

# Deprem Risk Yönetiminde Yazılım ve Deprem Mühendisliği Çalıştayı

26 Mayıs 2022

Bildiriler Kitabı

Editörler  
Selçuk Baş  
Seyhun Püskülcü  
Alper İlki  
Mehmet Akşit

**Deprem Risk  
Yönetiminde  
Yazılım  
ve Deprem  
Mühendisliği  
Çalıştayı**

*Bildiriler Kitabı*

**Workshop  
on Software and  
Earthquake  
Engineering in  
Seismic Risk  
Management**

*Proceedings Book*

**Editörler/Editors**

Selçuk Baş  
Seyhun Püskülcü  
Alper İlki  
Mehmet Akşit



**ISBN 978-975-561-549-3**

**© İTÜ Yayınevi, 2022.**

"Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları "İTÜ Yayınevi'ne" aittir. Bu kitabın tamamı ya da herhangi bir bölümü yayınevinin izni olmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, mikrofilme çekilemez, dolaylı dahi olsa kullanılamaz. TEKSİR, FOTOKOPİ veya başka teknikle çoğaltılamaz, bilgisayarda, dizgi makinalarında işlenebilecek bir ortama aktarılamaz. Kitapta yayınlanan tüm yazı ve görsellerin sorumluluğu yazar/yazarlara aittir."

**© ITU Press, 2022.**

All rights of this book are reserved and all publication rights belong to "ITU Press". All or any part of this book cannot be published, printed, filmed or used indirectly without the permission of the publisher. It cannot be reproduced by DUPLICATION, PHOTOCOPY or any other technique, and cannot be transferred to an environment that can be processed on computers or typesetting machines. The responsibility of all texts and visuals published in the book belongs to the author(s).

**İstanbul Teknik Üniversitesi yayınları. Yayın No. 2022.2KNF/7**  
**İstanbul Technical University publications. No. 2022.2KNF/7**



## **TÜRKİYE DEPREM VAKFI**

Türkiye Deprem Vakfı, deprem araştırmaları ve deprem zararlarının azaltılması konusunda faaliyet gösteren bir kurumdur.

Ülkemizde olası bir depremin zararlarını en aza indirebilmek amacıyla, deprem bilimi ve deprem mühendisliği alanında uzman kişilerin ve kuruluşların bir araya gelmesiyle 1993 yılında vakıf statüsünde kurulmuş bir organizasyondur.

Deprem ve depreme hazırlık konularında eğitim, mühendislik, danışmanlık hizmetlerinde bulunan bir kuruluştur.

Halen faaliyetlerini aşağıdaki amaçlarla sürdürmektedir.

- Ülke içindeki ve dışındaki ilgili bilimsel, özel ve kamu kuruluşları ile işbirliği yapmak,
- Deprem ve Deprem Mühendisliği bilgi ve mesleğinin gelişmesini, eğitiminin toplumda benimsenip yaygınlaşmasını sağlamak,
- Lisansüstü eğitim-öğretim gören öğrenciler ile bilimsel ve teknik araştırmalarda bulunan kişi ve kurumlara teknik yardımlarda bulunmak ve burslar vermek,
- Depreme dayanıklı bina tasarım ve uygulama hizmetlerinde, danışmanlık, gözetim ve denetim yapmak,
- Teknik elemanların yetenekleri hususunda belge ve sertifikalar vermek,
- Toplumda deprem afetine karşı bilinçlendirme eğitimleri vermek ve etkinlikler düzenlemek,
- İlgili tüm kuruluşlarla ve vatandaşlarla bütünleştirici ve yönlendirici niteliklerde işbirlikleri yapmak.



**TÜRKİYE  
DEPREM VAKFI**

İTÜ Maçka Kampüsü  
Sosyal Tesisler Binası  
34367 Teşvikiye / İstanbul  
0-530-569-4262  
<http://www.turkiyedeprimvakfi.org.tr>



**İSTANBUL TEKNİK  
ÜNİVERSİTESİ**

Ayazağa Kampüsü Rektörlük Binası, Maslak,  
34467 Sarıyer / İstanbul  
Tel: 0-212-285-3030  
<https://www.itu.edu.tr/>



**BARTIN  
ÜNİVERSİTESİ**

Bartın Üniversitesi Rektörlüğü 74100,  
Merkez / Bartın  
0 378 223 50 21  
<https://w3.bartın.edu.tr/>



**TOBB EKONOMİ VE  
TEKNOLOJİ  
ÜNİVERSİTESİ**

Söğütözü Caddesi No:43, 06560 Söğütözü,  
Ankara  
0-312-292-4000  
<https://www.etu.edu.tr/tr>

**TDV yayın No/TDV publicaiton. No. 22/01**

**Kapak tasarım / Cover page design:** Derya Çavunt, Yavuz Selim Çavunt

**Editörler/Editors:** Selçuk Baş, Seyhun Püskülcü, Alper İlki, Mehmet Akşit

## ÖNSÖZ

Deprem olgusu, ülkemiz için göz ardı edilemeyecek bir gerçekliktir. Son yıllarda yazılım, sistem mühendisliği ve yapay zekâ alanlarında gözlemlenen gelişmeler, deprem mühendisliği alanında yürütülen çalışmalarda da etkinliğini arttırmaktadır. Bu amaçla, ülkemizde deprem mühendisliği alanında yurtiçi/yurtdışı birçok bilimsel aktiviteye öncülük eden Türkiye Deprem Vakfı (TDV), deprem risklerinin yönetimi konusunda yazılım mühendisliği ve deprem mühendisliği alanlarında çalışan uzmanları bir araya getirmek amacıyla 26 Mayıs 2022 tarihinde, “Deprem Risk Yönetiminde Yazılım ve Deprem Mühendisliği (YDMÇ-2022)” çalıştayı çevrim içi olarak düzenlemiştir. Çalıştaya internet üzerinden 252 kişi kaydolmuştur. Bizim tespitlerimize göre, bu toplantı sözü geçen konuda dünyada düzenlenen ilk çalıştayıdır.

Bu kitap çalıştayda sunulan bildirilerin metinlerini içermektedir. Tümü davetli olan konuşmacılar tarafından kaleme alınmış olan yazıların ilkinde, Prof. Erdik ve Pınar tarafından hazırlanan ‘Deprem Erken Uyarı ve Acil Müdahale’ başlıklı birinci bildiri metni konu ile ilgili sistemleri özetlemektedir. İkinci olarak Dr. Koç, ‘Metropol Ölçekli Ulaşım Sistemlerinde Çok Disiplinli Dirençlilik Değerlendirmeleri’ başlıklı bildirisinde kentsel alanlarda ulaşım sistemleri için kapsamlı dirençlilik değerlendirme metodu CRAFT’ı tanıtmaktadır. Üçüncü sırada bulunan Prof. Akkar’ın yazdığı bildiri metninde katastrofik olaylar modelleme platformu CATMOD ile ilgili bilgi verilmektedir. ‘IoT Tabanlı Deprem Yönetim Sistemi’ başlıklı dördüncü bildiri metninde ise, Prof. Akşit, yazılım destekli deprem yönetim sistemini gerçekleştirmek için gerekli teknik konuları tespit etmekte ve bir mimari çözüm sunmaktadır. Prof. Akbaş ve Uçkan tarafından yazılan ‘Endüstriyel Tesislerde Yapısal Olmayan Elemanlar/Sistemlerden Kaynaklanan Risklerin Değerlendirilmesi İçin Yazılım Geliştirilmesi’ adlı beşinci bildiri metni, geliştirilmekte olan bir risk analiz yazılımını tanıtmaktadır. Altıncı sırada bulunan ve Dr. Çavdaroğlu, tarafından yazılan ‘Acil Müdahale Ekiplerinin Erişimi için Deprem Sonrası Enkaz Temizleme Faaliyetlerinin Planlanması’ adlı bildiri metninde konu ile ilgili algoritmik çözümler önerilmektedir. ‘Mevcut Binaların Deprem Riski Tespitinde İstanbul Büyükşehir Belediyesinin Yaklaşımı’ adlı yedinci bildiri metninde Aydoğdu ve arkadaşları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından bu amaçla geliştirilen ve uygulanan yöntem ve teknikler hakkında bilgi vermektedir. Dr. Adam ve Prof. Ekenel, ‘Bilgisayarlı Görü Destekli Çoklu-İHA Arama Kurtarma Sistemi’ adlı sekizinci bildiri metninde insansız hava aracı kurtarma yaklaşımı ile ilgili bilgi vermektedir. Son olarak Prof. İlki ve arkadaşları ‘Binalarda Deprem Sonrası Hasar Tahmini için PERA2019 Hızlı Değerlendirme Yöntemi ile Bütünleşik Bir İzleme Konsepti’ adlı bildiriye sunmuşlardır.

Yukarıda sözü edilen çalışmaları kısaca, ‘mevcut sistemleri tanıtıcı’ (1. bildiri), ‘analiz/modelleme tekniği ve yöntem öneren’ (2, 3, 5, 6, 7 ve 9. bildiriler) ve ‘sistem tasarımı sunan’ (4 ve 8. bildiriler) olmak üzere üç kategoriye ayırmak mümkündür. Bu çalıştaya katkılarından dolayı başta davetimiz üzerine bildiri metinlerini yazan ve sunan araştırmacılara, çalıştaya çevrim içi katılan dinleyicilere ve çalıştayı organizasyonunda görev alan Türkiye Deprem Vakfı sekreteri Çiğdem Çankaya’ya teşekkürü bir borç biliriz.

**Doç. Dr. Selçuk BAŞ**

**Prof. Dr. Alper İLKI**

**Seyhun PÜSKÜLCÜ**

**Prof. Dr. Mehmet AKŞİT**

## PREFACE

Earthquake is a reality that cannot be ignored for our country. In recent years, the developments observed in software, systems engineering, and artificial intelligence increase the effectiveness of studies carried out in the field of earthquake engineering. For this purpose, Turkish Earthquake Foundation (TDV), which has pioneered many domestic/foreign scientific activities in the field of earthquake engineering in our country, organized online workshop on “Software and Earthquake Engineering in Seismic Risk Management (SEEW)” on May 26, 2022 in order to bring together experts working in the fields of software and earthquake engineering in the management of seismic risks. 252 people registered online for the workshop. According to our findings, this meeting is the first workshop held in the world on the aforementioned subject.

This book contains the paper presented at the workshop. In the first of the papers written by the invited speakers, Prof. Erdik and Prof. Pinar summarized the related systems of the workshop’s subject with their paper entitled “Earthquake Early Warning and Rapid Response”. Secondly, Dr. Koc introduced the CRAFT framework, a comprehensive resilience assessment method for transportation systems in urban areas, in his paper titled as “Multi-disciplinary Resilience Assessment Framework for Metropolis-Scale Transport Systems”. In the third paper of the workshop, Prof. Akkar gives information about the catastrophic events modeling platform, CATMOD. In the fourth paper titled “A System Architecture for Iot-Based Earthquake Management”, Prof. Akşit identified the technical issues necessary to realize the software supported earthquake management system and recommends an architectural solution. The fifth paper presented by Prof. Akbas and Prof. Uckan with the title, “Software Development to Evaluate the Risks due to Non-Structural Elements/Systems in Industrial Facilities”, introduced software developing for analysis of seismic risk. In the sixth paper with the title of “Planning of Debris Clearance Operations Aftermath of a Disaster for the Accessibility of First Response Crews”, Dr. Cavdaroglu recommends some algorithmic solutions pertinent to the workshop’s subject. In the next paper titled “Approach of Istanbul Metropolitan Municipality on Seismic Risk Assessment of Existing Buildings”, Aydadogdu et al. gave information about the methods and techniques developed and applied by the Istanbul Metropolitan Municipality for this purpose. Dr. Adam and Prof. Ekinel provided information related to the unmanned aerial vehicle rescue approach in their paper titled “Computer-vision Aided Multi-UAV Search and Rescue System”. Finally, Prof. Ilki et al. presented the paper titled “An Integrated Monitoring Concept with PERA 2019 Rapid Performance Assessment Method for Post-Earthquake Damage Estimation in Buildings”.

The presented studies in the workshop can be briefly divided into three categories: (i) 'introduction to existing systems' (1<sup>st</sup> paper), 'recommendation of analysis/modeling techniques and methods' (2., 3., 5., 6., 7. and 9. papers) and 'presentation of system design' (4. and 8. paper). We would like to thank especially the invited researchers who wrote the papers and presented the studies, the attendees who participated in the workshop online, and the Secretary of Turkish Earthquake Foundation, Çiğdem Çankaya, for their contributions to this workshop.

**Assoc. Prof. Dr. Selçuk BAŞ**

**Prof. Dr. Alper İLKİ**

**Seyhun PÜSKÜLCÜ**

**Prof. Dr. Mehmet AKŞİT**

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>ÖNSÖZ</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                | iii   |
| <b>PREFACE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | iv    |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                          | v     |
| <b>Deprem Erken Uyarı ve Acil Müdahale</b><br><i>Earthquake Early Warning and Rapid Response</i><br><b>Mustafa Erdik, Ali Pınar</b>                                                                                                                                                                         | 1-4   |
| <b>Metropol Ölçekli Ulaşım Sistemlerinde Çok Disiplinli Dirençlilik</b><br><b>Değerlendirmeleri</b><br><i>Multi-Disciplinary Resilience Assessment Framework For Metropolis-Scale Transport Systems</i><br><b>Eyüphan Koç</b>                                                                               | 5-9   |
| <b>Türk Re Katastrofik Olaylar Modelleme Platformu (CATMOD) Turk</b><br><i>Reinsurance Inc. Catastrophic Event Modeling Platform (CATMOD)</i><br><b>Sinan Akkar</b>                                                                                                                                         | 10-13 |
| <b>IoT Tabanlı Deprem Yönetim Sistem Mimarisi</b><br><i>A System Architecture for Iot-Based Earthquake Management</i><br><b>Mehmet Akşit</b>                                                                                                                                                                | 14-17 |
| <b>Endüstriyel Tesislerde Yapısal Olmayan Elemanlar/Sistemlerden</b><br><b>Kaynaklanan Risklerin Değerlendirilmesi İçin Yazılım Geliştirilmesi</b><br><i>Software Development to Evaluate the Risks due to Non-Structural Elements/ Systems in Industrial Facilities</i><br><b>Bülent Akbaş, Eren Uçkan</b> | 18-21 |
| <b>Acil Müdahale Ekiplerinin Erişimi için Deprem Sonrası Enkaz Temizleme</b><br><b>Faaliyetlerinin Planlaması</b><br><i>Planning of Debris Clearance Operations Aftermath of a Disaster for the Accessibility of First Response Crews</i><br><b>Burak Çavdaroglu</b>                                        | 22-26 |
| <b>Mevcut Binaların Deprem Riski Tespitinde İstanbul Büyükşehir</b><br><b>Belediyesinin Yaklaşımı</b><br><i>Approach of Istanbul Metropolitan Municipality on Seismic Risk Assessment of Existing Buildings</i><br><b>Hasan Hüseyin Aydoğdu, Özlem Tut, Alper İlki</b>                                      | 27-32 |
| <b>Bilgisayarlı Görü Destekli Çoklu-İHA Arama-Kurtarma Sistemi</b><br><i>Computer-vision Aided Multi-UAV Search and Rescue System</i><br><b>Evşen Yanmaz Adam, Hazım Kemal Ekenel</b>                                                                                                                       | 33-37 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Binalarda Deprem Sonrası Hasar Tespiti İçin PERA2019 hızlı<br/>Değerlendirme Yöntemi ile Bütünleşik Bir İzleme Konsepti</b><br><i>An Integrated Monitoring Concept with PERA 2019 Rapid Performance<br/>Assessment Method for Post-Earthquake Damage Estimation in Buildings</i><br><b>Alper İlki, Cem Demir, Mustafa Cömert, Ömer Faruk Halıcı</b> | 38-43 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

---

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>YAZAR İNDEKSİ</b> | 44 |
|----------------------|----|

---

## DEPREM ERKEN UYARI VE ACİL MÜDAHALE

### EARTHQUAKE EARLY WARNING AND RAPID RESPONSE

Mustafa Erdik<sup>1</sup>, Ali Pınar<sup>2</sup>

#### ÖZET

*Deprem erken uyarı sistemlerinin, depremlerin cemiyyet ve iş dünyası üzerinde yaratacakları sosyal ve ekonomik etkilerin azaltılmasında yararlı olduğu bilinmektedir. Erakne uyarı zaman aralığı, birçok kritik işletmede, önceden planlanmış acil müdahale tedbirlerinin uygulanabilmesini sağlar. Önemli güncel Deprem Erken Uyarı ve Acil Müdahale sistemleri kısaca tanıtılmıştır.*

Keywords: Earthquake, Early Warning, Rapid Response

#### ABSTRACT

*Earthquake early warning systems have proven to be helpful tools to mitigate the social and economic impact on communities and businesses. Early warning time will facilitate and enable for pre-programmed emergency measures for various critical facilities. Recent important applications on Earthquake Early Warning and Rapid Response are briefly described.*

Anahtar Kelimeler: Deprem, Erken Uyarı, Acil Müdahale

#### GİRİŞ

Büyük bir depremin yeri, zamanı ve büyüklüğü önceden tahmin edilememesine karşın, söz konusu deprem başladığında kuvvetli yer hareketi sarsıntısının yerleşim merkezlerine varmadan deprem erken uyarı sistemleri gerekli uyarıları yapabilme potansiyeline sahiptir. Deprem zararlarının azaltılması çalışmalarında, can ve mal kaybını önlemek veya minimum düzeyde olması için Deprem Erken Uyarı (DEU) sistemleri etkin rol oynamaktadır. Hasar yaratabilecek düzeyde bir deprem oluşumunun kaynağa en yakın konumlarda belirlenerek ilgili kurumlara otomatik olarak iletilmesi ile yüksek gerilim hatlarındaki akımın kesilmesi, kritik kimyasal üretim yapan fabrika ve nükleer santral ve rafinerilerin tehlike yaratabilecek faaliyetlerinin durdurulması, metro ve banliyö trenleri gibi toplu taşıma araçlarının yavaşlatılması gibi çok önemli tedbirlerin alınması mümkün olmaktadır (Erdik vd, 2003; Behr vd, 2016). Hasar dağılımı tahminlerinin, acil yardım ve kurtarma ile görevli kurumlara anında iletilmesi ile deprem sonrasındaki Acil Müdahale ve ilk yardım faaliyetlerinin amaca uygun ve düzenli bir şekilde yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

DEU sinyalinin halka dağıtımı şimdilik sadece üç ülkede (Japonya, ABD ve Meksika) yapılmaktadır. Türkiye, Tayvan, Çin, Kore, Romanya gibi ülkelerde ise hedefe yönelik DEU sistemleri çalıştırılmaktadır.

Gerek UN-IDNDR-ISDR (Birleşmiş Milletler - Afet Zararlarının Azaltılması Uluslararası Stratejisi) örgütü görüşleri ve gerekse ABD’de yürütülmekte olan ANSS (Gelişmiş Ulusal Deprem Sistemi) projesi kapsamında kentsel bölgelerde acil müdahale amaçlı kuvvetli yer hareketi şebekeleri kurulması öncelikli bir husus olmaktadır.

Kullanılan DEU sistemlerine yönelik ABD, Japonya ve Türkiye örnekleri aşağıda sıralanmıştır.

---

<sup>1</sup> Profesör Emeritus, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, erdikm@boun.edu.tr

<sup>2</sup> Profesör, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, pinara@boun.edu.tr

## ÖRNEK UYGULAMALAR

## Amerika Birleşik Devletleri

Kalifornia Eyalet Valiliği yönetiminde, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS), Berkeley Üniversitesi, California Teknoloji Enstitüsü ve Oregon Üniversitesi tarafından geliştirilmiş olan DEU sistemi yeni nesil algoritmalara dayalı olarak lokal ve bölgesel DEU sistemlerinin entegre edilmesinden oluşmaktadır. Bu algoritmalarda, önce depremin yeri ve büyüklüğü depremi ilk kaydeden istasyon kullanılarak belirlenmekte ve depremin büyüklüğü hesaplanmaktadır. Deprem dalgasının diğer istasyonlara ulaşmasıyla, çözüm anlık olarak güncellenmekte ve depremin yeri ve büyüklüğü belirlenmektedir. Deprem dalgası ilk istasyonun civarındaki istasyonlarda yoksa DEU iptal edilmektedir.

Bölgesel deprem erken uyarı sistemlerinde, deprem şebekesi istasyonların sıklığı kritik rol oynamakta ve istasyon sayısı fazla olan bölgelerde DEU sinyali kısa sürede üretilmektedir. Örneğin, 2014 yılında Napa-Kaliforniya depreminin ( $M_w=6.0$ ) yeri ve büyüklüğü faydaki kırılmanın ilk başladığı andan itibaren 5 saniye içinde belirlenmiş ve ilgili yerlere DEU sinyali gönderilmiştir (Şekil 1). USGS-Berkeley Üniversitesi işbirliği ile yürütülen SHAKEALERT DEU sisteminin BART Metro Ağı tarafından kullanılması, uzun bir deneme sürecini takiben, 4 Nisan 2019 tarihinde resmen başlamış bulunmaktadır (Alen ve Melger, 2019).



Şekil 1. 2014 Napa depreminde ( $M_6$ ) sonrası DEU sinyali 5sn içinde (sol panel) BART Metro Ağına (orta panel) iletilmiştir. Kaliforniya’da bölgesel DEU uygulamalarında yoğun sismik ağı kullanılmaktadır (sağ panel).

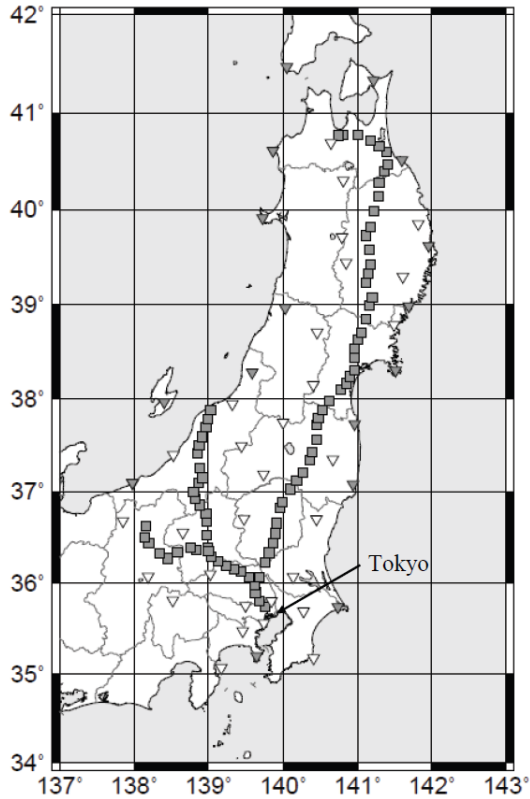
## Japonya

Dünyada en iyi performans gösteren DEU sistemlerinden biri 2007 yılında, Japonya Meteoroloji Ajansı (JMA) tarafından hizmete alınmıştır. DEU sinyalinin üretilmesinde istasyon aralıkları yaklaşık 20 km olan 4.000 adet deprem istasyonundan oluşan ulusal sismik ağı şebekesi kullanılmaktadır. DEU sinyali halka açık olup sarsıntı öncesi gerekli önlemlerin alınmasına yönelik erken uyarı sinyalinin iletimi yapılmaktadır. Bunun yanında, yüksek hızlı demiryolu ağı sistemi DEU uygulamalarından yaygın olarak faydalanmaktadır (Tajima ve Hayashida, 2018).

