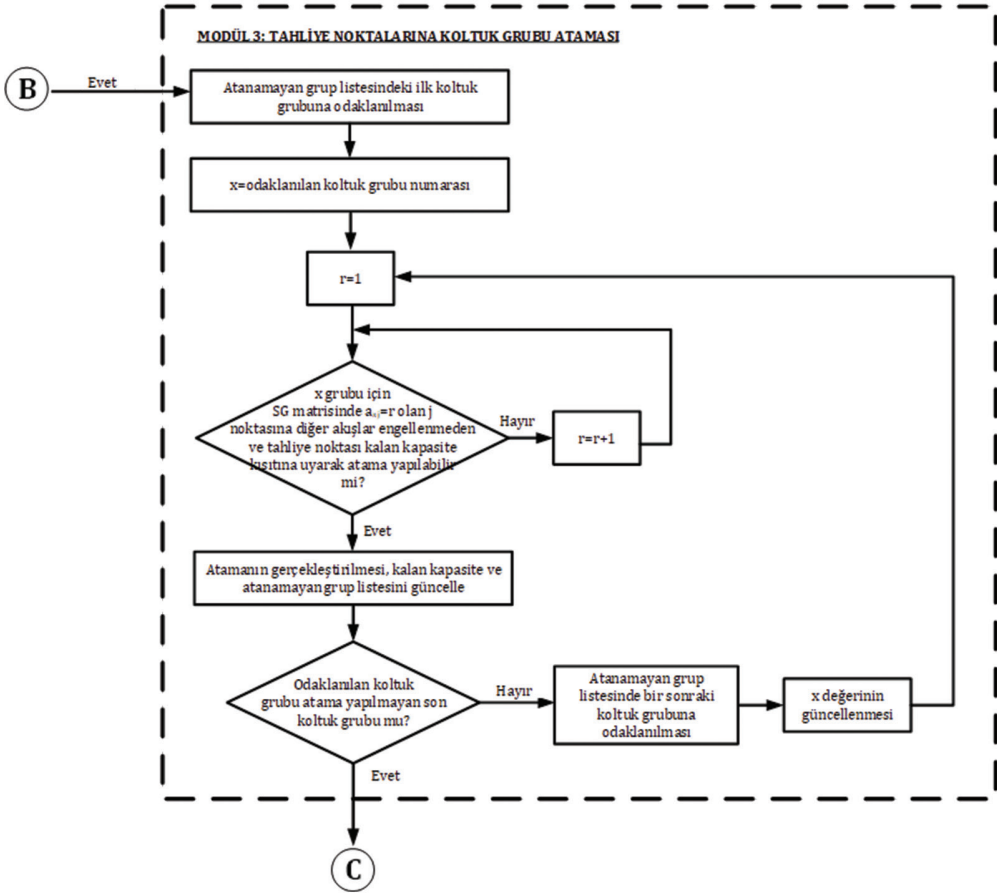
- of Szczecin, 2010:20(92):82-86.
- [21] Brown, R., Boone, J., Small, G., MacKinnon, S., Igloliorte, G. ve Carran, A. (2008). Understanding Passenger Ship Evacuation Through Full-Scale Human Performance Trials. ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Haziran 15-20, Estoril, Portekiz.
- [22] Klüpfel, H. (2008). Ship Evacuation–Guidelines, Simulation, Validation, and Acceptance Criteria, <http://www.traffgo-ht.com>, Erişim Tarihi: 22/04/2016.
- [23] Rutgersson, O. ve Tsyckova, E. (1999). Safety management of the mustering and evacuation of damage passenger ships-Mepdesign on the development of a tool box. Conference on Learning from Marine Incidents, Rina.
- [24] Galea, E. R. (2001). Predicting evacuation and circulation in planes, trains, buildings and ships using the EXODUS software. Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Duisburg, Almanya.
- [25] Glen, I. F. ve Galea, E. R. (2015). Ship Evacuation Simulation: Challenges and Solutions, http://media.bmt.org/bmt_media/resources/68/ShipEvacuationSimulationPaper.pdf, Erişim Tarihi: 30/04/2016.
- [26] AENEAS. (2015). <http://maritime-tools.dnvgl.com/en/gltools/aeneas.php>, Erişim Tarihi: 30/04/2015.
- [27] Meyer-König, T., Valanto, P. ve Povel, D. (2007). Implementing Ship Motion in AENEAS. Model Development and First Results, in Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer, Berlin Heidelberg, 2007:429-441.
- [28] Vassalos, D., Kim, H., Christiansen, G. ve Majumder, J. (2001). A real-time interactive mesoscopic model for passenger evacuation simulation in a virtual ship environment and performance-based evaluation. of Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Duisburg, Almanya.
- [29] Vassalos, D., Christiansen, G., Kim, H., Bole, M. ve Majumder, J. (2002). Evacuability of Passenger Ships at Sea, http://intellihull.com/downloads/SASMEX_2002.pdf, Erişim Tarihi: 30/04/2015.
- [30] Boulougouris, E. K. ve Papanikolaou, A. (2002). Modeling and Simulation of the Evacuation Process of Passenger Ships, <http://old.naval.ntua.gr>, Erişim Tarihi: 24/04/2016.
- [31] Park, J. H., Lee, D., Kim, H. ve Yang, Y. S. (2004). Development of evacuation model for human safety in maritime casualty, Ocean Engineering, 2004:31:1537-1547.
- [32] Kim, H., Park, J. H., Lee, D. ve Yang, Y. S. (2004). Establishing the methodologies for human evacuation simulation in marine accidents, Computers & Industrial Engineering, 2004:46:725-740.
- [33] Ginnis, A. I., Kostas, K. V., Politis, C. G. ve Kaklis, P. D. (2010). VELOS: A VR platform for ship-evacuation analysis, Computer-Aided Design, 2010:42:1045-1058.
- [34] Miyazaki, K., Katuhura, M., Matsukura, H. ve Hirata, K. (2004). Evacuation Simulation for Disabled People in Passenger Ship, Maritime Research Institute, Japan.
- [35] Pineiro, A. L., Arribas, F. P., Donoso, R. ve Torres, R. (2005). Simulation of Passengers Movement on Ship Emergencies. Tools For IMO Regulations Fulfilment, Journal of Maritime Research, 2005:2(1):105-125.
- [36] Ha, S., Ku, N. K., Roh, M. I. ve Lee, K. Y. (2012). Cell-based evacuation simulation considering human behavior in a passenger ship, Ocean