Yüksek Hızlı Tren (YHT) depreme maruz kalması durumunda oluşabilecek hasarın önlenmesi ve yolcuların can güvenliğinin sağlanması için tren hattı boyunca yer hareketi sürekli izlenmektedir. Yer hareketi belli bir eşik seviyesini aştığında trenin yavaşlatılması ve akabinde durdurulması süreçleri izlenmektedir. Bu uygulamada, hat boyunca belli aralıklarla (10-15km) yerleştirilen kuvvetli yer hareketi kayıtçıları kullanılmaktadır. Hat boyunca yerleştirilen sismik cihazlarla oluşturulan lokal sismik izleme şebekesi ulusal sismik ağı ile entegre edilmesi ile izleme sistemlerinin başarı oranı artmaktadır. Günümüzde benzer DEU sistemleri Japonya ve Kaliforniya dışında, Tayvan ve Çin’de de aktif olarak kullanılmaktadır.

DEU çalışmaları Japonya’da 1960’lı yıllarda başlamıştır. İlk yıllarda, tren hattı boyunca yerleştirilen sismik cihazlarda S-dalgası genliği izlenerek yer hareketi 0.04g değerini aşması durumunda DEU sinyali tren operatörlerine gönderilerek trenin yavaşlatılması ve durdurulması sağlanmıştır. Daha sonra, deprem kaynaklarının önemli bir kısmı Pasifik Okyanusunda bulunmasından dolayı sahil şeridi boyunca sismik algılayıcılar yerleştirilerek kuvvetli yer hareketi tren hattına ulaşmadan DEU

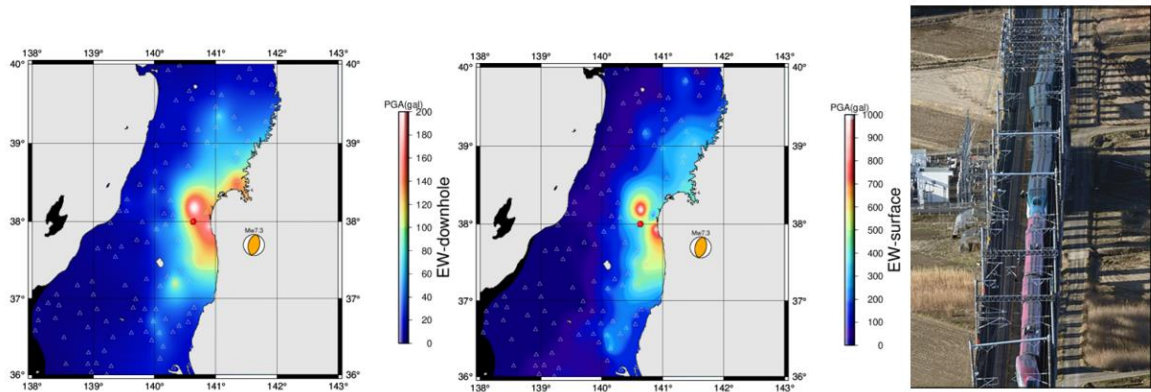
sinyali üretme imkanı sağlamıştır. Sahil şeridi boyunca yer hareketi 0.12g'lik eşik seviyesini aştığında uyarı verilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. YHT hatları ve sahil şeridi boyunca yerleştirilen DEU cihazları.

YHT'lerde günümüzde kullanılan sistem 1980'li yıllarda geliştirilmiştir. UrEDAS adı verilen sistem P-dalgası ilk 3-saniyelik zaman penceresini kullanarak depremin yerini, büyüklüğünü ve tren hattı boyunca oluşacak yer hareketini tahmin etmektedir. Kobe 1995 depreminden sonra DEU çalışmaları Japonya genelinde yaygınlaştırılarak 2007 yılından itibaren DEU sinyali halkın kullanımına da sunulmuştur. Japon Demiryolları (JR) deprem erken uyarı istasyonları hat boyunca 15km arayla yerleştirilmiştir. 2011 Tohoku depreminde (M9.1) JR-DEU sistemi deprem esnasında hareket halinde olan 27 YHT trenini kuvvetli yer hareketi tren hattına ulaşmadan durdurmayı başarmıştır. YHT trenlerinin durdurulmasında kullanılan 18cm/sn'lik sarsıntı şiddeti demiryolu hatlarına ulaşmadan 12-22 saniye önce DEU sinyali üretilmiş ve gerekli yerlere iletilmiştir (Yamamoto ve Tomori (2013)). Japonya'da kullanılan UrEDAS sisteminde DEU sinyali  $\tau_c - Pd$  ile üretilmektedir. Burada,  $\tau_c$ , ivme ve hız sismogramlarında P-dalgası ilk 3-saniyelik zaman penceresinden. Pd ise aynı pencerenin maksimum yer değiştirme genliğidir.

Japonya'da DEU sistemi sayesinde oluşabilecek büyük tren kazaları önlenmektedir. Buna en son örnek, 2011 Tohoku depremi kaynak bölgesinin doğusunda 16 Mart 2022 tarihinde, Fukushima açıklarında Mw7.3 büyüklüğünde olan deprem gösterilebilir. Depremde oluşan yer sarsıntı haritası KikNet deprem şebekesindeki ivme istasyonları verilerinden oluşturulmuştur (Şekil 3, sol ve orta panel). KikNet deprem şebekesinde istasyonların tamamında kuyiüçinde ve yüzeyde ivme kayıtçıları bulunmaktadır. Deprem esnasında Fukushima istasyonundan Shiroishi istasyonuna gitmekte olan YHT treni DEU sistemi tarafından durdurularak bir facianın önlenmiştir. Deprem esnasında trenin olduğu bölge yakınlarında 1g'yi aşan PGA değerleri ölçülmüştür (Şekil 3, orta panel).



Şekil 3. 16 Mart 2022, Fukushima açıklarında meydana gelen Mw7.3 depreminde oluşan şiddetli sarsıntı sonucu raydan çıkan JR-YHT treni. KikNet kuyu dibi sensorlarından elde edilen PGA haritası (sol panel), yüzey sensörlerden elde edilen PGA haritası (orta panel) ve raydan çıkan YHT treni (sağ panel).

## Türkiye

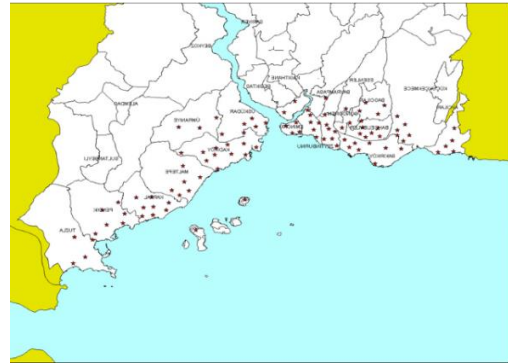
İstanbul ve Marmara bölgesi için kurulan Deprem Erken Uyarı ve Acil Müdahale Sistemi 2001 yılında devreye alınmış (Şekil-4) ve bunu izleyen yıllarda geliştirilerek günümüzde 110 adet kuvvetli ve zayıf yer hareketi istasyonundan oluşan bir sistem elde edilmiştir. Bu sistemde, iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır; a) Mühendislik yaklaşımı, b) Gerçek zamanlı sismoloji uygulamaları. Mühendislik uygulamalarında erken uyarı sisteminden elde edilen bilgiler/veriler gerçek zamanlı olarak ilgili kurumlara iletilmekte, yer hareketi belli bir eşik seviyesini aşması durumunda gerekli önlemler alınmaktadır.

Acil Müdahale sistemi kapsamında çerçevesinde İstanbul'un konumlara 100 adet kuvvetli yer hareketi istasyonu kurulmuştur (Şekil-5). Bu istasyonların olası bir depremle tetiklenmesinden sonra istasyonlardan GSM şebekesi ile elde edilen parametrik bilgiler değerlendirilerek deprem yer hareketinin dağılımı ve İstanbul bina envanteri, demografik yapı, kritik tesisler ve kritik ulaşım nodları bilgileri ve bu elemanların deprem hasar görülebilirlik ilişkileri kullanılarak depremin nerelerde ne kadar hasar yaptığı tahmin edilmekte ve ilgili makamlara bildirilmektedir.

İstanbul Deprem Erken Uyarı ve Acil Müdahale Sistemi tüm dünyada ilk kurulmuş sistemlerden bir olarak, büyük ilgi ve yankı bulmuş ve Avrupa'da örnek sistem olarak değerlendirilmiştir. Sistemle ilgili gelişmeler önemli uluslararası konferanslarda değerlendirilmiş ve çok sayıda bilimsel makalenin konusunu teşkil etmiştir. DASK tarafından temin edilmiş Bosphorus-1 ve -II afet bonolarının parametrik tetiklenme algoritması İstanbul Acil Müdahale şebekesinden elde edilen verilere dayalı olarak geliştirilmiştir.



Şekil-4 İstanbul Deprem Erken Uyarı Sistemi



Şekil-5. İstanbul Acil Müdahale Sistemi

İGRAS (İGDAŞ Risk Azaltım Sistemi), deprem anında kuvvetli yer hareketi kayıt şebekesinden gelen verilerle deprem tehlike haritalarını üreterek, bu tehlikenin İGDAŞ doğalgaz altyapısında meydana getireceği hasarı kısa bir sürede belirleyen ve risk azaltımı için gerekli tedbirlerin alınmasına olanak sağlayan, gerçek zamanlı bir acil müdahale sistemidir (Zülfikar v.d., 2016).

## KAYNAKLAR

- Allen RM, D. Melgar (2019) "Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs", Annu. Rev. Earth Planet. Sci., vol. 47, ss. 361–388.
- Erdik M, Y. Fahjan, O. Ozel, H. Alcik, A. Mert, M. Gul (2003), "Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System", Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 1, ss. 157–163.
- Behr Y vd. (2016) "The virtual seismologist in SeisComp3: a new implementation strategy for earthquake early warning algorithms", Seismological Research Letters, vol. 87, no. 2A, ss. 363-373.
- Tajima F, T. Hayashida (2018) "Earthquake early warning: what does "seconds before a strong hit" mean?", Progress in Earth and Planetary Science, vol. 5, no. 63.
- Yamamoto S, and Tomori M (2013). "Earthquake Early Warning System for Railways and its Performance". J. JSCE 1, 322–328. doi:10.2208/journalofjsce.1.1\_322
- Zulfikar, C., M.Erdik, E.Şafak, H. Bıykoğlu, Ç. Kariptas (2016), Istanbul Natural Gas Network Rapid Response And Risk Mitigation System, Bull Earthquake Eng., DOI 10.1007/s10518-016-9964-x

# METROPOL ÖLÇEKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ÇOK DİŞİPLİNLİ DİRENÇLİLİK DEĞERLENDİRMELERİ

## MULTI-DISCIPLINARY RESILIENCE ASSESSMENT FRAMEWORK FOR METROPOLIS-SCALE TRANSPORT SYSTEMS

Dr. Eyüphan Koç<sup>1</sup>

### ÖZET

21. yüzyılda afetler dünya genelinde 1,2 milyondan fazla can kaybına neden olurken, 2,5 trilyon ABD dolarını aşan doğrudan maliyetleri ise 3 milyardan fazla insanı etkilemiştir. Nüfusun ve ekonomik faaliyetlerin çoğunu barındıran kentler, sürdürülebilir bir şekilde büyümemenin yanı sıra, hızla büyürken dayanıklılık inşa edememekten kaynaklanan karmaşık dirençlilik sorunlarıyla karşı karşıya kalıyorlar. “Kent sistemi”nin bileşenleri arasında yer alan ulaşım ağları, kentlilerin yaşamlarını ve etkileşimlerini destekleyen en kritik altyapı sistemlerinden biridir. Yalnızca olağan koşullarda değil, afet sırasında ve sonrasında müdahale ve kurtarma faaliyetleri için gereklidirler. Bu makale, bu alandaki birçok eksikliği ve araştırma boşluklarını ele alarak, ulaşım kesintilerinin bütünsel analizlerinin yapılması için tasarlanmış CRAFT’i (Kentsel Alanlarda Ulaşım Sistemleri için Kapsamlı Dirençlilik Değerlendirme Metodu) tanıtmaktadır. Metot, gerçek sosyoekonomik verilere dayanan yüksek çözünürlüklü ve metropol ölçekli yolculuk talebi modeliyle yeni bir yapıya özel modelleme metodolojisini birleştirirken, sosyoekonomik etki analizlerinde (ör. hesaplanabilir genel denge analizleri) ihtiyaç duyulan girdileri de üretebiliyor. Veri yoğun, model tabanlı ve disiplinler arası nitelikleriyle CRAFT, önceki yaklaşımlarda genellikle ihmal edilen birçok ayrıntıyı analize dahil etmeyi amaçlar ve 3 düzeyde dirençlilik öngörülerini üretir: (1) sistem bileşeni düzeyi (ör. köprülere, tünellere verilen zararlar ve bileşenlerin dirençliliğine ilişkin bilgiler), (2) sistem düzeyi (ör., karayolu ağı kesintileri, kesintiler sırasında trafiğin yeniden yapılanması ve ağ düzeyinde işlevsellik) ve (3) bölgesel/ulusal ekonomik düzey (ör., bölgesel GSYİH üzerindeki etkiler, istihdam ve gelir dağılımı üzerindeki etkiler, ekonomik dirençlilik). Bu makalenin amacı, CRAFT’i tanıtmak ve uygulamasına dair detayları aktarmaktır.

Anahtar Kelimeler: Ulaşım Sistemleri, Kentlerde Dirençlilik, Ekonomik Etki Analizi, Kentsel Politika

### ABSTRACT

Disasters exert profound impacts on human societies. Direct costs of disasters have exceeded 2.5 trillion US dollars in the 21st century affecting more than 3 billion people and causing more than 1.2 million casualties around the globe. Stemming from the inability to grow sustainably, as well as to build resilience at the rate of urban growth, many cities are facing increasingly complex resilience challenges. Among the components of the urban system, infrastructure systems or lifelines are key facilitators that support the lives, interactions, and dynamics of urban dwellers. Lifelines or Critical Infrastructures (CIs) (transportation, water, power, telecommunications, etc.) are essential to the well-being of the society not only under business-as-usual conditions but also during times of disaster for the entire response and recovery timeline. This paper introduces CRAFT (Comprehensive Resilience Assessment Framework for Transportation Systems in Urban Areas), which is designed to achieve holistic analyses of transportation disruptions by addressing the many shortcomings and research gaps in this domain. The framework couples a novel structure-specific modeling methodology with a high-fidelity metropolis-scale travel demand model based on real socioeconomic data, and produces results, which, in turn, serve as input for a state-of-the-art socioeconomic impact analysis methodology that is based on computable general equilibrium (CGE) analysis. By the virtues of its data-intensive, model-based, and cross-disciplinary nature,

---

<sup>1</sup> Ph.D., Innovation in Integrated Informatics Laboratory (iLab), Viterbi School of Engineering, University of Southern California — Part Time Faculty at Bogazici University, Department of Civil Engineering.

*CRAFT aims to capture and incorporate many details that are usually neglected in traditional approaches, and generates resilience insights at 3 levels: (1) system component level (e.g., damages to bridges, tunnels and information on component recovery), (2) system level (e.g., road network disruptions, reconfiguration of traffic and network level functionality) and (3) regional economic level (e.g., impacts on regional GDP, employment, economic resilience).*

Keywords: Transportation Systems, Urban Resilience, Economic Impact Analysis, Urban Policy

## GİRİŞ VE LİTERATÜR

Kökünü ekolojik dirençliliğe dayanan kentsel dirençlilik, “bir kentsel sistemin – ve onu oluşturan tüm sosyo-ekolojik ve sosyo-teknik ağların zamansal ve mekânsal ölçeklerde – istenen işlevleri sürdürme veya kesintilerden hızla geri dönme, değişime uyum sağlayabilme, bu eksenlerde mevcut veya gelecekteki kapasiteyi sınırlayan sistemleri hızla dönüştürme kabiliyetleri” olarak tanımlanır (Meerow v.d., 2016). Bu tanımda kentsel sistem, yönetim ağları, materyal ve enerji akışları, kentsel mimari ve altyapı sistemleri, sosyo-ekonomik dinamikleri gibi bileşenleri ile karakterize edilir. Kent sisteminin bileşenleri arasında, altyapı sistemleri, kent sakinlerinin yaşamlarını ve etkileşimlerini destekleyen anahtar sistemlerdir. Kritik Altyapı Sistemleri’nin (ulaşım, su, elektrik, telekomünikasyon, vb.) çalışır durumda olması, toplumun refahı için yalnızca olağan zamanlarda değil, aynı zamanda afet sırasında ve sonrasında müdahale ve kurtarma faaliyetleri için gereklidir. Bu sistemlerin giderek birbirine bağımlı hale gelmesi, onları yaşanan kesintileri—zaman ve mekân boyutlarında—orantısız biçimde kötüleştiren domino etkilerine karşı savunmasız hale getirdi. Bu bağlamda, ulaşım sisteminin en önemli altyapılardan biri olduğu ileri sürülmektedir, çünkü ulaşımındaki kesintiler afet zamanlarında diğer kritik altyapılara ekstra yükler getirmektedir (Hopkins v.d., 1991) (örn. Acil durumlara müdahale için sevk edilen ekiplerin faaliyet alanlarına ulaşabilmesi için ulaşım sisteminin çalışır halde olması gerekliliği). Ulaşımında büyük kesintilere yol açan önemli olaylar konunun önemini vurgulamıştır: Sandy Kasırgası (2012), Irene Kasırgası (2011), Japonya’daki Tsunami (2011) ve ardından gelen nükleer erime, Çin’deki Sichuan Depremi (2008), Christchurch Depremi, Yeni Zelanda (2011), Minneapolis I-35W köprüsünün çökmesi (2007) ve Katrina Kasırgası (2005) (Faturechi ve Miller-Hooks, 2014). Bu gelişmeler, ulaşım kesintilerinin analizlerine olan akademik ilgiyi arttırmıştır. Buna rağmen, dirençliliği artırmak için geliştirilecek politikalara yön verebilen analitik araçların ve yaklaşımların eksikliği hissedilmektedir (Ganin v.d., 2017). Çoğu araştırma (1) afetten doğan hasarların analizleri, (2) bu hasarların sistem düzeyindeki karşılıkları ve (3) sistem düzeyindeki işlevsellik kayıplarının ekonomik etkileri gibi önemli konulara bütünsel yaklaşmadığından, sonuçları da şehir politikalarına yön verecek gerçeklikte olmamaktadır.

Bu makale, bu alandaki birçok eksikliği ve araştırma boşluklarını ele alarak ulaşım kesintilerinin bütünsel analizlerinin yapılması için tasarlanmış CRAFT’i (Kentsel Alanlarda Ulaşım Sistemleri için Kapsamlı Dirençlilik Değerlendirme Metodu) tanıtmaktadır (Koç v.d., 2020). Metot, gerçek sosyoekonomik verilere dayanan yüksek çözünürlüklü ve metropol ölçekli yolculuk talebi modeliyle yeni bir yapıya özel modelleme metodolojisini birleştirirken, sosyoekonomik etki analizlerinde (ör. hesaplanabilir genel denge analizleri) ihtiyaç duyulan girdileri de üretebilmektedir. Veri yoğun, model tabanlı ve disiplinler arası nitelikleriyle CRAFT, önceki yaklaşımlarda genellikle ihmal edilen birçok ayrıntıyı analizlere dahil etmeyi amaçlar ve 3 düzeyde dirençlilik öngörülerini üretir: (1) sistem bileşeni düzeyi (ör. köprülere, tünellere verilen zararlar ve bileşenlerin dirençliliğine ilişkin bilgiler), (2) sistem düzeyi (ör., karayolu ağı kesintileri, kesintiler sırasında trafiğin yeniden yapılanması ve ağ düzeyinde işlevsellik) ve (3) bölgesel/ulusal ekonomik düzey (ör., bölgesel GSYİH üzerindeki etkiler, istihdam ve gelir dağılımı üzerindeki etkiler, ekonomik dirençlilik).

Ulaştırma sistemlerinin kırılganlığına ve dirençliliğine ilişkin çalışmalar genellikle iki ana metodolojik kategoride gruplandırılır: topolojik (graf teorisi tabanlı) ve sistem tabanlı yaklaşımlar (Mattsson ve Jenelius, 2015). Topolojik yaklaşımlar geniş veri kaynaklarına ihtiyaç duymazlar; incelenen ulaşım altyapısını modellemede kullanılan ağ topolojisinin dışında neredeyse hiçbir veri veya modelleme çalışması gerektirmezler. Ancak, topolojik yaklaşımlardaki söz konusu pratiklik,

ulaşım ağlarının arz ve talep dengelerine dair ięęörülerden fedakârlık edilerek kazanılmakta ve sonuç olarak günümüzde gerçekleştirilen ulaşım sistemi analizlerinin önemli bir kısmı dışarıda bırakılmaktadır (Cascetta, 2009). Bu bakımdan, yazarlar önceki çalışmalarındaki sistem tabanlı yaklaşımlara yönelmiş ve afet riskinin yönetimine (gerçek sisteme dair sonuçlarla) katkı verebilecek araştırma metodları kurmaya çalışmıştır (Koc v.d., 2019). Tablo 1’de ulaşım sistemleri kesintilerinin sistem tabanlı analizlerine dair eksiklikler üç perspektiften özetlenmiştir.

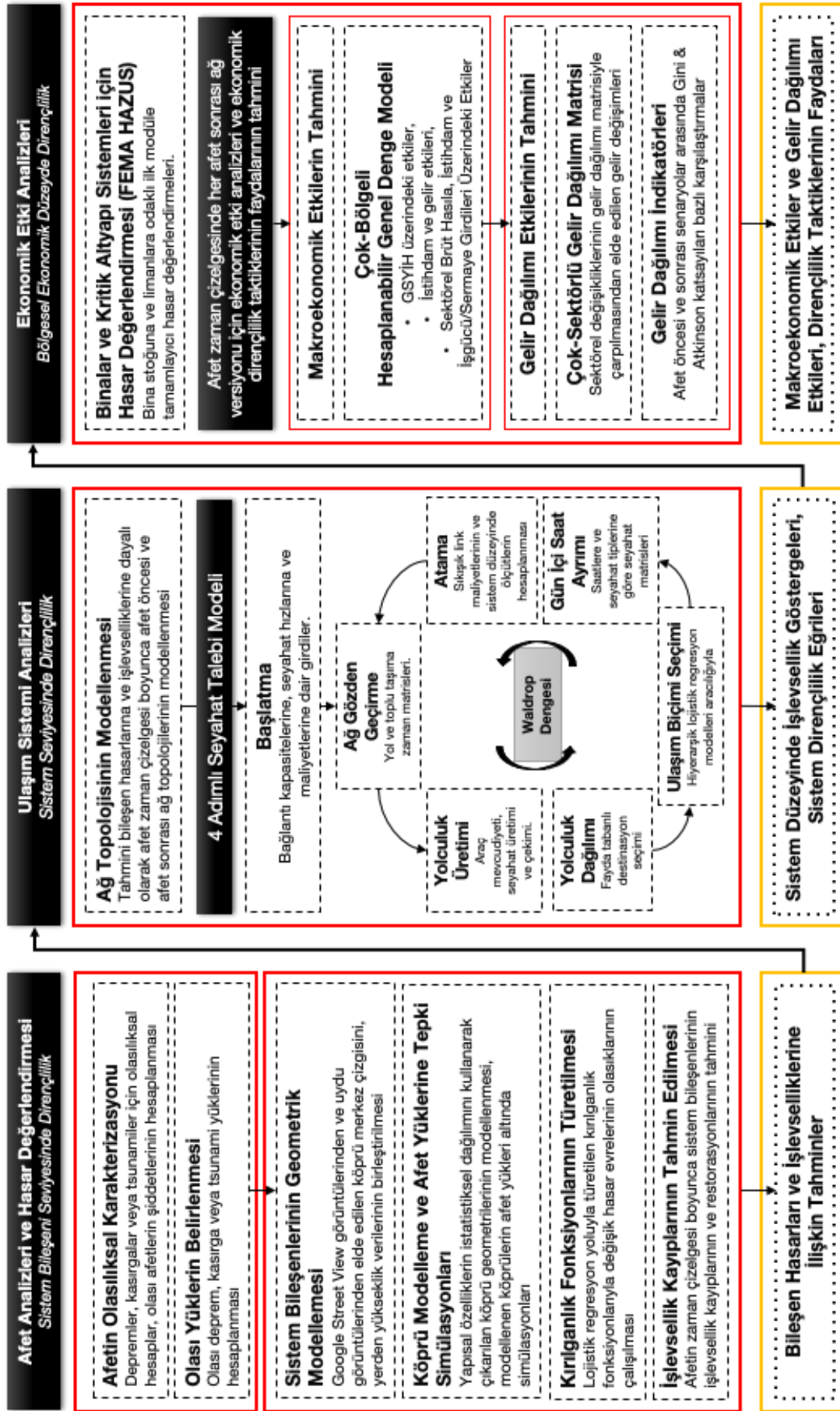
Tablo 1. Ulaşım sistemi kesintilerinin sistem tabanlı analizlerinde üç perspektiften eksiklikler.

| <b>Ulaşım Sistemlerinin Analizindeki Eksiklikler</b>                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Mevcut ulaşım altyapısını temsil eden, bütünsel ve ayrıntılı ağ modelleme eksikliği                                                                      |
| 2. Tekil bağ kesintisi ve/veya tek bir ulaşım modunda var olan çok sayıda alışma. Mekansal olarak dağıtılmış etkilerin ve çoklu modların yetersizliği      |
| 3. Afet sonrası seyahat davranışlarının belirsiz olarak ele alınması                                                                                        |
| 4. Ulaşımda eşitlik ve çevresel etkilere dikkat edilmemesi                                                                                                  |
| <b>Sismik Risk Karakterizasyonu ve Hasar Değerlendirmesindeki Eksiklikler</b>                                                                               |
| 1. Afetin detaylı analizlerinin ihmal edilmesi, hasarların sebeplerinin incelenmemesi.                                                                      |
| 2. Kırılganlık analizlerinde, ağırlıklı olarak sınırlı sayıda yapı tipi kullandığından, yapıya özgü ayrıntıların ihmal edilmesi                             |
| 3. Yerinde ölçümlerin eksik olması nedeniyle kesme dalgası hızı, sıvılaşmaya yatkınlık gibi sahaya özgü ayrıntıların hesaba katılmaması                     |
| <b>Ekonomik Etki Analizlerindeki Eksiklikler</b>                                                                                                            |
| 1. Sistem düzeyinde bir analiz yerine ağırlıklı olarak bireysel bileşenlere odaklanılması                                                                   |
| 2. Yaygın olarak kullanılan Girdi-ıktı modellerinin bilinen sınırlamaları ve bu modellerin lineer, sabit tepkili ve davranışsal içerikten yoksun olmaları. |
| 3. Hem etki değerlendirmelerinde hem de dayanıklılık araştırmalarında nadiren açık ağ modellemesini ve afet değerlendirmelerini kullanılması                |
| 4. Gelir grupları arasındaki eşitsizliklere veya ırksal/etnik azınlıklar üzerindeki etkilere dikkat edilmemesi                                              |

## **CRAFT: KENTSEL ALANLARDA ULAşım SİSTEMLERİ İÇİN KAPSAMLI DİRENİLİLİK DEğERLENDİRME METODU**

Yukarıda bahsedilen eksikliklerin giderilmesi için tasarlanan CRAFT metodolojisi Sekil 1 ile gösterilmiştir. CRAFT’in ulaşımda dirençlilik mühendisliği ve genel olarak toplumun afetle mücadelesine en büyük katkısı, sunulan çok disiplinli bakış açısının kendisidir. Geleneksel yaklaşımlar yerine CRAFT’in uygulanmasından elde edilen detaylı faydaları üç faktörle özetlemek mümkündür; (1) altyapı envanterinin gelişmiş modellemesini ve zemine özgü faktörlerin ele alınmasını sağlayan dair iyileştirmeler sayesinde gelişkin (yapıya özgü) kırılganlık analizlerinin yapılabilmesi; (2) detaylı ulaşım ağı ve sosyoekonomik verilerine dayanan ve (1) tarafından bilgilendirilmiş, yüksek çözünürlüklü ulaşım sistemi analizleri, metodun ulaşım kesintilerini bütünsel olarak çalışmasına izin vermesi; (3) ilk iki modülle beslenen gelişmiş ekonomik etki ve ekonomik dirençlilik analizleri, bunların gelir dağılımına ilişkin hususlarla detaylandırılması, bölgesel ekonomi üzerindeki etkileri, farklı gelir dilimleri üzerindeki etkileri ve dirençlilik taktiklerinin etkinliğini ölçen bütünsel bir bakış açısı sağlar. CRAFT Büyük Los Angeles Bölgesi’nde sismik riskin bölgedeki ulaşım sistemlerine ve ekonomiye olan etkilerinin incelenmesi için kullanılmıştır (Koc v.d., 2020). Burada elde edilen sonuçlarla daha detaylı ekonomik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir (Wei v.d., 2022a, Wei v.d., 2022b).

Bu araştırmanın kullanıcıları, köprüler ve yol ağları dahil olmak üzere ulaşım altyapısı için afet risk yönetimi ve varlık yönetimi süreçlerinde doğrudan yer alan profesyonellerdir. Uzun vadede, vizyon, daha sürdürülebilir ve dirençlilik sahibi ulaşım sistemleri tasarlamaya yardımcı olmak için akademik araştırmalardan elde edilen bilgilerin karar verici ve politika belirleyici kurumlara aktarımını sağlamaktır. Bahsedilen aktarımla araştırmanın toplum faydası için daha geniş etki yaratması yazarın nihai hedefidir.



Sekil 1. CRAFT'ın (Kentsel Alanlarda Ulaşım Sistemleri için Kapsamlı Dirençlilik Değerlendirme Metodu) kavramsal gösterimi.

## Teşekkür

UCLA Taciroglu Research Group, Southern California Association of Governments, Innovation in Integrated Informatics Laboratory—University of Southern California, U.S. National Science Foundation, California Department of Transportation, Dr. Dan Wei ve Dr. Adam Rose (CREATE Institute, & Price School of Public Policy, University of Southern California), Ahmet Oguz, MSc.

## KAYNAKLAR

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). “Defining urban resilience: A review,” *Landscape and urban planning*, 147, 38-49.

Hopkins, D. C., Lumsden, J. L., and Norton, J. A. (1991). “Wellington’s Lifelines in Earthquake Project: An Outline of a Major Review.” *Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, 774–804.

Ganin, A. A., Kitsak, M., Marchese, D., Keisler, J. M., Seager, T., and Linkov, I. (2017). “Resilience and efficiency in transportation networks.” *Science Advances*, 3(12), 1–9.

Koc, E., Cetiner, B., Rose, A., Soibelman, L., Taciroglu, E., and Wei, D. (2020). “CRAFT: Comprehensive Resilience Assessment Framework for Transportation Systems in Urban Areas.” *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, 46(July), 101159.

Koc, E., Cetiner, B., Soibelman, L., and Taciroglu, E. (2019). “System-based vulnerability and resilience assessment in mega-scale transportation systems: Towards data and model-driven methodologies.” *Computing in Civil Engineering 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 444–450.

Mattsson, L. G., and Jenelius, E. (2015). “Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16–34.

Cascetta, E. (2009). Transportation systems analysis: models and applications (Vol. 29). Springer Science & Business Media.

Faturechi, R., and Miller-Hooks, E. (2014). “Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review.” *Journal of Infrastructure Systems*, 21(1), 04014025.

Wei, D., Rose, A., Koc, E., Chen, Z., & Soibelman, L. (2022). “Socioeconomic impacts of resilience to seaport and highway transportation network disruption.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 106, 103236.

Wei, F., Koc, E., Li, N., Soibelman, L., & Wei, D. (2022). “A data-driven framework to evaluate the indirect economic impacts of transportation infrastructure disruptions.” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102946.

## **TÜRK REASÜRANS A.Ş. KATASTROFİK OLAYLAR MODELLEME PLATFORMU (CATMOD)**

### **TURK REINSURANCE INC. CATASTROPHIC EVENT MODELING PLATFORM (CATMOD)**

Sinan Akkar<sup>1</sup>

#### **ÖZET**

*Katastrofik doğa olayları sonucu sigortalanmış portföylerde oluşan mali hasar kaybının tahmini sigorta ve reasürans sektörünün finansal risk transferi ile ilgili aldığı kararların rasyonel bir temele dayanması için önemlidir. Türk Reasürans A.Ş. bu konuda Türkiye’de ilk kez sigortalı risklerin mali hasar kaybının hesabına yönelik ulusal ölçekte bir modelleme platformu (CATMOD) yazılımını geliştirmeye başlamıştır. CATMOD modelleme platformu, Türkiye’deki sigortalanmış portföyün mevcut özelliklerini yansıtabilmeye yönelik yapılandırılmaktadır. Bu bildiri, CATMOD deprem mali kayıp modelini oluşturan temel bileşenleri açıklamaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Deprem, Katastrofik olayların sigorta ve reasürans modellemesi, Deprem tehlikesi, Deprem Riski, Finansal kayıp, Yazılım geliştirme

#### **ABSTRACT**

*Assessment of insured portfolio losses triggered by the catastrophic events is important for insurance and reinsurance companies to make rational decisions on the financial risk transfer. Türk Reinsurance Inc. has initiated the development of a national modeling platform (CATMOD) to compute the insured portfolio losses. The platform is tailored to reflect the current features of insured portfolios in Turkey. This note explains the main components of earthquake loss modeling in CATMOD.*

**Keywords:** Earthquake, Insurance and reinsurance modeling of catastrophic events, Seismic hazard, Seismic Risk, Financial loss, Software development

#### **GİRİŞ**

Katastrofik doğa olaylarının sigortalı risklerde yol açtığı mali kayıp hesabı sigorta ve reasürans sektörü tarafından gerçekleştirilen finansal risk transferinin rasyonel temellere dayanması açısından önemlidir. Mali kayıp hesabı (a) katastrofik doğa olayının yıllık oluşma frekansını, (b) söz konusu olayın şiddetinin verilen bir eşik değeri aşma ihtimalini, (c) sigortalı riskte yaratacağı hasar ihtimalini ve (d) poliçe hükümleri tarafından belirlenen koruma limitlerinin aşılma ve dolayısıyla hasarın karşılanması ihtimallerini bir arada dikkate almalıdır. Bu bağlamda Türk Reasürans A.Ş. tarafından geliştirilmekte olan CATMOD katastrofik doğa olayları sonucu sigortalı portföy kayıplarını belirlemeye yönelik ve bir önceki cümlede belirtilen tüm bileşenleri dikkate alan olasılık teorisi tabanlı bir modelleme platformudur.

Bu kısa not CATMOD deprem mali kayıp modellemesinin temel bileşenleri ve işleyişi ile ilgili bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Veri Analitiği ve Modelleme Departmanı, Baş Modellemeci, Türk Reasürans A.Ş., İstanbul, sakkar@turkre.com

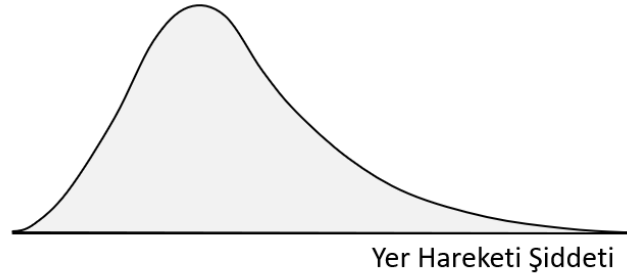
## CATMOD DEPREM MALİ KAYIP MODELLEMESİ

CATMOD deprem kayıp modellemesi üç ana bileşenden oluşur: (1) Fay ve alan kaynaklar için deprem tehlikesi modeli, (2) barınma, ticaret ve endüstri risk branşlarında faaliyet gösteren yapı ve ekipman tipi risklerin hasargörebilirlik modeli ve (3) trete ve ihtiyari portföy sigorta ve reasürans anlaşma limitlerini dikkate alan finansal model.

Söz konusu modelleme bileşenlerinde yapılan hesaplar olasılık teorisine dayanır. CATMOD modelleme platformunun temel amacı Türk Reasürans tarafından anlaşma hükümleri ile sorumluluğu alınan trete ve ihtiyari portföy mali kayıplarını hedef yıllık aşılma olasılıkları için hesaplamaktır.

### Deprem Tehlike Modeli

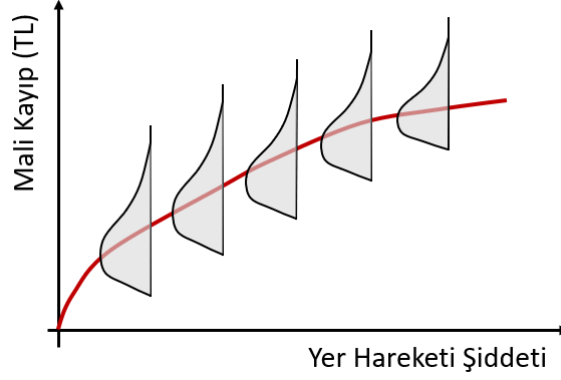
Trete veya ihtiyari portföye etki eden fay veya alan deprem kaynaklarında oluşması beklenen farklı büyüklüklerdeki depremleri ve bu depremler sonucu oluşan yer hareketi şiddetinin dağılımını portföyün bulunduğu bölge (konum) için hesaplar. CATMOD söz konusu dağılımların hesabını hem klasik deprem tehlikesi (Cornell, 1968), hem de Monte Carlo simülasyon tekniği kullanarak yapabilir. Verilen bir deprem kaynağında oluşması beklenen bir deprem büyüklüğü için portföyün bulunduğu noktada hesaplanan yer hareketi şiddeti dağılımı Şekil 1’de temsili olarak gösterilmiştir. Bu dağılım, ilgili konumda yer hareketi şiddetinin farklı seviyelerde meydana gelme ihtimalini verir. CATMOD deprem tehlike modeli Akkar vd. (2022) çalışmasında anlatılmaktadır.



Şekil 1. CATMOD tarafından üretilen bir deprem senaryosu sonucu sigortalı portföyün bulunduğu konumda gözlenmesi muhtemel yer hareketi şiddetinin (örnek: en büyük yer ivmesi, PGA) dağılımı

### Hasargörebilirlik Modeli

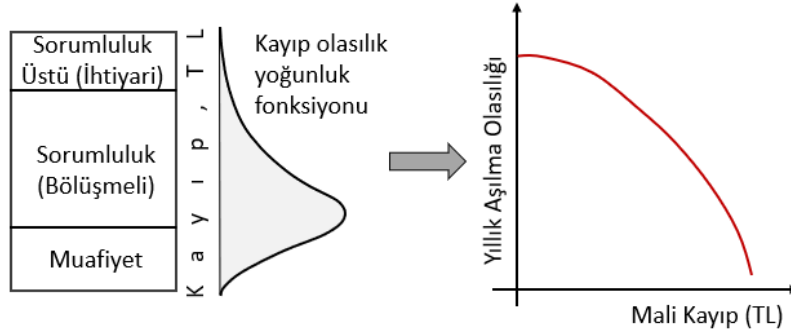
Trete ve ihtiyari portföy riskleri için yer hareketi şiddetine bağlı hasargörebilirlik modelleri Türkiye’deki mevcut portföy yapısına uygun bir şekilde geliştirilmiştir. Hasargörebilirlik modelleri sigortalanmış muhteviyat ve yapılar için ayrı ayrı modellenirken muhteviyat hasargörebilirlik modellerinde yapısal hasar dikkate alınmıştır (Akkar ve Yazgan, 2022). Sigortalı portföylerin veri bilgisi bakımından çözünürlük seviyeleri modellerde dikkate alınmıştır. Portföy bilgisi anlamında az detaya sahip (çözünürlük seviyesi düşük) portföylerde bilgi eksikliğinden kaynaklı olarak modelin hasar tahminindeki belirsizliği artırılmıştır. Sigortalı risklerin muhteviyat ve yapı kompozisyonları her bir risk branşı ve faaliyet kolu için ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Bina tipi yapıların hasargörebilirlik modelleri Türkiye’deki inşaat ve tasarım uygulamalarını, yapım yıllarını ve kat adetlerini dikkate alarak geliştirilmiştir. Şekil 2, hasargörebilirlik modeline örnek teşkil edecek temsili bir hasargörebilirlik modeli göstermektedir.



Şekil 2. Türk Reasürans hasargörebilirlik veri bankasına örnek teşkil eden temsili bir hasargörebilirlik modeli

### Finans Modeli

Finans modeli, tekil veya portföy risklerin toplam mali kayıp hesabını farklı sigorta anlaşmalarında belirtilmiş ödeme koşullarını (örneğin, bölüşmeli veya bölüşmesiz) muafiyet ve limit bedellerini dikkate alarak hesaplamaya yönelik tasarlanmıştır. Finansal model konvolüsyon (Wesson vd., 2009) ve Monte Carlo simülasyon tekniklerini alternatif olarak kullanabilecek şekilde geliştirilmiştir (Akkar vd., 2022; Yazgan vd., 2022). Finans modeli, trete ve ihtiyari portföyler için seçilen (hedef) yıllık aşılma olasılıklarına tekabül eden mali kayıp değerlerini nihai ürün olarak hesaplar. Şekil 3 bu modelin çıktısı olan temsili nihai ürünü (mali kayıp eğrisi) göstermektedir.



Şekil 3. Poliçeli bir risk için CATMOD finansal modeli ve nihai mali kayıp eğrisi (sağ taraf)

### SONUÇ

Türk Reasürans A.Ş. Türkiye’de ilk kez katastrofik doğa olaylarının sigortalı risklerde yol açtığı mali kaybı hesaplamaya yönelik bir modelleme platformu (CATMOD) geliştirmeye başlamıştır. Bu kısa not CATMOD deprem kayıp modelinin ana bileşenlerini tanıtmaktadır.

### Teşekkür

Yazar, CATMOD platformunu geliştirilmesi esnasında değerli katkılarda bulunan Doç. Dr. Ufuk Yazgan ve Doç. Dr. Özkan Kale ile Türk Reasürans A.Ş. uzman yardımcıları Onur Ülkü ve Ali Talha Atıcı’ye teşekkür eder.

## **KAYNAKLAR**

- Akkar S, Kale Ö, Atici TA, Ülkü O (2022) “A Brief on the Earthquake Hazard Module of Turkre Insurance Inc.’s Catastrophic Event Modelling Platform for Portfolio Losses: Comparisons with OpenQuake”, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Bucharest, Romania
- Akkar S, Yazgan U, Ülkü O (2022) “Earthquake Loss Models in Turk Reinsurance Inc.’s Catastrophic Event Modeling Platform for Portfolio Losses”, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Bucharest, Romania
- Akkar S, Yazgan U (2022) “Structural Damage Sensitive Content Vulnerability Modeling for Turk Reinsurance Earthquake Loss Modeling Platform”, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering*, Salt Lake City, Utah, 27 June-1 July, Paper ID No. 10474
- Cornell CA (1968). “Engineering Seismic Risk Analysis”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Wesson RL, Perkins DM, Luco N, and Karaca E. (2022). “Direct Calculation of the Probability Distribution for Earthquake Losses to a Portfolio”, *Earthquake Spectra*, 25, 687-706.
- Yazgan U, Akkar S, Ülkü O (2022) “Estimating Aggregate Earthquake Losses to Insurance Portfolios Using Convolution Approach”, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering*, Salt Lake City, Utah, 27 June-1 July, Paper ID No. 10476

## **IOT TABANLI DEPREM YÖNETİM SİSTEM MİMARİSİ**

### **A SYSTEM ARCHITECTURE FOR IOT-BASED EARTHQUAKE MANAGEMENT**

Mehmet Akşit<sup>1</sup>

#### **ÖZET**

*Mevcut deprem yönetim prosedürleri önemli ölçüde manuel yöntemlere dayanmaktadır. Manuel yöntemler, büyük ölçekte bir deprem sonrasındaki durumu yönetmek ve zararları en aza indirmek konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu makale, yazılım destekli deprem yönetin sistemini gerçekleştirmek için gerekli teknik konuları tespit etmekte ve bir mimari çözüm sunmaktadır. Bizim tespitlerimize göre, 'baştan sona' IoT tabanlı deprem yönetim sistemini öneren özgün bir çalışma henüz literatürde yeterli derecede yerini bulmamıştır.*

Anahtar Kelimeler: Deprem yönetimi, IoT tabanlı sistem mimarisi

#### **ABSTRACT**

*Current earthquake management procedures rely heavily on manual methods. These methods fall short of managing the aftermath of a large-scale earthquake and minimizing damages. This article identifies the technical issues required to implement a software-assisted earthquake management system and offers an architectural solution. To the best of our knowledge, an original study proposing an 'end-to-end' IoT-based earthquake management system has not yet found its place in the literature sufficiently.*

Keywords: Earthquake management, IoT based system architecture

#### **GİRİŞ**

Bu makale, 'deprem afetlerinin olası zararlarını, yazılım teknolojilerine dayalı yönetim sistemleri kullanarak nasıl en aza indirgeyebiliriz' sorusuna yanıt aramaktadır. Mevcut deprem yönetim prosedürleri önemli ölçüde manuel yöntemlere dayanmaktadır. Manuel yöntemler, büyük ölçekte bir deprem sonrası zararların tespitini, canlıların yıkıntıların altındaki konumunu, afet ile mücadelede gerekli kolluk kuvvetlerinin optimal bir şekilde tayinini ve afet yönetiminin takibini hemen hemen imkânsız bir hale getirmektedir. Bu bağlamda tasarlanan mevcut yazılım sistemleri genelde sınırlı olup 'baştan sona' gerekli desteği sağlayamamaktadır. Deprem esnasında oluşacak kaotik bir ortamın zaten istenilen etkinlikte olamayan manuel yönetimi daha da kötüleştirebileceği beklenen bir durumdur.

Yazılım sistemleri teknolojik gelişmeler ile orantılı olarak günlük yaşantımızda giderek daha önemli bir yer almaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı ile yürütülen ortak araştırma çalışmaları sonucunda, etkin ve verimli bir deprem yönetimi için zorunlu olan gereksinimler tespit edilmiş, önceliklenirilmiş ve çözümlerin teknik sentezi üzerinde çalışmalar yapılmıştır [1, 2, 3]. Tespit edilen gereksinimlere bağlı olarak yazılmış olan bu makalenin katkısı iki ana tema altında özetlenebilir. Birincisi, yazılım destekli deprem yönetim sistemini tasarlamak için gerekli temel teknolojik konuları tanımlamaktır. İkincisi, yönetim sistemi için gerekli sistem mimarisinin yapıtaşlarını ve aralarındaki ilişkileri ortaya çıkarmaktır. Tespitlerimize göre mevcut literatürde 'baştan sonra' deprem yönetim sistemi üzerine kapsamlı bir sistem mimarisi tasarımı henüz yayınlanmamıştır. Bu makale aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır. Bir sonraki bölümde mevcut deprem yönetim sistemleri ile ilgili bilgi verilmektedir. Bunu takiben sırası ile deprem yönetim sistemleri için gerekli görülen

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. Mehmet Akşit. Twente Üniversitesi ve TÜBİTAK BİDEB programı 2232 projesi kapsamında TOBB ETÜ.

teknik yaklaşım ve tasarlanan sistem mimarisi tanımlanmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## MEVCUT DEPREM YÖNETİM SİSTEMLERİ

Deprem operasyon merkezleri, acil durum koşullarının olumsuz etkisini en aza indirmek için gerekli yardım operasyonlarını yürütmekle sorumlu yönetim tesisleri olarak kurulur [4]. Bu merkezlerin amacı, genel acil durum yönetim süreçlerini tasarlamak, uygulamak ve yürütmektir. Günümüzde kaynak tahsisi ve kaynak yetersizliği gibi problemlerin çözümü genellikle uzman operatörler tarafından gerçekleştirilmektedir.