- Engineering, 2012:53:138-152.
- [37] Roh, M. I. ve Ha, S. (2013). Advanced ship evacuation analysis using a cell-based simulation model, *Computers in Industry*, 2013:64:80-89.
- [38] Asyalı E. ve Kızıkan, T. (2012) Türkiye Kıyılarında 2004-2008 Yıllarında Uluslararası Sefer Yapan Gemilerin Karıştığı Deniz Kazalarının Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi, 2012:4(2):27-45.
- [39] Ceyhun, G. C. (2014) The Impact of Shipping Accidents On Marine Environment: A Study Of Turkish Seas, *Europeana Scientific Journal*, 2014:10(23):10-23.
- [40] Bayar, N., Özüm, S. ve Yılmaz, H. (2008). Analysis of Accidents in Istanbul Strait, <http://web.deu.edu.tr/maritime/imla2008/Papers/43.pdf>, Erişim Tarihi: 15.09.2017.
- [41] Akten, N. (2004) Analysis of Shipping Casualties in the Bosphorus, *Journal of Navigation*, 2004:57(3):345-356.
- [42] Ulusçu, Ö.S., Özbaş, B., Altıok, T. ve Or, İ. (2009). Risk Analysis of the Vessel Traffic in the Strait of Istanbul, *Risk Analysis*, 2009:29(10):1454-1472.
- [43] Erol, S. ve Başar, E. (2015). The analysis of ship accident occurred in Turkish search and rescue area by using decision tree, *Maritime Policy and Management*, 2015:42(4):377-388.
- [44] Uğurlu, Ö., Erol, S. ve Başar, E. (2016) The analysis of life safety and economic loss in marine accidents occurring in the Turkish Strait, *Maritime Policy and Management*, 2016:43(3):356-370.
- [45] IMO.1999. "Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis on Ro-Ro Passenger Ships". MSC/Circ. 909.
- [46] International Maritime Organization (IMO). 2002. INTERIM Guidelines for Evacuation Analyses for New And Existing Passenger Ships, MSC/Circ.1033.
- [47] International Maritime Organization (IMO). 2007. Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships, IMO MSC/Circ. 1238.
- [48] IMO.2016. "Revised Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships". MSC.1/Circ. 1533
- [49] Transport Research Innovation Portal. (2015). <http://www.transport-research.info/web/index.cfm>, Erişim Tarihi: 28/05/2016.
- [50] Sekaran, U. (1992). *Research Methods for Business*, John Wiley & Sons, New York.
- [51] Yazıcıoğlu, Y. ve Erdoğan, S. (2004) SPSS Uygulamalı Bilimsel Araştırma Yöntemleri, Detay Yayıncılık, Ankara.