Yardım operasyonlarını bir optimizasyon problemi olarak gören araştırma yaklaşımları vardır [5, 6, 7, 8]. Bu yayınlarda uygulanan optimizasyon algoritmaları, belirli bir afet tanımı için geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Çoğu, kaynak tahsisi sorununa özel modeller ve sabit çözümler sunar. Genelde şiddetli bir depremin etkisi kesin olarak tahmin edilemez. Bu nedenle, kaynak tahsisi sorunu, gerçek acil durum olaylarından çevrimiçi olarak türetilmelidir. Bizim görüşümüze göre, deprem yönetim sistemi tasarlanırken farklı acil durum kategorileri için programlanabilen IoT tabanlı bir açık mimari yaklaşımı benimsenmelidir.

## DEPREM YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN GEREKLİ TEKNİK YAKLAŞIM

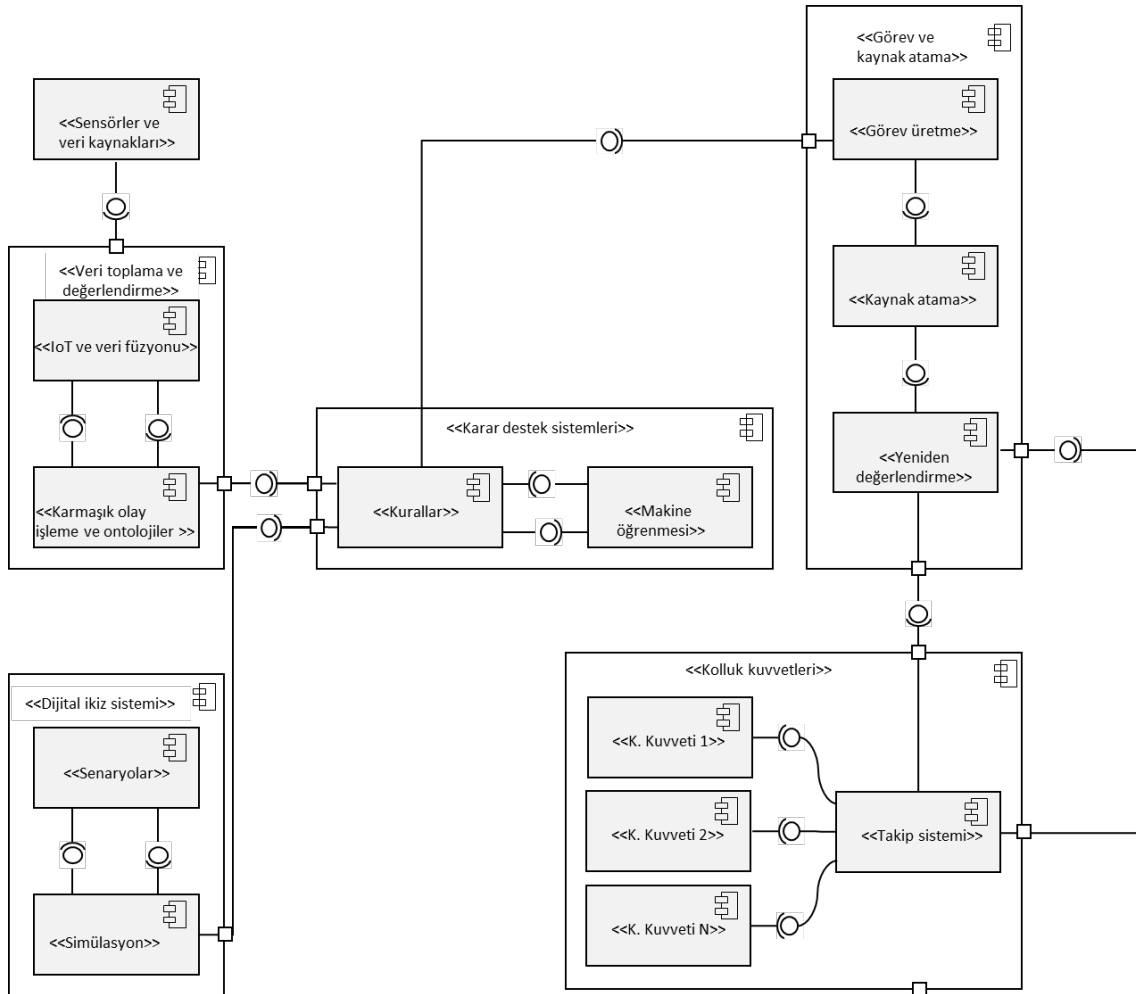
AFAD Başkanlığı ile yürütülen çalışmalar sonucunda, aşağıdaki teknik yaklaşımların gerekli olduğuna karar verilmiştir:

- **Hane ve kritik yapılardan bilgi toplamak:** Depremin etkisinin anlık tespiti için gerekli görünen her hane ve kritik yapıdan çeşitli sensör, veri toplama ve füzyon tekniklerini kullanarak bilgi elde etmek.
- **Verilerin gerekli yerlere iletilmesi:** Toplanan verilerin işlenerek IoT, iletişim ağları, ‘karmaşık olay tespit sistemleri’ ve ontoloji aracılığı ile değerlendirilerek depolamak.
- **Karar destek sistemleri:** Depolanan verileri, empirik kurallar, istatistiksel hesaplar ve makine öğrenmesi algoritmaları ile değerlendirip durum tespitini gerçekleştirmek.
- **Görev ve kaynak atama:** Tespit edilen durumlara göre empirik kurallar, jenerasyon teknikleri ve makine öğrenmesi algoritmaları ile görev tanımlarını üretmek. Mevcut kaynakları görev tanımlarına sıraya dizme algoritmaları kullanarak optimal bir şekilde atamak.
- **Önceliklendirme ve orta yolu bulma:** Kaynakların yetersiz kaldığı durumlarda önceliklendirme ve orta yolu bulma algoritmaları ile kaynak atamasını gerçekleştirmek.
- **Lojistik optimizasyon:** Gerekli kaynakların yönetimi için lojistik destek operasyonlarının ve hesaplama algoritmalarının sağlanması.
- **Kolluk kuvvetleri ile iletişim ağı:** Tespit edilen görev tanımlamalarının kolluk kuvvetlerine iletimi.
- **Takip ve kontrol:** Göreve gönderilen kolluk kuvvetlerinin takibi ve kontrolü. Planlanan amaçlardan sapma durumunda yeniden planlama ve optimizasyon.
- **Tahmin ve hazırlık:** Dijital ikiz sistemleri, ajan bazlı simülasyon ve makine öğrenmesi teknikleri ile afete hazırlık.

- **Anahtar performans göstergeleri:** Deprem yönetim sistemlerinin objektif temelde değerlendirilmesi için anahtar performans göstergelerinin tanımlanması ve ölçülmesi.
- **Kritik altyapılar:** Kurulacak sistemin güvenli, hataya dayanıklı ve istenilen derecede hızlı çalışabilmesi için uygun mimari teknikler ile donatılması.
- **Dijital platform ekosistemleri:** Üçüncü yazılım uygulamalarının geliştirilmesi ve sisteme kazanılmasını temin etmek amacı ile uygulama depolama, indirgeme ve konfigürasyon sistemlerinin temini.
- **Ürün-hatları yaklaşımı:** Deprem yönetim sisteminin çeşitli metropollerde uygulanmasının kolaylaştırılması amacı ile, yönetim yapıtaşları ve konfigürasyon mekanizmalarının temini.
- **Sistemlerin-sistemi mimarisi:** Olası geniş ölçekli veri akışının otomatik olarak yönetilmesi ve dengelenmesi amacıyla sistem yapıtaşları arasında gerekli protokollerin tesisi.

## DEPREM YÖNETİM SİSTEM MİMARİSİ

Bir önceki bölümde tespit edilen teknik özellikleri destekleyen sistem mimarisi Şekil’de sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil. Tasarlanan sistem mimarisinin UML ‘Component’ notasyonunda gösterilmesi.

Sol üst taraftaki yapıtaşı, sensörler ve çeşitli veri kaynaklarına karşılık gelmektedir. Elde edilen veriler ‘Veri toplama ve değerlendirme’ yapıtaşı tarafından işlenmektedir. Bu yapıtaşı da iki alt yapıtaşından oluşmaktadır: ‘IoT veri füzyonu’ ve ‘Karmaşık olay işleme ve ontolojiler’. ‘Karar destek sistemleri’ yapıtaşına iletilen veriler, sensörlerden elde edilen verilerden çok daha anlamlı bir soyutlama seviyesindedirler. Birbirlerini destekler vaziyette tanımlanan ve ‘Karar destek sistemlerini’ oluşturan ‘Kurallar’ ve ‘Makine öğrenmesi’ alt yapıtaşları deprem sonucunda ortaya çıkan durumu mümkün olduğu kadar etkin ve verimli bir şekilde tespit etmeyi amaçlamaktadır. Tespit edilen durumlar ‘Görev ve kaynak atama yapıtaşı’ tarafından işlenerek kolluk kuvvetlerine iletilmektedir. Mevcut kaynakların yetersiz olduğu ya da planlanan işlemlerde sapma olduğu anlarda ‘Yeniden değerlendirme’ yapıtaşı devreye girmektedir. Kolluk kuvvetlerinin faaliyetleri sürekli takip edilmekte ve herhangi bir sapma tespit edildiği zaman durum ‘Yeniden değerlendirme’ yapıtaşına geri beslenmektedir. Bu yapıtaşı gerekirse kolluk kuvvetlerine yeniden atamalar gönderebilir. Sol alt köşede tanımlanan ‘Dijital ikiz sistemi’, çeşitli deprem senaryolarının eğitim ve optimizasyon amacı ile tanımlanmasını ve sistemin tespitlere göre mükemmelleştirilmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Şekil ’de gösterilen mimari diyagramda anahtar performans göstergeleri, kritik altyapılar, dijital platform ekosistemleri, ürün-hatları yaklaşımı ve sistemlerin-sistemi mimarisi ilgili olan yapıtaşları gösterilmemiştir.

## SONUÇLAR

Mevcut deprem yönetim sistemlerinin verimliliği ve etkinliği gelişmiş yazılım teknikleri kullanılarak artırılabilir. Bu makale, gerekli teknik konuları tespit etmekte ve bir mimari çözüm sunmaktadır. Bu makale ile ilgili çalışmalardan bazı olumlu sonuçlar elde edilmiş ve yayına sunulmuştur [9, 10]. Bizim tespitlerimize göre, ‘baştan sona’ IoT tabanlı deprem yönetim sistemini öneren özgün bir çalışma henüz literatürde yeterli derecede yerini bulmamıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu projeye katkılarından dolayı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığında görevli Başkan Yardımcısı sayın Önder Bozkurt’a ve Daire Başkanı sayın Nihan Karacameydan İncemehmetoğlu’na teşekkür ederiz. Bu çalışmaya birçok TOBB ETÜ öğrencisi katkıda bulunmuştur. Özellikle B. Akkuş, Y. Algün, S. C. Altunsoy, R. Arslan, R. Bilgücü, İ. Demirel, H. Güçsav, A. Türksoy, T. Yazar ve N. Yüksel’ e şükranlarımızı sunarız. Bu proje, TÜBİTAK BİDEB programı 2232 Uluslararası Üstün Başarılı Araştırmacılar Bursu tarafından cömertçe desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Akşit, M. (2022) ‘Dijital Afet Sistem Gereksinimleri Üzerine Anket’. Teknik proje raporu.
2. Akşit, M. (2022) Dijital Afet Sistem Gereksinimlerinin Önceliklendirilmesi’. Teknik proje raporu.
3. Akşit, M. (2022) ‘Birinci Derecede Acil Dijital Afet Yönetim Sistem Gereksinimlerinin Teknolojik Sentezi’. Teknik proje raporu.
4. Fagel MJ, Mathews RC, Murphy JH, editors. (2021) ‘Principles of emergency management and emergency operations centers (EOC)’. CRC press.
5. Toth P, Vigo D, editors. (2014) ‘Vehicle routing: problems, methods, and applications’. Society for Industrial and Applied Mathematics.
6. Zeng Q, Liu C, Duan H, Zhou M. (2019) ‘Resource conflict checking and resolution controller design for cross-organization emergency response processes’. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 50(10):3685-700.
7. Fiedrich F, Gehbauer F, Rickers U. (2000) ‘Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters’. Safety science. 35(1-3):41-57.
8. Altay N. (2013) ‘Capability-based resource allocation for effective disaster response’. IMA Journal of Management Mathematics. 24(2):253-66.
9. Yazar, U. T. & Akşit, M. (2022) ‘An Architectural Framework for the Allocation Resources in Emergency Management Systems’. Yayınlanmak üzere değerlendiriliyor.
10. Arslan, R. Akşit, M. (2022) ‘Extending the Geographic Information System CityGML with Event-Based Digital Twins for Emergency Management’. Yayınlanmak üzere değerlendiriliyor.

## ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE YAPISAL OLMAYAN ELEMANLAR/ SİSTEMLERDEN KAYNAKLANAN RİSKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

### SOFTWARE DEVELOPMENT TO EVALUATE THE RISKS DUE TO NON-STRUCTURAL ELEMENTS/SYSTEMS IN INDUSTRIAL FACILITIES

Bülent Akbaş<sup>1</sup> ve Eren Uçkan<sup>2</sup>

#### ÖZET

*Endüstriyel tesislerde birbirleriyle bağlantılı olan bir çok kritik bileşen ve ekipman bulunmaktadır. Doğal afetlerin (deprem, sel, fırtına) tetiklenmesinden kaynaklanan teknolojik kazaların (Doğ-Tek) oluşturacağı riskler genellikle yapısal olmayan bileşenleri kapsamaktadır. Doğ-Tek olayları ekipman hasarı, yangı, toksik veya patlayıcı tehlikeli madde salınımı, çevresel etkiler ve üretim durması gibi dolaylı kayıplara yol açmaktadır. Risk hesaplanmasındaki amaç deprem tehlikesinin (aşılma olasılıklarını), yapısal kırılganlıkların (yıllık göçme ve hasar görme olasılıklarının) ve hasar veya göçme sonucunda oluşacak durumların öngörülebilmesidir. Bir endüstri tesisinde deprem tehlikesinin, kritik ekipmanların (tipoloji) ve sismik hasar görülebilirliklerinin belirlenerek tesis bazlı kantitatif sismik risklerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun sonucunda risk azaltıcı tedbirlerin geliştirilmesi gerekebilir. Kritik tesislere ilişkin risk hesaplamaları genelde karmaşık matematiksel yaklaşımlarla yapıldığından genellikle akademik boyutta kalmaktadır. Konunun karmaşıklığı, özellikle uygulanabilirliğini de zorlaştırmaktadır. Ayrıca, sanayi tesislerindeki ekipmanların konumları, bağlantıları ve içerdikleri malzemelerin miktarı zaman içerisinde değişebilmektedir. Bu nedenle, tesis yetkililerinin denetiminde envanter güncellemesine imkan veren, etkin bir sismik risk analizi yapan kolay kullanımlı bir yazılıma ihtiyaç bulunmaktadır. Geliştirilecek yazılım, arka planda mevcut karmaşık metodolojilere dayalı olsa da ara yüzü eğitimli bir mühendisin kullanabileceği şekilde kolay kullanımlı olmalıdır.*

Anahtar Kelimeler: Deprem, Yazılım, Sismik risk, Endüstriyel Tesisler, Yapısal Olmayan Elemanlar

#### ABSTRACT

*There are many critical components and equipment in industrial facilities. The risks due to technological accidents caused by the triggering of natural disasters (earthquake, flood, storm, etc.) are defined as Na-Tech events and generally involve nonstructural components. Na-Tech events also cause damaging structures, processing units, the release of toxic substances, oil spills, large fires, and explosions. The objective of risk calculation against Na-Tech events is to predict seismic hazard (in terms of probability of exceedance) and structural fragilities (in terms of probability of annual failure and damaging ratio). In an industrial facility, quantitative risks are needed to be determined based on the typology of critical equipment and seismic vulnerabilities. As a result, mitigation strategies might be developed. Risk calculations require comprehensive mathematical models and analyses, and are generally performed by academicians. Due to the nature of the problem, the applicability of risk determination is quite comprehensive. In addition, the location of the equipment, their connections, and the materials contained in the equipment might change. Thus, there is need for a software that can update the inventory, perform an effective seismic risk determination, and is easy to use. The proposed software will be engineer-friendly, though it will carry out a comprehensive risk analysis in the background.*

Keywords: Earthquake, Software, Seismic risk, Industrial Facilities, Nonstructural Elements

<sup>1</sup> Prof.Dr., Gebze Teknik Üniversitesi,Kocaeli, akbasb@gtu.edu.tr

<sup>2</sup> Prof.Dr., Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, e.uçkan@alanya.edu.tr

## GİRİŞ

Teknolojik kazalar deprem, sel, fırtına gibi doğal afet olayları (Doğ-Tek) tarafından tetiklenebilir. Örneğin, Kocaeli (1999) depremi sonrasında TÜPRAŞ rafinerisindeki yangın neticesinde tehlikeli madde salınımı oluşmuş, Büyük Doğu Japonya (2011) depremi sonrasında ise tehlikeli madde salınımının yanında oluşan Tsunami birçok kimyasal tesisin daha da fazla hasar görmesine neden olmuştur. Doğal tehlikeler, geniş bir alanda tehlikeli madde salınımına neden olabilir, endüstri tesisindeki yapısal, mekanik ve proses sistemine zarar verebilir, ve domino etkisi yaratabilir (Doğangüneş vd., 2021; Malhotra ve Wieland, 2000; Ohno vd., 2015; Saatcioglu vd. 2001; Young vd., 2004).

Bir endüstri tesisinde deprem tehlikesinin, kritik ekipmanların (tipoloji) ve sismik hasar görülebilirliklerin belirlenerek tesis bazlı kantitatif sismik risklerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun sonucunda risk azaltıcı tedbirlerin geliştirilmesi gerekebilir. Kritik tesislere ilişkin risk hesaplamaları genelde karmaşık matematiksel yaklaşımlarla yapıldığından genellikle akademik boyutta kalmaktadır. Konunun karmaşıklığı, özellikle uygulanabilirliğini de zorlaştırmaktadır. Ayrıca, sanayi tesislerindeki ekipmanların konumları, bağlantıları ve içerdikleri malzemelerin miktarı zaman içerisinde değişebilmektedir. Bu nedenle, tesis yetkililerinin denetiminde envanter güncellemesine imkan veren, etkin bir sismik risk analizi yapan kolay kullanımlı bir yazılıma ihtiyaç bulunmaktadır. Geliştirilecek yazılım, arka planda mevcut karmaşık metodolojilere dayalı olsa da ara yüzü eğitilmiş bir mühendisin kullanabileceği şekilde kolay kullanımlı olmalıdır. Önerilen yazılımın geliştirilmesi aşağıdaki adımlardan oluşmalıdır:

1 ) Kritik bileşenlerin (tipoloji) belirlenerek hızlı tarama tekniğinin geliştirilmesi:

Kritik bileşenler direkt olarak tehlikeli madde sızıntısına yol açabilecek tank, boru, birleşik ısı ve güç santrali üniteleri, yükseltilmiş ekipmanlar vs. gibi elemanları ifade eder. Ayrıca, yangın müdahale tankları gibi acil durumda devreye girmesi gerekli olan sonuçları açısından önemli ikincil elemanlar da kritik eleman da bu sınıfa dahil edilmelidir.

2) Elemanların sismik kırılabilirliklerinin belirlenmesi:

Literatürde mevcut olan analitik ya da ampirik ilişkilerin yanı sıra gerekli durumlarda uzman görüşüne dayalı bağıntılar veya gerekmesi halinde sayısal analizlerle özel olarak çıkartılacak elemanları kapsar. Genelde tipik elemanlar için önerilen jenerik-temsili hasar eğrileri kullanılabilir.

3) Sismik tehlike eğrisinin belirlenmesi.

4 ) Ekipman bazında risk indekslerinin belirlenmesi.

5) Madde sızıntısına yol açan yıllık ortalama hasar görme olasılıklarının hesaplanması.

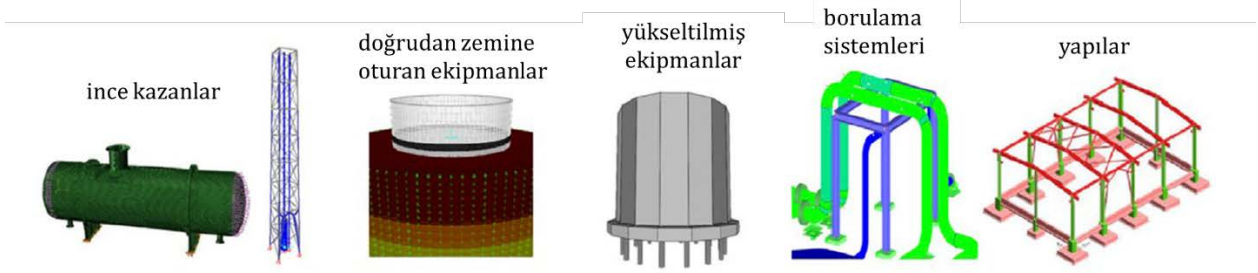
6) Karar /hasar azaltıcı tedbirlerin oluşturulması (FEMA E-74, 2012).

## DOĞAL TEHLİKE KAYNAKLI ENDÜSTRİYEL RİSKLER (DOĞ-TEK OLAYLARI)

Doğ-Tek olayları (deprem gibi doğal afet tarafından tetiklenen teknolojik kazalar) sonucu oluşacak hasar ve sıvı kaybı, ekipmanın yapısal davranışına bağlıdır. Büyük tesislerin kantitatif risk analizi (QRA), insanlar ve çevre üzerinde yüksek düzeyde potansiyel sonuçları olan mevcut tesislerin risk değerlendirmesi için kullanılan bir yöntemdir. Her ekipman tipolojisi için temsili hasar durumları (DS) belirlenir. Risk matrisleri kullanılarak en tehlikeli bileşenler için bir sıralama oluşturularak en olası sıvı kaybı durumu belirlenir (Corritore, vd. 2021). Bunun sonucunda eleman bazında risk indeksi hesaplanabilir. Tesisin toplam riski ise eleman risklerinin toplamından oluşur. Geliştirilecek yazılımın akademik çevrelerce kabul görmüş mevcut yöntemlere dayalı olması, temel ekipmanları dikkate alması ve tesisin ihtiyaçlarına cevap verecek olması esas olmalıdır. Sanayi tesislerinde sismik risklerin belirlenmesinde uyulacak ana başlıklar aşağıda belirtilmiştir.

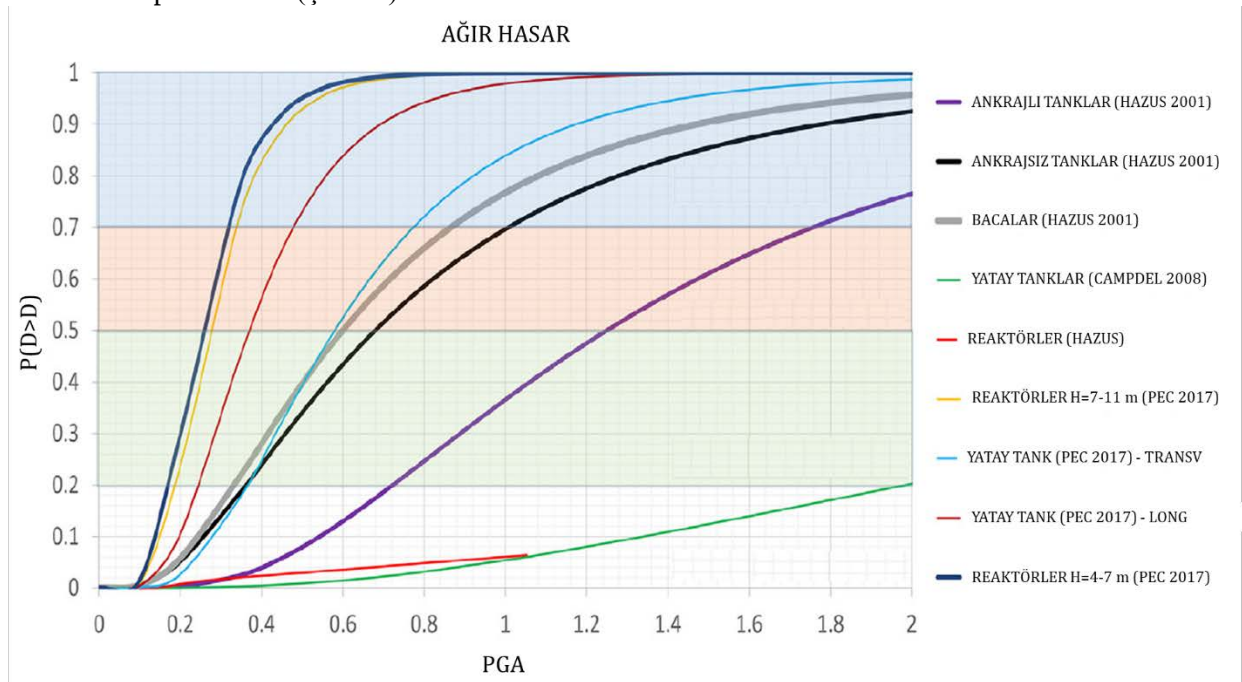
1) Kritik Bileşenlerin Belirlenmesi:

Tesisteki tipolojik kritik ekipmanlar belirlenmelidir (Şekil 1). Bunların dışında tehlikeli madde içermemesine rağmen yangın mücadelede kullanılacak ekipmanlar ya da tehlikeli madde içermemesine rağmen hasar görmesi sonucunda domino etkisi yaratabilecek elemanlar/ekipmanlar dikkate alınmalıdır.



Şekil 1. Bir endüstri tesisindeki yapısal tipolojiler (Corritore vd., 2021)

- 2) Elemanların/ekipmanların kırılmalık eğrilerinin belirlenmesi:  
Analitik, ampirik ya da mühendislik yaklaşımları sonucunda elemanların kırılmalık eğrileri hesaplanmalıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Farklı ekipmanlar için kırılmalık eğrileri (Corritore vd., 2021)

- 3) Sahaya özel deprem tehlikesi:  
Olasılıksal sismik tehlike analizleriyle sahaya özel deprem tehlikesi analizleri yapılmalıdır.
- 4) Risk matrislerinin hesaplanması:  
Her ekipmanın risk indeksi üç farklı risk faktörünün çarpımıyla hesaplanabilir (Corritore vd. 2021):

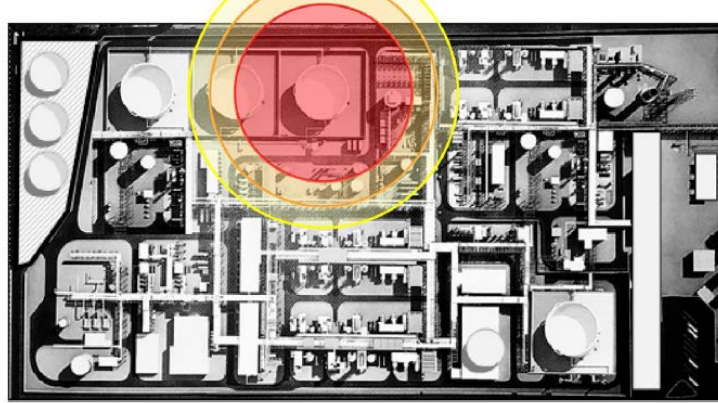
$$I_R = I_H \times I_V \times I_E \quad (1)$$

Denklem (1)'de  $I_R$ , eleman bazlı risk indeksini;  $I_H$ , sismik tehlike indeksini;  $I_V$ , sismik hasar görülebilirlik indeksini (farklı hasar seviyeleri için ihtimaller);  $I_E$ , maruz kalma indeksini göstermektedir.

- 5) Karar/hasar azaltma yöntemleri:  
Belirlenen riskler hakkında kararın verilerek hasar azaltma yöntemleri geliştirilmelidir.

Tablo 1. Sanayi tesislerindeki ekipmanlar için risk indeksi ve risk seviyesi

| Risk İndeksi                | Risk Seviyesi |
|-----------------------------|---------------|
| $12I_H \leq I_R \leq 16I_H$ | Yüksek risk   |
| $9I_H \leq I_R \leq 12I_H$  | Orta risk     |
| $6I_H \leq I_R \leq 9I_H$   | Düşük risk    |
| $0I_H \leq I_R \leq 6I_H$   | Sınırlı risk  |



Şekil 3. Bir depolama tankındaki yağ sızıntısından dolayı oluşacak kaza senaryosu (Corritore vd., 2021)

## SONUÇ

Bu çalışmada, endüstriyel tesislerde doğal afetlerin tetiklenmesinde kaynaklanan teknolojik risklerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir yazılımın geliştirilmesinde izlenecek ana adımlar kısaca özetlenmiştir. Endüstriyel tesislerdeki risklerin azaltılmasında kullanılabilecek olan bu yazılımın hem Ar-Ge gerektirmesi hem de katma değerinin yüksek olacağı değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Corritore D, Paolacci F, and Caprinuzzi S(2021). Screening Methodology for the Identification of Critical Units in Major-Hazard Facilities Under Seismic Loading. *Frontiers in Built Environment* , Volume 7: 780719.
- Doğangüneş S, Akbaş B, Uçkan E (2021) “Natech Risk Assessments of Industrial Plants and Structural Design Criteria Based on International Specs”, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Kocaeli, Turkey, 13-15 October
- FEMA E-74 (2012) Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide, FEMA, USA
- Malhotra P, Wieland M (2000) “Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks” *Structural Engineering International*
- Ohno T, Kobayashi N, Oyamada K (2015). Seismic resistance capacity on the pipe braced supporting frame of spherical tank. *Bulletin of the JSME*
- Saatcioglu M, Mitchell D, Tinawi R, Gardner J (2001). The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) Earthquake-damage structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*
- Young S, Balluz L, and Malilay J (2004). Natural and Technologic Hazardous Material Releases during and after Natural Disasters: A Review. *Sci. Total Environ.* 322, 3–20. doi:10.1016/S0048-9697(03)00446-7

## ACİL MÜDALAHE EKİPLERİNİN ERİŞİMİ İÇİN DEPREM SONRASI ENKAZ TEMİZLEME FAALİYETLERİNİN PLANLAMASI

### PLANNING OF DEBRIS CLEARANCE OPERATIONS AFTERMATH OF A DISASTER FOR THE ACCESSIBILITY OF FIRST RESPONSE CREWS

Burak Cavdaroglu<sup>1</sup>

#### ÖZET

Afet yönetiminin bir alt başlığı olan enkaz yönetimi son yıllarda yöneylem araştırması alanında popülerliği gittikçe artan bir araştırma konusudur. Enkaz temizleme, etkilenen bölgelere ulaşmak ve ihtiyacı olan insanlara yardım etmek için enkazın araç trafiğine izin verecek şekilde geçici olarak yoldan kaldırılmasını içerir ve afet sonrası müdahale için büyük önem arz etmektedir. Enkazın yollardan temizlenmesiyle ilk müdahale, insani yardım dağıtımı ve geçici barınma tesislerine ulaşım gibi faaliyetler sağlıklı bir şekilde sürdürülebilir. Bu nedenle enkaz kaldırma işlemleri analitik ve rasyonel bir karar verme sürecini gerekli kılar. Bu çalışmada olası bir depremden hemen sonraki birkaç gün içinde ortaya çıkan enkazı geçici olarak yollardan kaldırmayı hedefleyen enkaz temizleme faaliyetlerinin bölgenin ulaşılabilirliğini artıracak şekilde planlanması amaçlanmaktadır. Tanımlanan 'Dinamik Kapsayan Ağaç Restorasyon (DKAR)' problemi, kümülatif ulaşmazlık (KU) olarak isimlendirilen bir performans metriğini minimize etmeyi hedeflemektedir. KU değeri, (yol ağına ait ayrıların restorasyonu ile) dinamik bir şekilde değişen yol ağı üzerindeki ulaşmazlık seviyesinin planlama süresi boyunca oluşan toplamıdır. DKAR probleminin çözümü için bir dizi sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Bu sezgisel yaklaşımların performansı ölçmek için öncelikle DKAR probleminin tam sayılı programlama modeli ile optimal olarak çözülebilecek büyüklükte rastgele çizge örnekleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu problem örneklerinin optimal çözümleri, önerilen sezgisellerin çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Özellikle bazı sezgisellerin kısa sürede optimale yakın çözümler üretebildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Afet yönetimi, Enkaz temizleme, Yöneylem araştırması

#### ABSTRACT

Debris management, which is a subcategory of disaster management, is an increasingly popular research topic in the field of operations research in recent years. Debris clearance involves the temporary removal of debris from the road to allow vehicle traffic, reach affected areas and help people in need, and is of paramount importance for post-disaster response. By clearing the debris from the roads, activities such as first response, distribution of humanitarian aid and access to temporary accommodation facilities can be maintained without interruption. Therefore, debris clearance requires an analytical decision-making process. The goal of this study is the planning of debris clearance activities, which remove the debris from the roads temporarily within a few days after an earthquake, to increase the accessibility of the affected region. The proposed problem in the study, Dynamic Spanning Tree Restoration (DSTR) problem, aims to minimize a performance metric called cumulative inaccessibility (CI). The CI value is the sum of the inaccessibility level on the dynamically changing road network (due to the restoration of the blocked edges) over the planning time window. Several heuristics have been proposed for solving the DKAR problem. To assess the performance of these heuristics, first, random graph instances of the size that can be optimally solved with the DKAR problem's integer programming model are created. Then, the optimal solutions of these instances are compared with the solutions of the proposed heuristics. We have observed that some heuristics can quickly produce near-optimal solutions.

Keywords: Earthquake, Disaster management, Debris clearance, Operations research

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, burak.cavdaroglu@khas.edu.tr

## GİRİŞ

Doğal ve insan kaynaklı afetler, tarihin farklı dönemlerinde birçok can ve mal kaybına neden olmuştur. Özellikle son yüzyılda şehirleşme ile artan bina popülasyonu bu afetlerin sonuçlarını daha vahim hale getirebilmektedir. Afet anında ve sonrasında oluşabilecek enkazlar, felaketlerin en yıkıcı sonuçlarından biridir. Enkazlar, hasar görmüş ve yıkılmış binaları, felaket sonrası havzasını terk eden atıkları, tortu ve bitkisel kalıntıları içerir. Enkazlar, hayati tehdit oluşturmalarının yanı sıra, afet yönetimi döngüsünün iki önemli bileşeni olan müdahale ve iyileştirme faaliyetlerini kesintiye uğratma ve çevre sorunlarına neden olma riski de taşır. Bu nedenle son yıllarda enkaz yönetimi afet yönetimi alanının önemli bir konu başlığı haline gelmiştir. Enkaz yönetimi, afet sonrası ilk günlerde gerçekleştirilen enkaz temizleme ve sonraki birkaç aya yayılmış enkaz toplama faaliyetleri olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Bu çalışmada ele alınan enkaz temizleme faaliyetleri, enkaz yönetiminin ilk aşaması olup ortaya çıkan enkazı afetten hemen sonraki günlerde yol kenarlarına iterek karayollarının kullanılabilirliğini arttırmayı amaçlamaktadır.

Enkaz oluşumuna neden olan afetlerin başında depremler gelmektedir. Deprem sonrası yollarda biriken büyük miktarlardaki enkazlar, özellikle insani yardım ve acil müdahale ekiplerinin karayollarına ve dolayısıyla ihtiyaç sahiplerine ulaşılabilirliğine zarar verdiği için afet sonrasında can kaybı oranının artmasının nedenlerinden biri olabilmektedir. Afetten etkilenen bölgeye insani yardım malzemelerinin ulaştırılabilmesi veya insanların bu bölgelerden geçici yerleşim noktalarına erişimi de yolların enkaz ile kapanmasından etkilenmektedir. Örneğin 2010 Haiti depreminde başkent Port-au-Prince'i depremden en çok etkilenen bölgelerden biri olan Jacmel'e bağlayan anayol, yol üzerinde kümelenen enkazlar nedeniyle depremden sonraki on gün boyunca kapalı kalmış ve Jacmel'e yardım ulaştırılmasını büyük oranda engellemiştir (Fraser, 2010). Bu örnekten de anlaşıldığı üzere afet yönetimi kapsamında çalışılması gereken en önemli konulardan birinin enkaz yönetimi olduğu açıktır. Buna rağmen enkaz yönetimi faaliyetlerine yönelik nicel karar alma modelleri hakkındaki literatürün oldukça yeni ve sınırlı olduğu gözlemlenmektedir (Çelik, 2016).

Enkaz temizleme ekipleri, deprem sonrası güvenli bir şekilde faaliyet göstermeleri mümkün olur olmaz enkaz temizleme çalışmalarına başlar. Bu aşamada öncelikli amaç, ilk müdahale ve arama-kurtarma ekiplerine ait acil durum araçlarının (örneğin ambulanslar) ve insani yardım ulaştırıcı ekiplerin etkin ve güvenli bir şekilde ihtiyaç noktalarına erişimini sağlamaktır. Afet sonrası müdahale sürecinde enkazların karayollarını açacak şekilde geçici olarak yol üzerinden temizlenmesi bile zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, afet sonrası müdahale aşamasının önemli bir parçası olan enkaz temizleme, etkin bir planlama ve karar alma sürecini gerektirir.

Deprem sonrası bir bölgenin ulaşılabilirliği; karayolu ağının tüm bileşenleri arasında gidip gelerek kurtarılması gereken kişilere erişmek ve ilk müdahaleden sonra bu kişileri sağlık tesislerine ulaştırmak için büyük öneme sahiptir. Bu bölgelere/düğümlere ulaşımı sağlayacak yol ağı bileşenlerinin her zaman öngörülebilir olmaması, yol ağı üzerindeki tüm düğümlerin ulaşılabilir olması ile bertaraf edilebilir. Diğer bir deyişle, herhangi iki düğüm arasında en az bir 'açık' patika olmasını garanti etmek büyük önem taşıyacaktır. Bu nedenle çalışmamızda afet sonrası ulaşılabilirlik seviyesinin kapsayan ağaç maliyeti ile ölçülmesi uygun bulunmuştur. Çalışma; bir ağın tüm düğümlerine olan ulaşılabilirlik seviyesini, oluşturulan (veya oluşturulamayan) kapsayan ağaçların maliyetleri ile ölçmeyi ve bu ulaşılabilirlik seviyesinin ayrıntı restore edildikçe dinamik bir şekilde değişen ve zamana yayılmış toplamını minimize etmeyi hedeflemektedir.

## DİNAMİK KAPSAYAN AĞAÇ RESTORASYON PROBLEMİ

Çalışmada tanımlanan Dinamik Kapsayan Ağaç Restorasyon (DKAR) problemi, ayrıntılarının bir bölümü hasar görmüş ve her hasarlı ayrıntı belirli bir onarım süresi olan bir yol ağında, afetten etkilenen bölgenin ulaşılabilirliğinin maksimize edilmesi için hasarlı ayrıntıların hangi sırada onarılması gerektiğine karar vermektedir. DKAR problemi tanımlanırken ve matematiksel olarak modellenirken bir dizi varsayımda bulunulmuştur. İlk olarak, çizgede her bir ayrıntı hasar durumu bir ikili değer ile ifade edilir (0 hasarsız, 1 hasarlı). Yani DKAR problemi ayrıntıların kısmen hasarlı olduğu durumları dikkate almaz. İkinci olarak, çizgedeki ayrıntıların maliyetleri reel sayı değeri, bloke olmuş ayrıntıların restorasyon süreleri ise tamsayı değeri olabilir. Buna göre ayrıntıların restorasyonu

için gereken süre, tamsayı birim zamanlar cinsinden ifade edilmelidir. Bu varsayım geliştirilen matematiksel modelin mevcut yapısı için gerekli olmakla birlikte, daha hızlı çözüm üreten bir matematiksel model oluşturulmasına da olanak sağlamaktadır. Üçüncü olarak, ayrıtların onarımı (restorasyonu) için kullanılacak tek araç (örneğin dozer) olduğu varsayılmıştır. Dördüncü olarak, hasarlı ayrıtların hiçbir öncelik sıralaması gözetmeden istenilen sırada restore edilebileceğini varsayılmıştır. Diğer bir deyişle, hasarlı  $(i, j)$  ayrıtının  $i$  veya  $j$  düğümlerine çizge üzerinde hasarsız bir patika ile henüz erişim olmasa bile bu ayrıtın restore edilebileceği ve restore edilecek ayrıtlar arasında geçiş süresinin sıfır olduğu varsayılmaktadır. Son olarak, bloke olmuş ayrıtların açılması için gerekli restorasyon süresinin deterministik olduğu, diğer bir ifade ile önceden kesin olarak bilinebildiğini varsayılmıştır.

DKAR problemine göre  $G = (N, A)$  yol ağında (çizgesinde)  $N$  ve  $A$  sırasıyla düğüm ve ayrıt kümelerini ifade eder.  $A^D \subset A$  afet sonrası yol ağında hasar gören ayrıtların kümesidir.  $c_{i,j} \in \mathbb{R}^+$  parametresi  $(i, j) \in A$  ayrıtını kat etmenin maliyetini,  $r_{i,j} \in \mathbb{Z}^+$  parametresi ise  $(i, j) \in A^D$  bloke ayrıtının restorasyon süresini gösterir. Çizge kuramında bir çizgeye ait kapsayan ağaç, o çizgenin her bir düğüm çifti arasında sadece bir adet patikanın olduğu ayrıtlar kümesidir.  $G$  yol ağının  $K$  kapsayan ağacı,  $G$ 'nin tüm düğümlerini ve  $|N| - 1$  adet ayrıtı içeren bir ağaçtır. Minimum kapsayan ağaç, ayrıt ağırlıklarının (ayrıt uzunluklarının veya kat edilme sürelerinin) toplamı en küçük olan kapsayan ağaçtır.  $G$  yol ağı için  $c_{i,j}$  değerleri toplamı en küçük olan kapsayan ağacı bulma problemi minimum kapsayan ağaç (MKA) problemi olarak isimlendirilir (Ahuja vd., 1993).

DKAR problemi enkaz ile bloke olmuş yolların temizlenme sırasını planlayarak belirli bir yol ağının erişilebilirlik seviyesini en kısa sürede sıfıra yakın değerlerden (afetin hemen sonrası bir tane bile kapsayan ağaç oluşumu mümkün değilse sıfırdan) 100% seviyesine (en az bir adet minimum kapsayan ağacın elde edilebildiği seviyeye) çıkarmayı hedefler. Burada ulaşılabilirlik seviyesini belirli bir planlama süresi içinde ne kadar hızlı bir şekilde iyileştirdiğini nicel olarak ölçmek için 1 numaralı denklem kullanılmaktadır.

$$KU = \int_{t=0}^{|T|} U^t = \int_{t=0}^{|T|} 1 - \frac{c(MST^*)}{c(MST^t)} \quad (1)$$

1 numaralı denklem planlama süresi boyunca kümülatif ulaşılmazlığı ( $KU$ ) ölçmektedir. Bu denklem ile her ne kadar ulaşılabilirlik yerine ulaşılmazlık seviyesi ölçülüyor olsa da,  $KU$  değerini minimize etmek bir planlama süresi boyunca ulaşılabilirlik seviyesinin maksimize edilmesine eşdeğer olacaktır. Denklemde  $|T|$  toplam planlama süresini ifade eder. Burada planlama süresi, hasarlı ayrıtların tamamını restore etmek için gerekli sürelerin toplamı olarak kabul edilir.  $MST^*$  afet öncesi hiçbir yolun bloke olmadığı durum için minimum kapsayan ağacı,  $c(MST^*)$  ise bu kapsayan ağacın toplam maliyetini verir.  $MST^t$  planlama süresinin herhangi bir  $t$  anındaki minimum kapsayan ağacı,  $c(MST^t)$  ise bu kapsayan ağacın toplam maliyetini ifade eder. Eğer  $t$  anında hiç kapsayan ağaç mevcut değilse denklemde  $c(MST^t) = \infty$  kabul edilir.  $U^t$  değeri,  $1 - c(MST^*)/c(MST^t)$  ifadesi ile hesaplanır ve herhangi bir  $t$  zaman periyodunda ağ üzerindeki ulaşılmazlık seviyesini ifade eder. Kümülatif ulaşılmazlık ( $KU$ ), tüm planlama süresi boyunca oluşan  $U^t$  değerlerinin toplamıdır. Belirli bir  $t$  anındaki ulaşılmazlık seviyesini gösteren  $U^t$ , Özdamar vd. (2014) çalışmasında tanımlanan ölçüte benzemektedir. Özdamar vd. (2014)'te ulaşılmazlık hesaplanırken (kapsayan ağaç maliyetleri değil) tüm düğüm çiftleri arasındaki mesafelerin toplamı kullanılmaktadır.

## YÖNTEM

DKAR problemine optimal çözümler üretebilmek amacıyla öncelikle problem için bir tamsayı programlama (TSP) modeli geliştirilmiştir. Bu modelde amaç fonksiyonu, planlama boyunca elde edilecek minimum kapsayan ağaçların maliyetlerinin toplamını veren doğrusal bir denklem ile ifade edilmiştir. Bu fonksiyon, 1 numaralı denklem ile verilen  $KU$  değerine eşit olmasa da, kullandığımız doğrusal amaç fonksiyonun minimize edilmesinin optimizasyon açısından  $KU$  değerinin minimizasyonuna eş değer olduğu gösterilmiştir. Diğer bir deyişle iki amaç fonksiyonu da aynı optimal çözüme (enkaz temizleme planına) ulaşacaktır. Geliştirilen TSP modeli, planlama boyunca her  $t$  anında (i) (başlanabiliyorsa) hangi ayrıtların restorasyonuna başlanacağına ve (ii) minimum

kapsayan ağaç için hangi ayırtlar seçildiğine karar verir. Ayrıca modelde (i) (kapsayan ağacın tanımı gereği)  $n-1$  adet ayırt seçilmesi ve seçilen ayırtların döngü oluşturmaması, (ii) bir ayırtın restore edilmeden kapsayan ağaçta kullanılamaması, (iii) yolları açmada kullanılacak aracın aynı anda iki yol açma işlemini gerçekleştirmemesi için gerekli kısıtlar tanımlanmıştır. (Sayfa sınırı nedeniyle geliştirilen tamsayı programlama modeli bu metinde sunulmamıştır.)

DKAR probleminin hesaplama karmaşıklığı henüz tespit edilmemiş olsa da, hesaplama zorluğu yüksek bir problem olduğu öngörülmektedir. Problem TSP modeli ile çözdürüldüğünde çözüm süresinin üstel bir şekilde artıyor olması bu öngörüğü desteklemektedir. Bu nedenle DKAR probleminde ayırtların restorasyon sırasına karar veren hızlı ve optimale yakın çözümler üretmek için 6 farklı sezgisel yaklaşım (S1-S6) şu şekilde tanımlanmıştır.

S1: Restorasyon süresi en düşük olandan en büyük olana doğru bloke ayırtların restore edilmesi

S2:  $MST$  maliyetini en çok iyileştirenden en az iyileştirene doğru bloke ayırtların restore edilmesi

S3:  $MST$  maliyetini birim zamanda en çok iyileştirenden en az iyileştirene doğru bloke ayırtların restore edilmesi

S4: Uç noktalarının derece toplamı en küçük olan ayırttan en büyük olana doğru bloke ayırtların restore edilmesi

S5: Sadece  $MST^*$  kapsayan ağacını oluşturan ayırtların restorasyonuna izin verilecek şekilde S1 yönteminin uygulanması

S6: Sadece  $MST^*$  kapsayan ağacını oluşturan ayırtların restorasyonuna izin verilecek şekilde S3 yönteminin uygulanması

Bu sezgisel yöntemlerin tamamında planlama periyodunun belli anlarında statik olarak minimum kapsayan ağaçların bulunması gerekliliği vardır. Bu minimum kapsayan ağaçların ve onlara tekabül eden maliyetlerin hesaplanması için tüm sezgisellerde  $O(|N|^2)$  zaman karmaşıklığına sahip Prim algoritması kullanılmıştır.