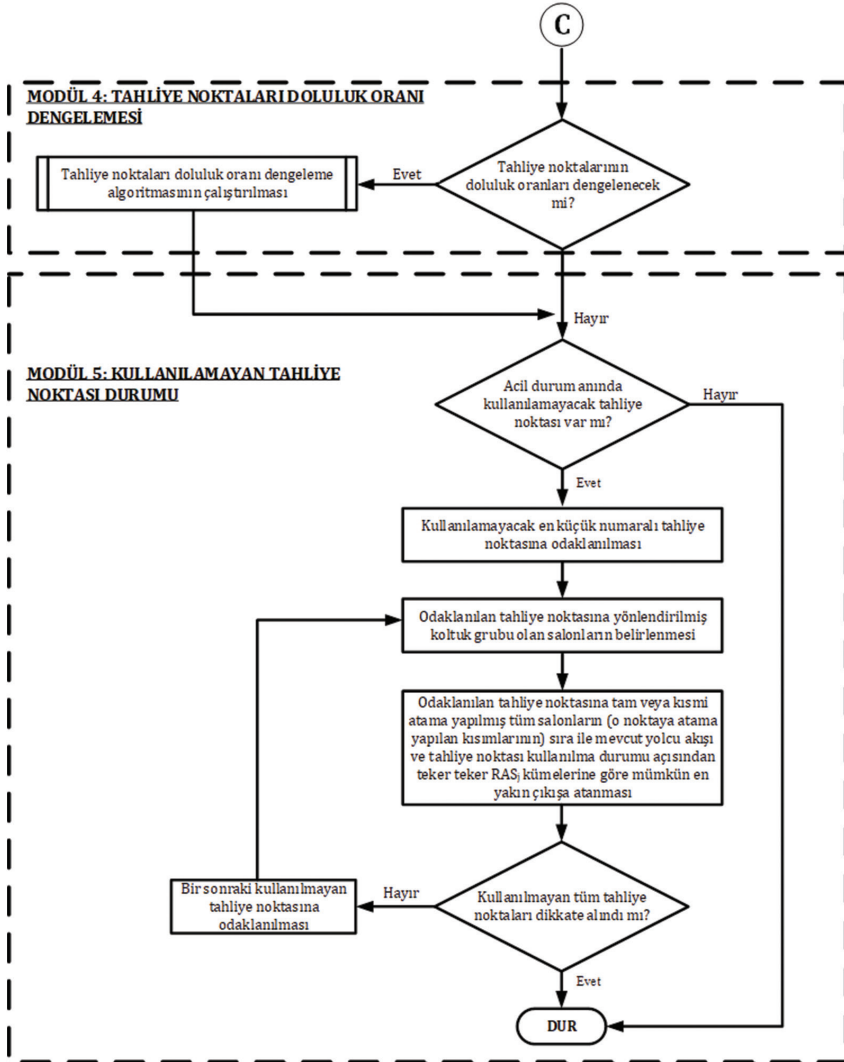
EK A. Geliştirilen Rotalama Sistematiği



Şekil A.1. Rotalama Sistematiği

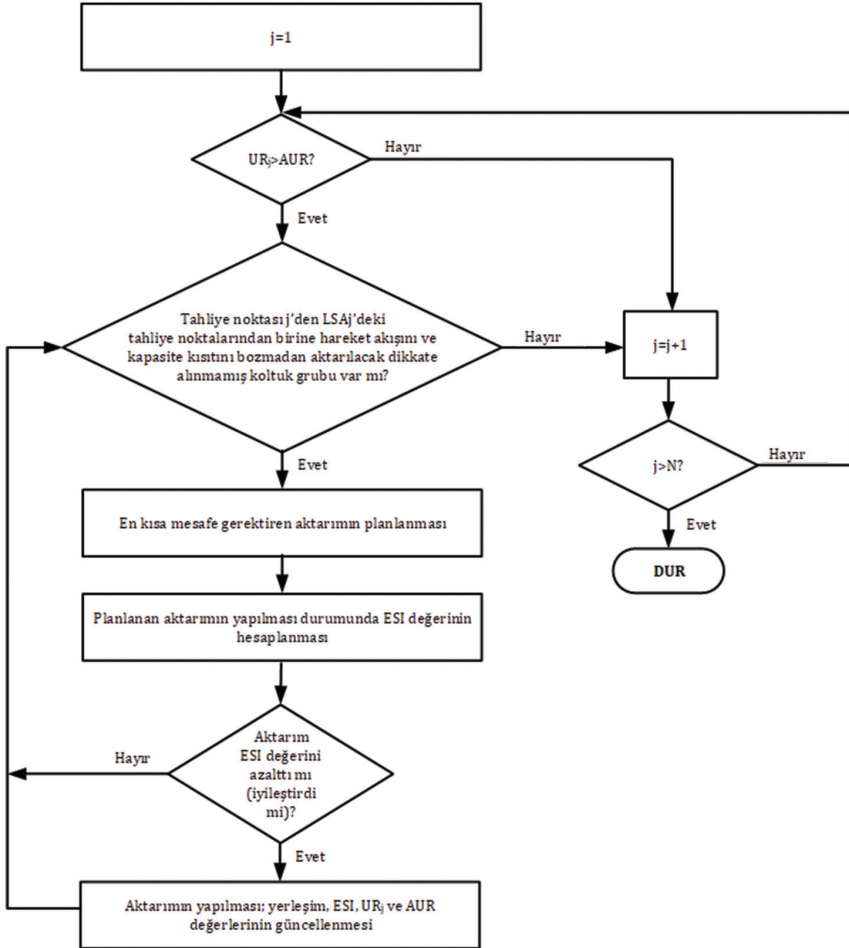


Şekil A.1. Rotalama Sistematiği (Devamı)



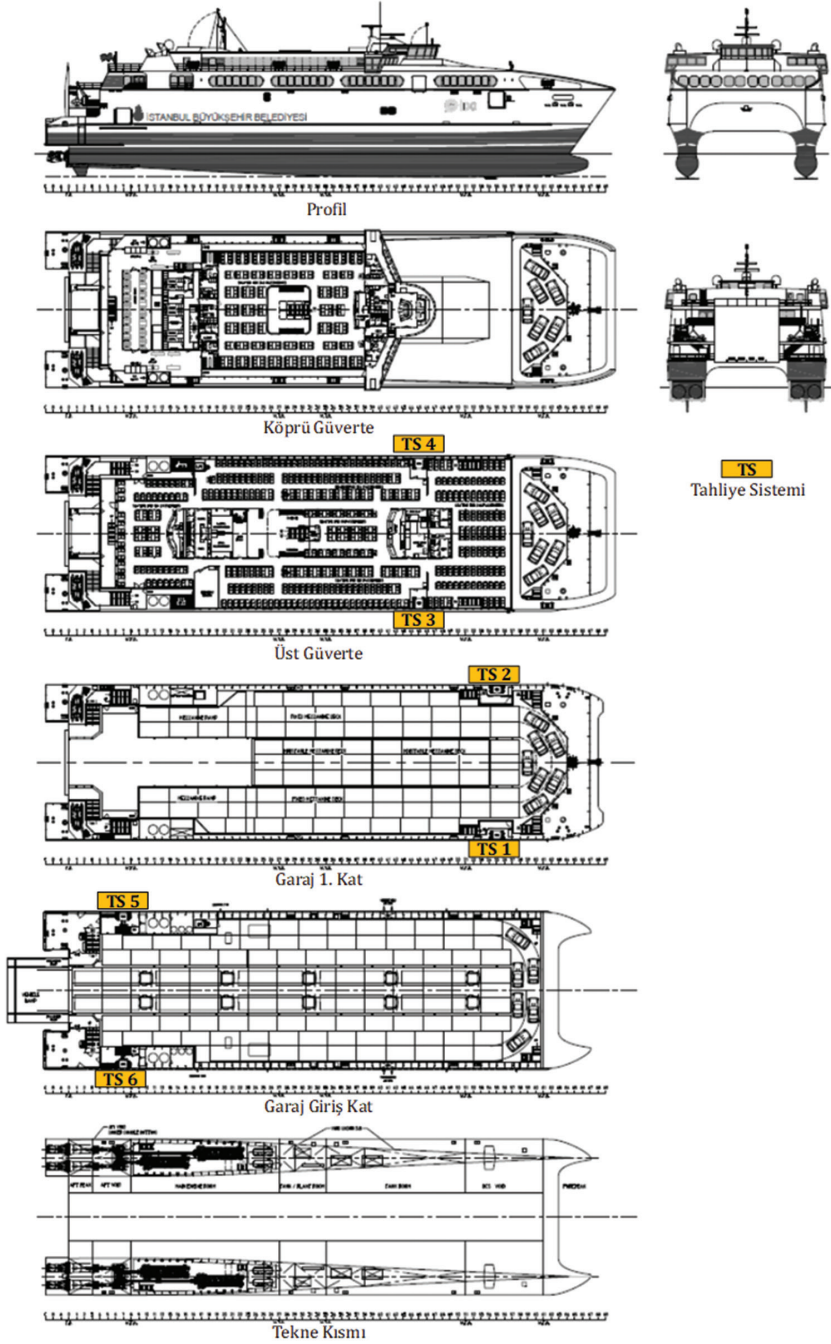
Şekil A.1. Rotalama Sistematigi (Devami)

EK B. Tahliye Noktaları Doluluk Oranı Dengeleme Algoritması



Şekil B1. Tahliye Noktaları Doluluk Oranı Dengeleme Algoritması

EK C. Osman Gazi-I Feribotu



Şekil C1. Osman Gazi-I Feribotu