## UYGULAMA

Çizgelerin boyutuna ve problemin hasarlı ayırt sayısı gibi parametrelerine göre TSP modelinin optimal çözüme ulaşma hızı değişkenlik gösterecektir. Ayrıca yine bu değişkenlere göre S1-S6 sezgisel yaklaşımlarının optimal (veya optimale yakın) çözüme ulaşma performansları farklılıklar gösterebilir. Bu bağlamda hem matematik modelin çözüm süresi performansını ölçmek hem de tanımladığımız sezgisellerin başarımlarını ölçmek adına 16 farklı deney tasarlanmıştır. Her bir deney için 500 adet rastgele çizge oluşturulmuştur.

Tablo 1. Tasarlanan deneyler için sezgisellerin başarımları

| Deney | Çizge parametreleri |           |       |              | Optimal çözümler |            | Sezgisellerin ortalama optimalite açıklığı |     |     |      |     |     |        |  |
|-------|---------------------|-----------|-------|--------------|------------------|------------|--------------------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|--------|--|
|       | $n$                 | $\lambda$ | $\mu$ | $ A ,  A^d $ | #çözülen         | Süre (sn.) | S1                                         | S2  | S3  | S4   | S5  | S6  | En iyi |  |
| 1     | 10                  | 1         | 0.25  | 45, 11       | 500              | 1.6        | 106%                                       | 5%  | 0%  | 279% | 6%  | 1%  | H3     |  |
| 2     | 10                  | 1         | 0.5   | 45, 22       | 500              | 4.8        | 172%                                       | 11% | 1%  | 306% | 15% | 4%  | H3     |  |
| 3     | 10                  | 1         | 0.75  | 45, 33       | 500              | 9.2        | 169%                                       | 18% | 3%  | 177% | 30% | 9%  | H3     |  |
| 4     | 15                  | 0.5       | 0.25  | 52, 13       | 500              | 4.2        | 121%                                       | 7%  | 0%  | 366% | 12% | 1%  | H3     |  |
| 5     | 15                  | 0.5       | 0.5   | 52, 26       | 500              | 13.2       | 153%                                       | 13% | 1%  | 309% | 24% | 4%  | H3     |  |
| 6     | 15                  | 0.5       | 0.75  | 52, 39       | 500              | 38.6       | 152%                                       | 51% | 39% | 173% | 56% | 38% | H6     |  |
| 7     | 15                  | 0.75      | 0.25  | 78, 19       | 500              | 10.1       | 194%                                       | 8%  | 0%  | 624% | 11% | 2%  | H3     |  |
| 8     | 15                  | 0.75      | 0.5   | 78, 39       | 500              | 37.9       | 237%                                       | 14% | 1%  | 439% | 20% | 3%  | H3     |  |
| 9     | 15                  | 0.75      | 0.75  | 78, 58       | 493              | 101.0      | 223%                                       | 24% | 6%  | 238% | 36% | 12% | H3     |  |
| 10    | 20                  | 0.25      | 0.25  | 47, 11       | 500              | 5.8        | 84%                                        | 9%  | 0%  | 192% | 17% | 1%  | H3     |  |
| 11    | 20                  | 0.25      | 0.5   | 47, 23       | 499              | 37.7       | 130%                                       | 33% | 20% | 170% | 69% | 21% | H3     |  |
| 12    | 20                  | 0.25      | 0.75  | 47, 35       | 482              | 110.6      | 126%                                       | 83% | 79% | 109% | 64% | 61% | H6     |  |
| 13    | 20                  | 0.5       | 0.25  | 95, 23       | 500              | 33.3       | 208%                                       | 10% | 0%  | 611% | 15% | 1%  | H3     |  |
| 14    | 20                  | 0.5       | 0.5   | 95, 47       | 489              | 141.1      | 236%                                       | 16% | 1%  | 510% | 27% | 3%  | H3     |  |
| 15    | 20                  | 0.5       | 0.75  | 95, 71       | 453              | 365.0      | 229%                                       | 39% | 24% | 246% | 58% | 25% | H3     |  |
| 16    | 30                  | 0.25      | 0.25  | 108, 27      | 466              | 191.4      | 161%                                       | 12% | 0%  | 429% | 21% | 1%  | H3     |  |

Tasarlanan her bir deney için rasgele oluşturulacak çizgelerin parametre değerleri Tablo 1’de ‘Çizge parametreleri’ başlığı altında verilmektedir. Buna göre  $n$  oluşturulacak çizgelerin düğüm sayısını,  $\lambda$  çizgenin yoğunluğunu,  $\mu$  bloke ayırt yoğunluğunu ifade etmek için kullanılan notasyonlardır.  $\lambda \in [0,1]$  çizgedeki ayırt sayısının tam çizgeye kıyasla oranını belirtir.  $\mu \in [0,1]$  ise bloke (hasarlı) ayırt oranını ifade eder. Örneğin; deney 11’de  $n = |N| = 20$  adet düğüm,  $|A| = [n \cdot$

$(n - 1)/2 \cdot \lambda] = 47$  adet toplam ayrıta ve  $|A^D| = [|A| \cdot \mu] = 23$  adet bloke ayrıta sahip 500 rasgele çizge oluşturulmuştur. Çizgelerde ayrıtların maliyetleri için  $c_{i,j}$  değerleri (0,10) arasında rasgele reel sayılar, hasarlı ayrıtların restorasyon süreleri için  $r_{i,j}$  değerleri [1,8] arasında rasgele tamsayılar olarak seçilmiştir. Ayrıca her çizgenin bağlantılı olması (tek parçalık) ve her bir düğüme bağlantılı en az iki ayrıt olması (yedeklilik) sağlanmıştır.

Her bir deneydeki 500 rastgele çizge, yukarıda bahsedilen kurallara uygun bir şekilde Python kodu ile oluşturulmuştur. Daha sonra her bir çizge hem problemin TSP modeli hem de tanımlanmış sezgisel metotlar kullanılarak çözdürülmüştür. TPS modeli, Python'da Gurobi 9.1 çözücüsünün kütüphanesi kullanılarak kodlanmış ve Windows 10 işletim sistemli, Intel Core i7 işlemcili, 16 GB ön bellekli bir bilgisayarda koşturulmuştur. Her bir çizgenin TSP modeli ile çözümü için 600 saniyelik (10 dk.) zaman limiti konmuştur. Tüm sezgiseller Python'da kodlanmış ve her birinden elde edilen çözümler Tablo 1'de görülebileceği gibi TSP modelinin bulduğu optimal çözümler ile kıyaslanarak başarımları ölçülmüştür.

Tablo 1'e göre deneylerin büyük kısmında tüm 500 çizge için optimal çözüm elde edilebilmiştir. Örneğin zaman limiti içinde en az sayıda optimal çözüm bulunan 15 numaralı deneyde rastgele oluşturulmuş 500 çizgelgenin 453 adeti için optimal çözüm elde edilmiştir. Bu 453 çizge için TSP modelinin optimal sonuca ulaşana kadar gerek duyduğu koşturma süresi ortalama 365 saniye olarak ölçülmüştür. Beklendiği gibi çizgenin boyutu büyüdükçe problemin TSP modeli ile çözüm süresi hızla artmaktadır. Tablonun son 7 sütununda sezgisellerin elde ettiği çözümlerin optimal çözümlerle kıyaslanması ile elde edilen ortalama optimallik açıkları verilmiştir. Örneğin 15 numaralı deneyde S2 sezgiseli optimal çözüm elde edilebilen 453 çizgelge için ortalamada optimal çözümden %39 daha büyük *KU* değerleri elde etmiştir. Son sütunda her deney için en iyi ortalama optimallik açıklarına ulaşan sezgisel verilmiştir. Görüleceği üzere S3 sezgiseli diğer sezgisellere kıyasla kayda değer bir şekilde üstün performans göstermiştir. Diğer bir deyişle, her bir restorasyon işleminden önce yol ağının mevcut hali için birim zamanda minimum kapsayan ağaç maliyetini en çok iyileştiren ayrıtın restore edilmesi, rastgele oluşturulan senaryoların çoğunda optmale en yakın (ortalamada optimalden %11 uzak olan) sonuçları vermiştir.

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Enkazın yollardan geçici olarak kaldırılması sadece hayatın normale dönmesi için değil, aynı zamanda yardıma ihtiyacı olan kişilere zamanında erişilmesi için de hayati öneme sahiptir. Bu nedenle deprem gibi afetlerin ilk müdahale ve insani yardım ekipleri üzerindeki olumsuz etkisini azaltmanın en etkili yollarından biri, afet enkazı nedeniyle bloke olan yol ağlarının zamanında ve verimli bir şekilde restore edilmesidir. Bu amaçla Dinamik Kapsayan Ağaç Restorasyon (DKAR) problemi tanımlanmıştır. DKAR problemi için bir dizi sezgisel yöntem önerilmiş ve bu sezgisellerin performansı rastgele bloke yol ağı senaryoları ile ölçülmüştür. Gelecekte bu sezgisellerin gerçek yol ağları ve gerçeğe yakın modellenen yol ağı enkaz senaryoları ile test edilmesi planlanmaktadır.

## Teşekkür

Bu bildiri metni, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, Deprem Araştırmaları Çağrısı kapsamında desteklenen 121M851 numaralı projenin bir çıktısıdır.

## KAYNAKLAR

- Ahuja RK, Magnanti TL, Orlin JB (1993) *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications* 1<sup>st</sup> Ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey
- Çelik M, Ergun Ö, Keskinocak P (2015) "The Post-Disaster Debris Clearance Problem Under Incomplete Information," *Operations Research*, 63(1):65-85
- Fraser C (2010) "Haitians show fortitude in face of disaster," *BBC*, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/-8476185.stm> Son erişim tarihi: 10 Mart 2021
- Özdamar L, Aksu DT, Ergüneş B (2014) "Coordinating Debris Clean-up Operations in Post Disaster Road Networks," *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4):249-262

## MEVCUT BİNALARIN DEPREM RİSKİ TESPİTİNDE İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİNİN YAKLAŞIMI

### APPROACH OF ISTANBUL METROPOLITAN MUNICIPALITY ON SEISMIC RISK ASSESSMENT OF EXISTING BUILDINGS

Hasan Hüseyin Aydoğdu<sup>1,2</sup>, Özlem Tut<sup>3</sup>, Alper İlki<sup>4</sup>

#### ÖZET

*İstanbul'da 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş yaklaşık 800000 bina bulunmaktadır. Bu binaların önemli bölümü ciddi bir mühendislik hizmeti almamış ve projesine uygun inşa edilmemiş olup genellikle malzeme dayanımları ve konstrüktif detaylar açısından problemli ve tabi oldukları Deprem Yönetmeliklerinin şartlarını dahi sağlamamaktadır. Bu binaların deprem güvenliklerinin hızlı, ekonomik ve aynı zamanda akademik olarak tutarlılığı kanıtlanmış yöntemlerle bir an önce incelenmesi; kaçınılmaz olarak büyük bir çoğunluğu riskli çıkacak bu binalar için bir önceliklendirme sisteminin tanımlanması gerekmektedir. Bu inceleme sırasında, güncellenmiş olan Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre deprem talebinde ortaya çıkan değişimler ile yaşanan bu binalarda zamana bağlı ortaya çıkmış olan dayanım kayıpları da dikkate alınmalıdır. Bu doğrultuda, 2019 yılında ilan edilen Deprem Seferberlik Planı ile birlikte İstanbul Genelinde 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş yapıların mekanik tabanlı PERA2019 hızlı deprem performans değerlendirme yöntemiyle incelenmesine başlanmıştır. Şu ana kadar 100000'e yakın binaya ziyaret gerçekleştirilmiş, yaklaşık 30000 binadan bilgi toplanmıştır. Bu çalışma kapsamında, bahse konu miktardaki yapı ölçeğinde gerçekleştirilmiş çalışmaların koordine edilebilmesi, binalardan toplanan bilgilerin sisteme kesintisiz olarak aktarılabilmesi, iş yükünün en aza indirilerek yapısal hesaplamaların toplu bir şekilde gerçekleştirilebilmesi adına İstanbul Şehircilik Atölyesi Müdürlüğümüzce geliştirilen Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) uygulamaları ve yapısal analiz yazılımları derlenmiş; bu araçların çalışmaların gerçekleştirilebilmesine olan katkıları irdelenmiştir. Ayrıca, yapılan incelemeler sonucunda ulaşılan ilk sonuçlar da kısaca özetlenmiştir. Anahtar Kelimeler: Deprem, Yapı stoku, Sismik risk, Yapısal analiz.*

#### ABSTRACT

*In Istanbul, approximately 800000 buildings were constructed before the year 2000. Experiences from past earthquakes indicate that a significant amount of those buildings have grave structural deficiencies that may lead to huge economic losses or loss of many lives during future seismic events. Having such defects, the building stock of Istanbul must urgently be assessed in terms of seismic risk on an individual building scale. However, performing code-based detailed investigations for such a high number of buildings is not efficient both in terms of time and cost. In addition, such an investigation according to current regulations will likely demonstrate that majority of the buildings constructed before the year 2000 are to be classified as risky rather than prioritizing the buildings in terms of their risks. To respond to the urgency of the problem and reduce the problem to a manageable scale through a rational prioritization, a widespread structural investigation through a rapid, economical yet reliable assessment method and risk prioritization*

<sup>1</sup> Müdür Yardımcısı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Şehircilik Atölyesi Müdürlüğü, İstanbul, huseyin.aydogdu@ibb.gov.tr

<sup>2</sup> Doktora Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, aydogduha@itu.edu.tr

<sup>3</sup> Daire Başkanı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, İstanbul, ozlem.tut@ibb.gov.tr

<sup>4</sup> Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, ailki@itu.edu.tr

*must be performed. In the scope of this approach, technical teams trained and coordinated by Istanbul Metropolitan Municipality have visited nearly 100000 residential buildings and performed structural investigations on approximately 30000 buildings in Istanbul. The Geographic Information System tools and software algorithms to collect structural data on site and coordinate the site works are presented in this paper, as well as the preliminary results of the site works and the rapid seismic safety assessment analyses.*

Keywords: Earthquake, Seismic risk, Structural analysis, Building inventory.

## GİRİŞ

Türkiye’de 1960’lı yıllara kadar %30’un altında olan kentsel nüfus oranı, bu dönemden sonra artmaya başlamış, bu artış 1970’li yıllarla birlikte doruğa ulaşmıştır. Kentlerde artan göç yüküne karşılık verecek miktarda konut bulunmaması hızlı ve kontrolsüz bir yapılaşmayı beraberinde getirmiş, birçok konut türü bina mühendislik hizmeti almadan ve herhangi bir kontrol mekanizmasına tabi tutulmadan üretilmiştir. Bahse konu binalar yoğunlukla tabi oldukları yapısal yönetmeliklere uyulmadan inşa edilmiş, mühendislik hizmeti alan yapıların önemli bir kısmında da projelerine uygun olmayan imalatlar yapılmıştır. Bunun yanında, bahse konu yapıların önemli bir kısmı İstanbul’un ilk kez birinci derece deprem bölgesi olarak tanımlandığı 1996 Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ve ilk defa kapasite tasarımı ilkelerinin tanımlandığı 1998 Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik öncesinde inşa edilmiştir. 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde meydana gelen kayıpların yarattığı bilinçlenme, malzeme teknolojisinin ilerlemesi, deprem mühendisliği alanındaki bilgi birikiminin ilerlemesi ve 2001 yılında yürürlüğe giren Yapı Denetimi Kanunu göz önüne alındığında, 2000 yılı sonrası projelendirilip, inşa edilmiş olan binaların deprem güvenliklerinin genel olarak daha eski yapılara göre yüksek olduğu, 2000 yılı öncesinde inşa edilen binaların ise daha yüksek riskleri öne çıktığı görülmektedir. Gelecekte İstanbul’u etkilemesi olası bir depremde can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi ve risk azaltma çalışmalarında kaynakların en verimli şekilde değerlendirilebilmesi için söz konusu görece yüksek riskli bina stokunun yapısal olarak incelenmesi gerekmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi verilerine göre yaklaşık 800000 binayı barındıran bu stokun, yürürlükteki yönetmeliklere göre incelenmesi zaman ve maliyet açısından pratik olmamaktadır. Dahası, bu binaların önemli bölümünün, yapıldığı dönemin yönetmelik şartlarına uygun imal edilmiş olsalar dahi, yürürlükteki teknik dökümanlara göre bir değerlendirme yapıldığında, riskli çıkması kaçınılmazdır. İstanbul Deprem Master Planı (2003) bu doğrultuda kademeli bir değerlendirme yaklaşımı tanımlamış; bahse konu bina stokunun tamamına yakını hakkında alınacak kararın, binaların içerisinden taşıyıcı sistem bilgilerinin toplandığı ve mekanik hesaplamalar yapılan ikinci kademe değerlendirme aşamasında alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda geçmişte, yoğunluğu sokak taraması seviyesinde olmak üzere İstanbul’un Zeytinburnu, Fatih, Küçükçekmece, Bahçelievler, Güngören ve Bayrampaşa ilçelerinde; İzmir’de ise Balçova ve Seferihisar ilçelerinde tarama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2019 yılında İstanbul Büyükşehir Belediye Meclisinde ilan edilen Deprem Seferberlik Planı kapsamında, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş binaların taranması çalışmalarına başlanmıştır. Akademik bir çerçeve içerisinde gerçekleştirilen pilot çalışmayla Hassan ve Sözen (1997), PERA (İlki vd., 2014), P25 (Bal vd., 2007), DURTES (Temur, 2006), FEMA-154 (2015), Sucuoğlu (2007) gibi hızlı tarama yöntemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) veya Riskli Bina Tespit Esasları (RBTE, 2019)’a göre gerçekleştirilen detaylı değerlendirme analizlerine kıyasla tutarlılıkları İBB’ye ait hizmet binaları üzerinde incelenmiş, yaklaşık 200 bina için yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda az ve orta katlı (1-10 Kat) betonarme çerçeve ve perde-çerçeve taşıyıcı sisteme sahip binalar için İlki vd. (2014) tarafından geliştirilen ve pilot çalışma kapsamında güncellenen mekanik tabanlı PERA2019 yöntemi (İlki vd., 2021) analiz yöntemi olarak tercih edilmiştir. Bu tercihte PERA2019 yönteminin detaylı inceleme yöntemleri ile gösterdiği uyumla birlikte gerektirdiği saha çalışmalarının projenin ölçeği ve kapsamı için süre ve maliyet açısından optimum aralıkta olması rol oynamıştır. Yöntemin uygulanmasıyla birlikte,

binaların Riskli Bina Tespit Esasları (2019) tarafından “riskli” olarak tanımlanmamaları için karşılamaları gereken yer ivmesini hangi düzeyde/oranda karşılayabildiğini belirten Deprem Güvenliği Oranı (DGO) değeri hesaplanmış ve yapı stoku DGO değeriğine göre 5 farklı risk sınıfına (Tablo-1) ayrılarak binalar kendi aralarında önceliklerine göre sıralandırılmıştır.

Tablo 1. DGO değeriğine bağlı risk sınıfları.

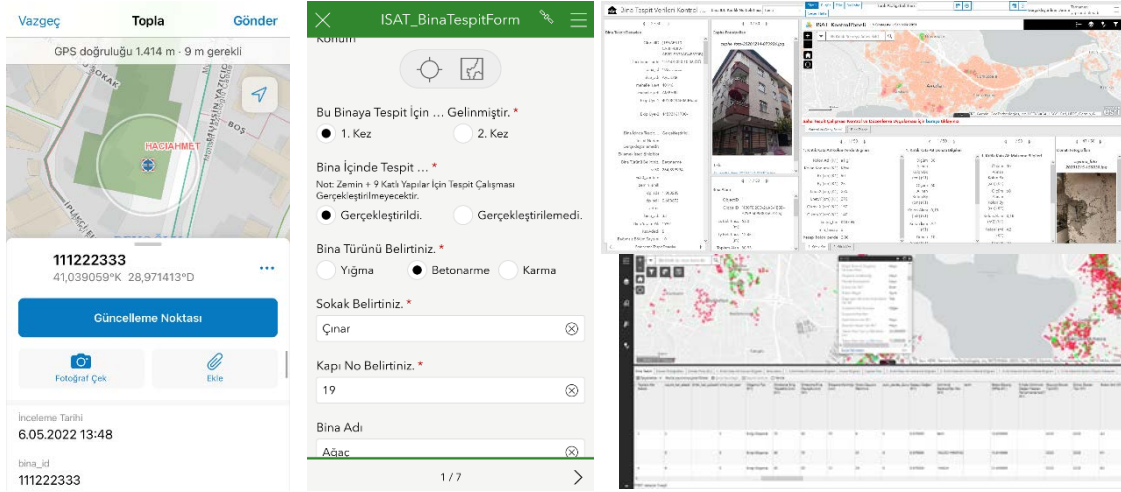
| DGO (%) | Risk Sınıfı | Risk Düzeyi     |
|---------|-------------|-----------------|
| ≥100    | A           | Düşük Risk      |
| 75-100  | B           | Düşük Risk      |
| 50-75   | C           | Orta Risk       |
| 25-50   | D           | Yüksek Risk     |
| <25     | E           | Çok Yüksek Risk |

Gerçekleştirilen çalışmanın büyüklüğü gereği, çalışmaları kolaylaştıracak CBS uygulamaları ve hesaplama yazılımları geliştirilmiştir. Saha çalışmalarının organizasyonu, gidilecek binaların atanması, bu binalardan bilgi toplanması ve bu bilgilerin veri tabanına aktarımı için CBS tabanlı uygulamalarda uygun anketler ve arayüzler geliştirilmiş, ayrıca çevrimiçi çalışan bilgi ve kontrol panelleri hazırlanmıştır. On binlerce binadan toplanan verilerin PERA2019 metodu kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analize aktarılması, artımsal olarak dikkate alınan deprem talepleri altında yapıların risk sınıflarının hesaplanarak eşzamanlı olarak sonuçların veri tabanına işlenmesi, CBS uygulamalarına uyumlu uzantılarla harita çıktıları oluşturulması ve İstanbul geneline yönelik tahmin çalışmaları yapılması için yeni yazılımlar ve algoritmalar oluşturulmuştur. Bu bildiride İstanbul Şehircilik Atölyesi Müdürlüğüne geliştirilmekte olan uygulamalar irdelenmiş ve elde edilen sonuçların kısa bir özeti sunulmuştur.

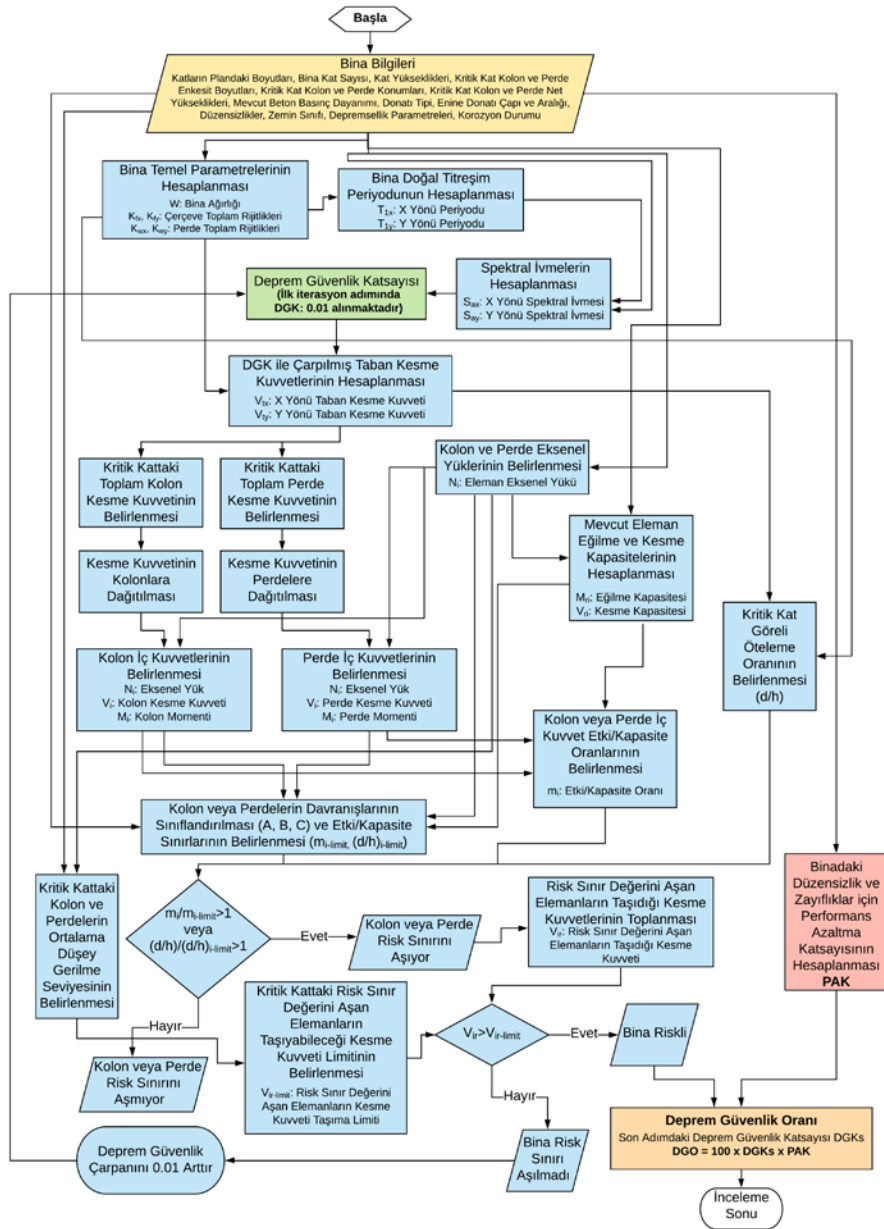
## GELİŞTİRİLEN ALGORİTMA VE CBS ARAÇLARI

Çalışma kapsamında ziyaret edilen binalara ait mekansal verilerin saha ekiplerine iletilebilmesi için CBS uygulamaları kullanılmıştır. Müdürlüğümüz bünyesinde oluşturulan CBS portalı üzerinde ekip üyelerinin tamamına kullanıcı hesabı tanımlanmıştır. Kullanıcı bazında ziyaret için tanımlanan binalar, iş atamaları oluşturulan panel üzerinde hesaplara tanımlanmıştır. Kullanıcılar, atanan binalara uygulama üzerinden yol tarifi alabilmekte, böylece adres hatalarının önüne geçilmektedir. Bilgi toplama safhasında hazırlanan anketler uygulama üzerinden portala aktarılmaktadır. Portala aktarılan veriler taşınabilir cihazlar için hazırlanan uygulamalardan, masaüstü CBS uygulamalarından ve çevrimiçi kontrol panellerinden izlenebilmektedir. Adı geçen uygulama ve arayüzlere ilişkin örnek görseller Şekil 1’de verilmiştir. Sahada binalara ilişkin toplanan bilgiler bir ana katmanda toplanmakta; binalara ilişkin kat ebatları, kolon/perde bilgileri, malzeme dayanımı, donatı dağılımı, bölme duvar bilgileri ilişkili tablolar halinde tutulmaktadır.

On binlerce binanın incelendiği ve kontroller sonrasında sonuçlarının düzenli olarak güncellendiği bu çalışma için sonuç hesaplamalarının her bina için el ile yapılmasının mümkün olmadığı açıktır. Dahası, uygulanan PERA2019 yönteminde binanın sismik risk sınıfı iki doğrultuda artımsal bir iterasyonla belirlenmekte olup, yöntemin uygulanması sırasında takip edilen akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. İterasyonun ilk adımında, dikkate alınan ivme talebinin (binaların Riskli Bina Tespit Esasları (2019) tarafından “riskli” olarak tanımlanmamaları için karşılamaları gereken yer ivmesinin) %1’i düzeyinde yükleme yapılmakta, binanın risk sınırını aşmadığı her adımda ilgili katsayı %1 artırılmakta ve algoritma yeniden uygulanmaktadır. Bu durum, yönetmelik talebini sağlayan bir binanın en az 100 kere analiz edilmesine neden olmakta ve çalışmaya özel bir algoritma ile yazılım oluşturulması ihtiyacını artırmaktadır.



Şekil 1. Müdürlüğümüz çalışmaları için geliştirilen CBS araçları ve çevrimiçi kullanıcı panelleri.

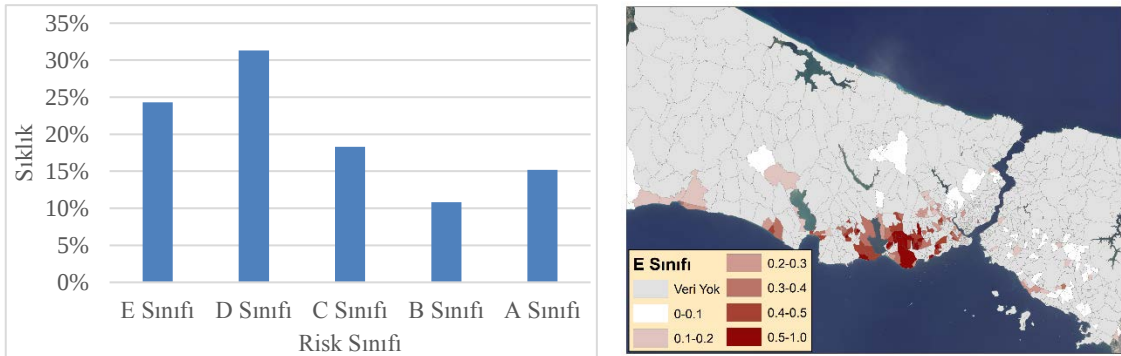


Şekil 2. PERA2019 hızlı değerlendirme yöntemi akış şeması (İlki vd., 2021).

Çalışmalar kapsamında ihtiyaca karşılık verebilecek bir algoritma Matlab ve Python dilleri kullanılarak iki farklı formatta yazılmıştır. Algoritma, veri tabanındaki binaların sırayla, ilgili öznelik tabolarından bilgilerinin çekilerek artımsal deprem etkileri altında PERA2019 yöntemiyle incelenmesini sağlamaktadır. Hazırlanan yazılım ile DGO değeri hesaplanan her binaya ait koordinatlı nokta verisi CBS katmanına işlenmekte, çıktı olarak ilçe ve mahalle bazında oluşturulan ısı haritalarıyla risk seviyelerine karşılık gelen bina yoğunlukları oluşturulmaktadır.

## İNCELEME SONUÇLARININ İRDELENMESİ

İstanbul’u depreme hazırlamak İBB’nin en önemli sorumluluklarından birisidir. Adil, yeşil ve yaratıcı şehir, mutlu İstanbullu vizyonuna sahip 2020-2024 İstanbul Stratejik Planının “Nitelikli ve Fonksiyonel Yaşam Alanları Geliştirerek Dayanıklı Bir Şehir Oluşturmak” ve 2019 yılında ilan edilen Deprem Seferberlik Planının “Afet Odaklı Kentsel Dönüşüm Çalışmaları” içindeki “Hasar Alacak Binalara Noktasal Müdahale” hedefleri doğrultusunda; İstanbul Büyükşehir Belediyesince 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş binaların hızlı ve tutarlı bir şekilde deprem güvenliklerinin belirlenmesi çalışmaları sürdürülmektedir. Bu kapsamda ilk aşamada incelemesi tamamlanan betonarme taşıyıcı sisteme sahip yaklaşık 23000 binanın DGO düzeyi PERA2019 yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmalar kapsamında 37 ilçedeki binalar ziyaret edilmiş olup; ziyaret edilen binalar ilçe genelindeki yapı stokunun, depremsellik ile zemin parametrelerinin genel özelliklerini yansıtacak şekilde seçilmiştir. Talep olarak “İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminlerinin Güncellenmesi Projesi (Çaktı vd. 2019)” raporunda tanımlanmış olan  $M_w = 7.5$  büyüklüğündeki senaryo depremine ait depremsellik parametreleri; zemin sınıfı bilgisi olarak Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından tamamlanan Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Projesi (2009) ve Anadolu Yakası Mikrobölgeleme Projesi (2009) verileri kullanılmıştır. Tespit ve analiz çalışmalarının ardından tahmin edilmiş olan yaklaşık 23000 betonarme binaya ait risk sınıfı dağılımı ve E-Çok Yüksek Risk sınıfında bulunan binaların yoğunluğuna ait ısı haritası Şekil 3’te verilmektedir.



Şekil 3. İncelenen binalara ait risk sınıfı dağılımları ve E risk sınıfındaki bina yoğunluğunu gösterir ısı haritası.

Saha çalışması sonuçlarına göre; incelenen yaklaşık 23000 binanın %85'i senaryo depremi talebini karşılayamamakta (bir başka ifade ile RBTE (2019) performans kriterlerine göre riskli bulunmakta), her dört binadan biri ise söz konusu yer hareketi talebinin %25'inden daha azını karşılayabilmekte ve Tablo 1'e göre E risk sınıfında yer almaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında İstanbul'un yapı stokunun önemli bir çoğunluğunu oluşturan standart altı yapıların adrese dayalı risk sınıflandırmalarının yapılmasına yönelik İstanbul Büyükşehir Belediyesince gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmaların verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi

için hazırlanan araçlar derlenmiştir. Ardından elde edilen ilk sonuçlarla ilgili kısa bilgi verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlanması neticesinde, büyük bir çoğunluğunun yürürlükteki mevzuat çerçevesinde incelendiğinde riskli çıkması kaçınılmaz olan 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş binalar için bir önceliklendirme yapma gerekliliği ve yürürlükteki mevzuatta bu konuda iyileştirme yapabilme potansiyeli bulunduğu ortaya çıkmıştır. Yapılacak önceliklendirme ile kaynakların etkin kullanımı sağlanabilecek, risk azaltma çalışmalarında harcanan emekler can kaybı yaratma ihtimali en yüksek olan yapılar odaklanabilecektir. Bununla birlikte, Şekil 1’de verilen sonuçların İstanbul genelini temsil etmediği ve önemli bölümü görece yüksek depremsellik bölgelerinde yer alan incelenen 23000 binaya ait olduğu unutulmamalıdır. Sunulan çalışmanın devam ettirilmesine paralel olarak, elde edilen sonuçlardan da yararlanarak, İstanbul genelindeki bina bazlı risk durumunun daha hızlı ve ekonomik şekilde tahmin edilmesine yönelik ilave çalışmalar da devam etmektedir.

## Teşekkür

İstanbul genelinde gerçekleştirilen tarama çalışmalarının şekillenmesinde sundukları değerli katkılardan dolayı Mehmet Nuray Aydınoglu, Zekai Celep, Ufuk Yazgan, Kutay Orakçal, Nusret Suna, Recep İyisan, Mustafa Erdik, Cem Demir, Mustafa Cömert, İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Deprem Vakfı ve İstanbul Şehircilik Atölyesi Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Anadolu Yakası Mikrobölgeleme Raporu (2009), İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (1998). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Raporu (2009), İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- Bal, I.E., Tezcan, S.S. and Gulay, G. (2007). P25 scoring method for defining rapidly the collapse vulnerability of rc structures. Sixth National Conference on Earthquake Engineering, October 16-20, 661-674, Istanbul, Turkey.
- Çaktı, E., Şafak, E., Hancılar, U. ve Şeşetyan, K., (2019). İstanbul ili olası deprem kayıp tahminlerinin güncellenmesi, Teknik Rapor, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- FEMA-154 (2015). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Third Edition, FEMA 154, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Hassan, A.F. and Sozen M.A. (1997). Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, *ACI Structural Journal*, 94(1): 31 - 39.
- Ilki, A., Comert, M., Demir, C., Orakcal, K., Ulugtekin, D., Tapan, M., Kumbasar, N., (2014). “Performance based rapid seismic assessment method (PERA) for reinforced concrete frame buildings”, *Advances in Structural Engineering*, 17, 3, 439-459.
- Ilki, A., Kahraman, T., Ozkan, S., Aydoğdu, H.H., Demir, C., Comert, M., (2021). “Seismic Risk Assessment of Building Stock in Istanbul”, *Proceedings, 14th International Congress on Advanced in Civil Engineering*, 6-8 September 2021, İstanbul.
- İstanbul Deprem Master Planı (2003), İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- Kaplan, O., Guney, Y., Topcu, A. and Ozelikors, Y. (2017). A rapid seismic safety assessment method for mid-rise reinforced concrete buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-27
- Riskli Bina Tespit Esasları (RBTE), (2019). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Sucuoglu, H., Yazgan, U. and Yakut, A., (2007). A Screening Procedure for Seismic Risk Assessment in Urban Building Stocks. *Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA*. 23. 10.1193/1.2720931.
- Temur, R. (2006). Hızlı durum tespit (DURTES) yöntemi ve bilgisayar programının geliştirilmesi. Master Thesis, İstanbul University, İstanbul, Turkey.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

## BİLGİSAYARLI GÖRÜ DESTEKLİ ÇOKLU-İHA ARAMA-KURTARMA SİSTEMİ

### COMPUTER-VISION AIDED MULTI-UAV SEARCH AND RESCUE SYSTEM

Evşen Yanmaz Adam<sup>1</sup> ve Hazım Kemal Ekenel<sup>2</sup>

#### ÖZET

*Çalışmanın temel amacı, Deprem Sonrası Arama ve Kurtarma (AvK) uygulaması çerçevesinde çoklu-İHA sistemleri için haberleşme, algılama, eylem gereksinimleri ve koordinasyonun bütünlüklü tasarımıdır. Afet Yönetim Ekibine gerçek-zamanlı veri-iletimi, İHA sürülerinde veri analizi ve gözleme dayalı koordinasyon hedeflenmektedir. Çalışmanın temel amaçları şu şekilde sıralanabilir: (1) haberleşme, koordinasyon ve görüşe dayalı algılama bileşeninin eşzamanlı optimizasyonu; (2) derin öğrenme ve bilgisayarlı görüşe dayalı veri analizi, nesne tanıma ve sınıflandırma; (3) AvK hedeflerine yönelik görevlerin adaptif olarak belirlenerek çoklu-İHA rota planlama algoritmalarının tasarlanması. Haberleşme ve algılamaya dayalı koordinasyon çok-amaçlı çoklu optimizasyon problemi olarak modellenirken, İHA'lara arama ve haberleşme görevlerinin dinamik olarak atanmasını sağlayan farklı rota planlama yöntemleri incelenmektedir. Ön değerlendirme sonuçlarımız kaynakların görevlere verimli bir şekilde atanmasının görev zamanı ve haberleşme açısından önemini vurgulamaktadır.*

Anahtar Kelimeler: dinamik İHA rota planlama, İHA-İHA haberleşmesi, bilgisayarlı görüş, depremde hasar ve afettede tespiti

#### ABSTRACT

*This work focuses on joint design of communication, sensing, action needs, and coordination configurations for a multi-drone system for Post-Earthquake Search and Rescue(SAR) applications. Our goal is to design and implement communication and coordination algorithms to enable self-organized teamwork within UAV swarms for real-time data delivery to Disaster Management entities and behavior-adaptation based on observations of on-board-sensors/human-operators. The approach consists of (1) jointly-optimized communication, coordination and sensing components for multi-UAV systems; (2) deep learning and computer vision based data processing, object detection and classification; (3) adaptive multi-UAV path-planning algorithms to minimize SAR mission time and network protocols to support team behaviour as well as disaster victims. Communication and sensing aware coordination is treated as a multi-target multi-objective optimization problem and different path-planning algorithms are proposed to dynamically assign search and communication tasks to UAVs. Our preliminary results show that efficient allocation of drones to tasks can play an important role in addressing search and connectivity trade-offs and achieving better mission times.*

Keywords: dynamic UAV path planning, drone-drone communication, computer vision, post-earthquake damage and people detection

#### GİRİŞ

Dron da denilen İnsansız Hava Araçları (İHA) sürülerinin gökyüzünü kaplayacağı günler, düşük maliyetli ve güvenilir küçük hava araçlarının birçok sivil uygulamada kullanılmasına yönelik artan taleple hızlı bir şekilde yaklaşmaktadır. Küçük ölçekli İHA'lar (örneğin çok motorlu robot helikopterler), uygulama kolaylığı, düşük devralma ve bakım maliyetleri, yüksek manevra ve hareket kabiliyetleri nedeniyle, sivil uygulamalar için pratik bir seçimdir. Bu tür araçlar çevre ve doğal afet

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Ü., Özyeğin Üniversitesi, İstanbul, evsen.yanmaz@ozyegin.edu.tr

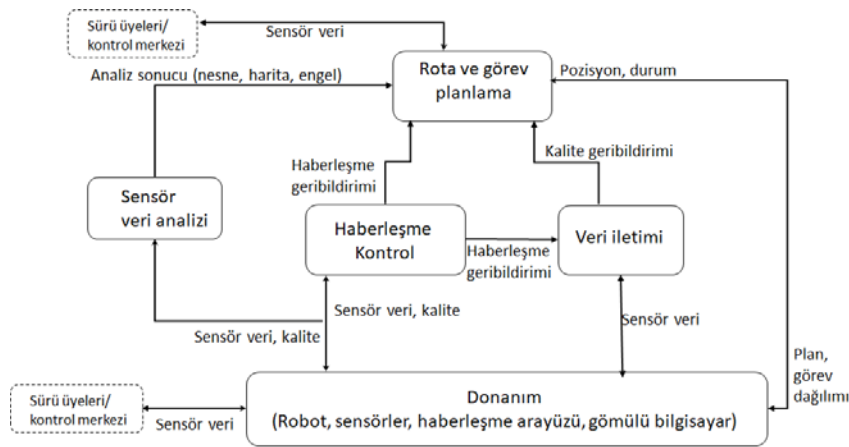
<sup>2</sup> Prof., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, ekenel@itu.edu.tr

izleme, sınır gözetimi, acil durum yardımı, arama ve kurtarma, malların teslimi ve inşaat gibi uygulamalar için kullanılmaktadır (Bekmezci vd., 2013; Hayat vd., 2016; Gupta vd., 2016; Skorobogatov vd., 2020). Dronların insani uygulamalarının başında arama ve kurtarma ve afet yönetimi çalışmaları gelmektedir. Doğal veya insan yapısı afetlerin yönetiminin temel aşamaları literatürde önleme, iyileştirme, hazırlık, müdahale şeklinde özetlenmiştir (Erdelji vd., 2017). Örneğin, dronlar i) *afet öncesinde* periyodik ortam taraması yaparak riskli alanları belirleyebilir; ii) *afet anında* farklı sensörlerle afet bölgesi hakkında yardım personeline gerçek-zamanlı doğru bilgi sağlayabilir ve afet personelinin öncelikli alanlara yönlendirilmesine yardımcı olabilir, veya depremde etkilenen bölgelere hizmet vermek için hava baz istasyonları olarak konuşlandırılabilir; iii) *afet sonrasında* hasar tespitinde kullanılabilirler (Quaralta vd., 2020; Ramchurn vd., 2016).

Çoklu-İHA sistemlerinin dört temel bileşeni şöyle sıralanabilir (Yanmaz vd., 2018): (i) çoklu İHA platformları, (ii) toplanan verileri analiz eden algılama bileşeni, (iii) İHA'lar arasında ve İHA'lar ile yer istasyonu arasında bağlantı sağlayan ağ bileşeni ve (iv) ortak bir görev hedefine ulaşmak için İHA'ların görevlerini organize eden koordinasyon bileşeni. Bu çalışmanın amacı, Deprem Sonrası Arama ve Kurtarma (AvK) uygulaması çerçevesinde çoklu-İHA sistemleri için haberleşme, algılama, eylem gereksinimleri ve koordinasyonun bütünlük tasarımıdır. Afet Yönetim Ekibine gerçek-zamanlı veri-iletimine ek olarak İHA sürülerinde veri analizi ve gözleme dayalı eylem adaptasyonunu sağlamaya yönelik adaptif haberleşme, algılama ve koordinasyon algoritmaları tasarlanıp uygulanacaktır. Böylelikle, haberleşme ve koordinasyona ait dağıtık kaynakların verimli olarak kullanılmasına, birlikte uzun süreli çalışabilirliğine ve işbirliğine olanak tanınacaktır.

### HABERLEŞMEYE VE ALGILAMAYA DUYARLI ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON

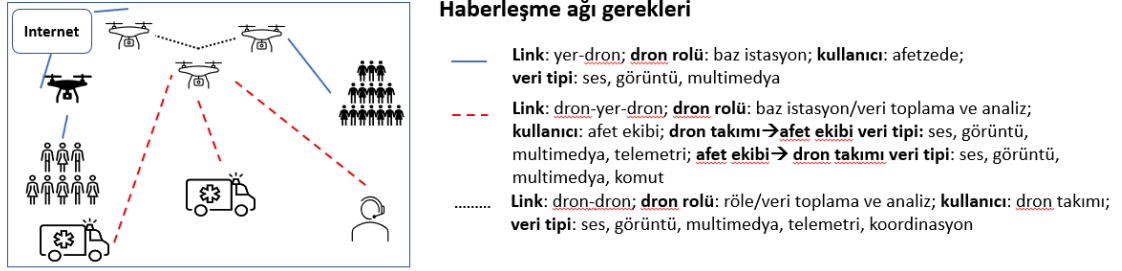
Önerilen çalışmada (1) haberleşme, koordinasyon ve görüşe dayalı algılama bileşeninin eşzamanlı optimizasyonu; (2) derin öğrenme ve bilgisayarlı görüşe dayalı veri analizi, nesne tanıma ve sınıflandırma; (3) AvK hedeflerine yönelik görevlerin adaptif olarak belirlenerek çoklu-İHA rota planlama algoritmalarının tasarlanması ile takım davranışını ve depremzedeleri destekleyecek çok-sekmeli İHA ağı kurulması hedeflenmektedir. Bu hedefe yönelik olarak İHA takımında ne zaman hangi verinin paylaşılacağına karar verecek, verilerin kalitesini belirleyerek görev güncellemesi yapacak, haberleşme ve arama-kurtarma görevlerini optimum olarak öncelikleyebilecek yenilikçi mekanizmalar geliştirilecektir. Farklı koordinasyon konfigürasyonları İHA takımıyla deprem sonrası AvK çerçevesinde bilgisayarlı görüşe dayalı nesne tanıma ve sınıflandırma amaçlı test edilecek ve önerilen algoritmalar sınama sonucuna göre optimize edilecektir. Gerekli koordinasyon mimarisinin geliştirilebilmesine yönelik takım üyelerindeki bileşenler ve bunların kontrol, planlama, haberleşme, veri analizi ve veri akışı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İHA takımı üyelerindeki bileşenler ve etkileşimleri

AvK görevi sırasında İHA'ların haberleşme hedefleri arasında İHA'lar arası ve İHA'lar ile afet yönetim ekibi arasındaki iletişimin sağlanmasının yanı sıra depremzedelere de bir haberleşme alt

yapısına bağımlı kalmaksızın dış dünya ile bağlantı kuracak şekilde çok-sekmeli adaptif haberleşme ağı kurulabilmesi de olacaktır. Bir başka deyişle çoklu-İHA sistemi hem bir haberleşme ağı hem de sensör ağı olarak görev yapacaktır. Bu sensör ağı ya da sistemin algılama bileşeni taranan alanları hasarlı/hasarsız olarak sınıflandıracak ve afet personelinin müdahale gerektiren alanlara güvenli bir şekilde ulaşmasını sağlayacak yer rotaları belirlenecektir. *Algılama bileşeni* açık alanlarda toplanmış insan topluluklarının yoğunluğunu da belirleyerek haberleşme bileşenine geri bildirim yapacaktır. Ortamın hem yapı, hem yol, hem de insan durumunun bilgisayarlı görüye dayalı analizi yapılarak algılanan veri haberleşme ve koordinasyon bileşenlerine geri beslenecektir. Algılama bileşeni kapsamında yüksek başarımlı bilgisayarla görü derin öğrenme modellerinin düşük işlemci, düşük hafıza ve pil kısıtına sahip İHA'lar üzerinde verimli çalışmalarını sağlayacak model sıkıştırma yöntemleri de geliştirilecektir. *Haberleşme bileşeni* görev bölgesindeki kablosuz haberleşme ağına bağımlı olmaksızın veri talebini belirlemekle yükümlü olacaktır. Haberleşme işlevselliği farklı QoS gereksinimlerine sahip veri trafiği türlerini desteklemeyi gerektirebilir (Şekil 2): (i) güvenli çalışma için İHA'lar arasındaki uzun menzilli, düşük hacimli kontrol ve koordinasyon verileri (örneğin, GPS koordinatları, rotadan sapma açıları, hız, yön, kalan enerji, görev güncellemeleri ve rota); (ii) QoS'i karşılayan İHA haberleşme ağı ve (iii) kullanıcılar arasındaki yüksek hacimli veriler (örneğin kurbanın durumunu takip etme veya depremzedelere haberleşme ağı desteği verme gibi). Haberleşme bileşeni tüm bu talepleri göz önüne alarak kısıtlı haberleşme kaynaklarını optimum şekilde kullanabilmek amacıyla koordinasyon bileşenine geri bildirim yapacaktır.



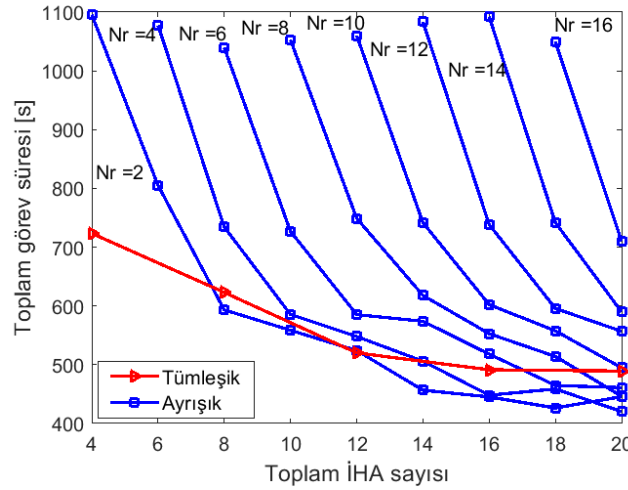
Şekil 2. Önerilen projede tanımlanan AvK için konuşlandırılan çoklu-dron sisteminde bağlantı tipi, dron rolü, kullanıcı ve veri tipi bakımından haberleşme ağı gerekleri

*Koordinasyon bileşeni* ise algılama ve haberleşme hedeflerinin eş zamanlı optimizasyonunu sağlayacak şekilde dronların adaptif rota planlamasından, kaynakların görevlere atanmasından ve dron-yer personeli iş birliğinde en doğru kararın verilmesinden sorumludur. Görev anında afet bölgesi algılama ve haberleşme bileşenleri bakış açısından farklı görünebilir. Algılama bileşeni taranan ortam boyutu, ortamın sınıflandırılması ve sınıflandırmanın kalitesine göre görev bölgesini öncelikleyebilecekken, haberleşme bileşeni ağ gereklerine göre algılama bileşeniyle örtüşmeyen bir görev önceliklendirmesi yapabilir. Bazen bu bileşenlerin hedefleri, eğer bileşenler bağımsız olarak tasarlanırsa, birbirleriyle tezat oluşturacak kararlar verilmesine neden olabilir. Bu nedenle tümleşik rota planlama çok-amaçlı optimizasyon problemi olarak modellenecektir. AvK ekibine afet yönetim stratejisi ve öncelikleri bakımından alternatif yaratmak amacıyla ayrışık ve tümleşik rota planlama yöntemleri incelenmektedir:

- *Ayrışık rota planlama:* Sensor ve haberleşme arayüzlü dronlar için haberleşme kısıtı altında arama ve ortam sınıflandırması görevleri bakımından optimize edilmiş rotalar planlanırken, ayrı bir dron röle ağı sistemdeki kullanıcıların haberleşme gerekleri bakımından optimize edilmektedir. Bu yaklaşımda amaç İHA'ların kontrol merkeziyle sürekli bağlantıda olmasını sağlamak ve haberleşme talepleri olan hedef bölgeleri algılama görevi ihmal edilmeden ağı bağlamaktır.
- *Tümleşik rota planlama:* Algılama ve haberleşme kısıtları rota planlamaya dahil edilmiştir. Amaç, haberleşme kopukluğuna neden olmayan en faydalı algılama konumları ile arama, karar verme ve kullanıcılara kaliteli hizmeti destekleyecek en iyi haberleşme konumlarını belirlemektir. Haberleşme ve algılama hedefleri ve kısıtları altında rota tasarımı ve görev atama ayrışık planlamaya göre daha çok hesap gücü gerektirebilir. Haberleşme ve algılama

hedefleri birbirleriyle çelişkili olabileceğinden görev bitirme zamanı ve ağ bağlantırlığı arasında ödünleşme gerekebilecektir.

Bu iki yaklaşımın tek hedef arama ve kurtarma görevi için performansları aşağıda karşılaştırılmıştır. Bu görevde, bir arama alanında rastgele bir noktada bulunan tek hedef (afetzedede grubu, hasarlı bölge vb.) işbirlikli İHA takımı tarafından tespit edilip, röle ağı ile yer istasyonuna en az sayıda dronla bağlanacaktır. Ayrışık yaklaşımda arama rotaları toplam mesafeyi minimize eden mTSP yöntemi ile hesaplanırken, röle İHA'ların rotaları ise (Yanmaz 2021)'de önerdiğimiz dinamik konumlama algoritması ile planlanmıştır. Tümlşik rota ise röle zinciri kurma süresi ve hedefi bulma süresini eş zamanlı olarak optimize etmektedir (Hayat vd., 2020). Şekil 3, 500mx1000m'lik bir alanda, dron hızları 2.5m/s, uçuş yüksekliği 50m, kamera yer algılama boyutu 50mx50m iken ayrışık ve tümlşik rota planlama yöntemlerinin toplam görev zamanı bakımından performansını göstermektedir. Her iki yöntem için toplam kullanılan dron sayısı eşit varsayılmış olup, ayrışık yöntemde bu dronların bir kısmı röle dronu olarak ayrılmıştır. Toplam görev zamanı dronların yerden kalkış yapmasından hedef ile yer kontrol merkezi arasında bir röle ağı oluşturulup, röle ağında görev yapmayan dronların kontrol merkezine geri dönmesine kadar ki süreyi kapsamaktadır.



Şekil 3. Ayrışık ve tümlşik rota planlama yöntemlerinin görev süreleri (Nr: ayrışık yöntemdeki röle sayısı.)

Sonuçlar kaynakların doğru görevlere atanmasının önemini vurgulamaktadır. Görevin hedeflerine bağlı olarak en uygun yaklaşım değişebilir. Amacımız birden fazla dinamik hedefin bulunup, sınıflandırılması olsa da hem ayrışık tasarımla minimum sayıda röle dronu ile haberleşme probleminin çözülebilmesi ve tümlşik tasarımla algılama bileşeninin rota planına dahil edilebilmesi bakımından cesaret vericidir.

## Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK ARDEB 1001 programı tarafından desteklenen 121E408 numaralı proje kapsamında yapılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., Temel, C. 2013. "Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey," Ad Hoc Networks, 11 (3), 1254–1270.
- Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K., and Akyildiz, I. 2017. "Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management," IEEE Pervasive Computing, 16, 24-32.
- Gupta, L., Jain, R., and Vaszkun, G. 2016. "Survey of important issues in UAV communication networks," IEEE Communications Surveys Tutorials, 18 (2), 1123-1152.
- Hayat, S., Yanmaz, E., Muzaffar, R. 2016. "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint," IEEE Communications Surveys Tutorials, 18 (4), 2624–2661.

- Hayat, S., Yanmaz, E., Bettstetter, C., and Brown, T.X. 2020. "Multi-objective drone path planning for search and rescue with quality-of-service requirements," *Auton. Robots*, 44, 1183-1198.
- Queralta, J.P., Taipalmaa, J., Pullinen, B.C., Sarker, V., Gia, T.N., Tenhunen, H., Gabbouj, M., Raitoharju, J., and Westerlund, T. 2020. "Collaborative Multi-Robot Systems for Search and Rescue: Coordination and Perception," *ArXiv*, abs/2008.12610.
- Ramchurn, S. D., Huynh, T. D., Wu, F., Ikuno, Y., Flann, J., Moreau, L., Fischer, J., Jiang, W., Rodden, T., Simpson, E., Reece, S., Roberts, S. and Jennings, N. R. 2016. "A disaster response system based on human-agent collectives," *Journal of Artificial Intelligence Research*, 57, 661-708.
- Skorobogatov, G., Barrado, C., and Salami, E. 2020. "Multiple UAV Systems: A Survey," *Unmanned Syst.*, 8, 149-169.
- Yanmaz, E., Yahyanejad, S., Rinner, B., Hellwagner, H., and Bettstetter, C. 2018. "Drone networks: Communications, coordination, and sensing," *Ad Hoc Networks*, 68, 1-15.
- Yanmaz, E. 2021. "Dynamic Relay Selection and Positioning for Cooperative UAV Networks," *IEEE Networking Letters*, 3 (3), 114-118.

## BİNALARDA DEPREM SONRASI HASAR TAHMİNİ İÇİN PERA2019 HIZLI DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ İLE BÜTÜNLEŞİK BİR İZLEME KONSEPTİ

### AN INTEGRATED MONITORING CONCEPT WITH PERA 2019 RAPID PERFORMANCE ASSESSMENT METHOD FOR POST-EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION IN BUILDINGS

Alper İlki<sup>1</sup>, Cem Demir<sup>2</sup>, Mustafa Cömert<sup>3</sup>, Ömer Faruk Halıcı<sup>4</sup>

#### ÖZET

Aktif deprem bölgesinde bulunan ülkemizde geçmiş yıllarda çok sayıda yıkıcı depremler meydana gelmiş ve depremler sonrasında birçok yapı için hasar tespiti işlemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Hasar tespiti işlemlerini hızlandırmak ve tespit sonuçlarını personelin mesleki tecrübesinden olabildiğince bağımsız hale getirmek adına mekanik esaslara dayanan nicel hasar tespit yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemler depremlerden sonra uygulanmıştır. Afet sonrası hasar tespit yöntemlerinin geliştirilmesindeki bir sonraki hedefin, gelişen teknolojik ekipmanlardan da yararlanılarak insandan daha da bağımsız olan ve hasar tespit sonucunu otomatik raporlayan sistemlerin geliştirilmesi olarak tanımlanmasının anlamlı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında bu hedef doğrultusunda kullanılacak bir hasar tahmin algoritması genel hatları ile sunulmuştur. Algoritmada binalar PERA2019-Performans Tabanlı Hızlı Deprem Güvenliği Belirleme) yöntemi kullanılarak deprem öncesinde değerlendirilecek ve binalara olay tabanlı çalışan ivmeölçer ve eğimölçer sensörleri barındıran Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri kurulacaktır. Deprem anında YSİ sistemleri zeminde ve yapıda meydana gelen ivmeleri ve eleman dönmelerini kaydedecektir. PERA2019 yöntemi ile deprem öncesinde yapılan hızlı inceleme ile ivme kapasitesi ve buna karşı gelen eleman dönmeleri yaklaşık olarak belirlenmiş olan yapılarda deprem anında ölçülen ivme ve dönmeler, sınır değerler ile karşılaştırılarak binanın hasar durumu otomatik olarak tahmin edilip ve raporlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Hasar tespiti, Yapı sağlığı izleme, Hızlı değerlendirme.

#### ABSTRACT

In Turkey, which is located in an active earthquake zone, destructive earthquakes have occurred in the past years after which post-earthquake damage assessment procedures were needed for many buildings. Quantitative damage assessment methods were developed based on mechanical principles in order to make the damage assessment procedures quicker and to make the assessment results objective and as independent as possible from the expertise of the inspection personnel. Observing the technological advancements in the Structural Health Monitoring (SHM) systems, which are being more accurate, cost-effective and easier to apply day by day, the next target in the development of post-earthquake damage assessment methods could be instinctively stated as developing systems that report the inspection results automatically and independently from human effect by benefitting the state-of-the-art SHM systems. In this paper, a damage estimation algorithm concept which can be used in line with this target is presented. In this algorithm, the seismic performance of buildings is rapidly (and approximately) evaluated before the earthquakes

<sup>1</sup> Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, ailki@itu.edu.tr

<sup>2</sup> Araş. Gör. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, demirce@itu.edu.tr

<sup>3</sup> Dr. Öğr. Üyesi., İstanbul Kültür Üniversitesi, m.comert@iku.edu.tr

<sup>4</sup> Araş. Gör., MEF Üniversitesi, halicio@mef.edu.tr

*according to PERA2019-Performance Based Rapid Assessment method; and event-based working SHM systems (i.e. accelerometer, inclinometer) will be installed on these buildings. In the event of an earthquake, SHM systems will record the accelerations and element rotations taking place on the ground and in the structure. The damage status of the building will be automatically estimated and reported by comparing the accelerations and rotations occurring at the time of the earthquake with the capacities of the buildings whose acceleration capacity and corresponding element rotations have been determined approximately by PERA2019 rapid assessment method before the earthquake.*

Keywords: Earthquake, Post-earthquake damage assessment, Structural health monitoring, Rapid performance assessment

## GİRİŞ

Yakın geçmişte ülkemizde ve dünyada birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir (örn., El Centro (1940), Mudurnu (1967), Mexico City (1985), Kobe (1995), Kocaeli (1999), L'Aquila (2009), Sumatra (2009), Elazığ (2010), Van (2011), Tohoku (2011), Yingjiang (2014)Puebla (2017), Elazığ (2020), İzmir (2020)). Yaşanan bu depremler, yapıların kısmen veya tamamen yıkılmasına sebep olup can kayıpları ve ekonomik olumsuzluklar ile sonuçlanmıştır. Geçmişteki depremlerden sonra yapılan saha incelemesi çalışmaları, afetler sonrasında hasar gören ve hasar tespiti gerektiren bina sayısının çok fazla olabileceğini göstermiştir (Erdik, 2000; Celep vd., 2010; Kazama & Noda, 2012; Tapan vd., 2013; Gürbüz vd., 2020). Bu duruma ek olarak, hasar tespiti çalışmalarında görev yapacak nitelikli personel sayısının kısıtlı olması, depremler sonrasında hasar tespiti çalışmalarının hızlı bir şekilde yapılmasını zorlaştırmakta ve toplumun günlük hayata dönüş süresini uzatmaktadır. Ülkemizde, Dinar (1995), Adana (1998), Kocaeli (1999) ve Düzce (1999), Van (2011) depremlerinden sonra yapılan hasar tespit incelemelerinde, inceleme yapan saha personelinin aynı tecrübe ve uzmanlık seviyesine sahip olmaması nedeniyle homojen bir hasar tespitinin zorluğu tecrübe edilmiştir. Bu durum, büyük depremlerden sonra tahliye edilen binaların afetzedelerin barınması için yeniden açılması ve can güvenliği açısından riskli olan binaların doğru bir şekilde belirlenmesi için güvenilir ve nicel esaslara dayalı bir hasar tespit prosedürüne olan ihtiyacı ortaya koymuştur. Bu durum uyarınca, ülkemizde uygulanmak üzere deprem sonrası hasar tespit algoritmaları geliştirilmiş ve yaşanan depremler sonrası hasar tespit çalışmalarında başarı ile uygulanmıştır (Boduroğlu vd., 2013; İlki vd., 2013; İlki vd., 2020; İlki vd., 2021a).

Ülkemizdeki mevcut bina stokunun büyük bir bölümü 2000 yılı öncesinde inşa edilen, geçmiş yönetmeliklerdeki görece daha düşük deprem taleplerine göre tasarlanmış ya da hiç mühendislik hizmeti görmemiş ve imalat kusurları içeren binalardan oluşmaktadır. 2019 yılında yayınlanan “İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminlerinin Güncellenmesi Projesi” (Çaktı vd., 2019) teknik raporunda İstanbul’daki 1166300 binanın yaklaşık %70’inin (~790000 bina) 2000 yılı öncesinde inşa edildiği ve büyük bir büyük bir çoğunluğunun yukarıda bahsedilen niteliklere sahip olduğu belirtilmiştir. Bu yapılar olası deprem etkileri altında gevrek davranış gösterip taşıyıcı sistem bütünlüğünü kaybetme riskine sahiptir. Yürürlükte olan mevcut mevzuata göre (örn. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018 ve Riskli Bina Tespit Esasları, 2019) bu binaların deprem güvenlik düzeylerinin değerlendirilmesi için detaylı saha incelemeleri ve kapsamlı yapısal analizler gerekmektedir. Bu nedenle, mevcut bina sayısı, değerlendirme çalışmaları için gereken süre, maliyetler ve durumun aciliyeti dikkate alındığında, mevcut mevzuatın içinde bulunduğumuz duruma uygulanabilir olmayacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu yönetmeliklerde tanımlanan şartları sağlamayan binaların hepsi aynı kategoride sınıflandırıldıkları için (örn. ‘Can güvenliği yok’, ‘Can güvenliği var’ ya da ‘Riskli’, ‘Risksiz’) binalar arası müdahale önceliklendirmesi yapmak mümkün olmamaktadır. Bu ihtiyaca cevap olarak, mevcut binaları hızlı, ekonomik ve gerçekçi bir şekilde değerlendirip derecelendirebilen PERA2019 (İlki vd., 2021b) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, daha önce 2014 yılında yayınlanmış olan PERA (İlki vd., 2014) yöntemine dayanmakta olup, PERA2019 yönteminde, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) yerine yenilenen Riskli Bina Tespit Esasları (2019) dikkate alınmış ve yöntemin kullanım alanının genişletilmesine imkan sağlayacak doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Günümüzde kullanılan hasar tespit yöntemleri hem hasar tespit işlemi süresi hem de gerekli insan kaynağı açısından geçmiş versiyonlara göre önemli ölçüde iyileştirilmiş olsa da hala yerinde gözlemlere ve personel koordinasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu metinde deprem sonrası hasar tahmin (mümkün olursa hasar tespit) işlemlerinin daha da hızlı yapılabilmesi ve günlük hayata daha hızlı dönülebilmesi adına Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri ve PERA2019 yönteminin entegre kullanıldığı bütünleşik bir deprem öncesi değerlendirme-izleme-deprem sonrası hasar tahmin konsepti sunulmuştur.

## PERA2019 HIZLI DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

PERA2019 yöntemi mekanik esaslara dayanmakta olup on kata kadar olan betonarme yapıların deprem güvenliklerinin değerlendirilmesi için geliştirilmiştir. Yöntem ile, sonlu eleman modeli kurulmadan, incelenen yapıdaki taşıyıcı sistem özellikleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak, kritik katta eleman bazında meydana gelecek iç kuvvetler ve eleman kapasiteleri, bununla birlikte yapı sisteminde meydana gelecek kat öteleme oranları belli bir yaklaşıklıkla hesaplanabilmektedir. PERA2019 yöntemi ile bina değerlendirmesi için toplanacak temel veriler Çizelge 1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** PERA2019 yöntemi için binalardan toplanan bilgiler ve kullanılabilecek yöntemler.

| Toplanan Veri                                                                                                                                                                                                       |                                                                              | Tespit Yöntemi                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bina konumu                                                                                                                                                                                                         |                                                                              | GPS, Halihazır Haritalar                                                                  |
| Bina geometrisi                                                                                                                                                                                                     | Bina kat sayısı ve kat isimleri                                              | Gözlemsel                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                     | Katların plandaki boyutları                                                  | Lazermetre, şerit metre                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                     | Kat yükseklikleri                                                            | Lazermetre, şerit metre                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                     | Kritik kat                                                                   | Gözlemsel                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                     | Kritik kat kolon ve perde net yükseklikleri                                  | Lazermetre, şerit metre                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                     | Kritik kat kolon ve perde en kesit boyutları                                 | Lazermetre, şerit metre                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                     | Kolon ve perde için plandaki konum bilgileri (Orta/kenar/köşe)               | Gözlemsel                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                     | Döşeme tipi ve yaygın kiriş boyutları                                        | Gözlemsel, şerit metre                                                                    |
| Mevcut beton basınç dayanımı                                                                                                                                                                                        |                                                                              | Tahratsız (örn., Schmidt çekici Ultrases) ve/veya tahribatlı(örn., karot basınç) deneyler |
| Kolon-Perde boyuna ve enine donatı detayları                                                                                                                                                                        |                                                                              | Gözlemsel, elektrikli kırıcı, paşometre, donatı tarama cihazı şerit metre, kumpas         |
| Taşıyıcı sistemdeki düzensizlikleri ve zayıflıklar (Düşey eleman süreksizliği, yumuşak-zayıf kat, planda çıkıntılar, bitişik bina ile döşeme seviyelerinde farklılıklar, burulma düzensizliği, döşeme süreksizliği) |                                                                              | Gözlemsel                                                                                 |
| Olası donatı korozyon düzeyinin tespiti                                                                                                                                                                             | Kritik katta boyuna ve enine donatılarda korozyon varsa çap kaybının yüzdesi | Gözlemsel, kumpas                                                                         |
| Depremselliğin belirlenmesi                                                                                                                                                                                         | Yerel zemin sınıfı                                                           | Mikrobölgeleme çalışmaları, varsa mevcut geoteknik raporlar veya $V_{s30}$ haritaları     |
|                                                                                                                                                                                                                     | Binanın konumundaki depremsellik parametreleri                               | Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları 2018                                                  |

PERA2019 yönteminde binanın hasar görme riskinin belirlenmesinde kullanılan Deprem Güvenlik Oranı (DGO) parametresi, binanın yatay ivme kapasitesinin depremde ortaya çıkacak ivme talebine oranlanması ile elde edilmektedir (Denklem 1). İvme talebi, binanın bulunduğu konum için bir senaryo depremi veya Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları (2018) dikkate alınarak en büyük yer ivmesi cinsinden ( $PGA_{Talep}$ ) belirlenmektedir. İvme kapasitesi ise, 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun” kapsamında riskli binaların tespit edilmesinde kullanılacak kuralları kapsayan Riskli Bina Tespit Esasları (RBTE, 2019) sınır değerleri ve kriterleri

dikkate alınarak yine en büyük yer ivmesi ( $PGA_{Kapasite}$ ) cinsinden hesaplanmaktadır.  $PGA_{Kapasite}$  belirlenirken, bina için hesaplanan ivme talebinin küçük bir yüzdesinden başlanarak adım adım arttırılan yatay ivmeler için RBTE (2019) kriterlerinin bina tarafından sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Binanın ilgili kriterleri sağladığı son ivme düzeyi binanın ivme kapasitesi olarak belirlenmektedir. Binalar için hesaplanan DGO değerleri kullanılarak binaları taşıdıkları deprem risk düzeyine bağlı olarak sınıflandırmak mümkün olmaktadır. DGO oranı azaldıkça binanın ağır hasar görme/yıkılma riski artmaktadır. DGO oranlarına göre hazırlanan sınıflandırma sistemi Çizelge 2’de gösterilmiştir. PERA2019 yöntemi bugüne kadar İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 20000’den fazla binanın deprem risk değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

$$DGO (\%) = 100 \times \frac{PGA_{Kapasite}}{PGA_{Talep}} \quad (1)$$

**Çizelge 2.** DGO değerine bağlı olarak tanımlanan ve ağır hasar görme/yıkılma riskini ifade eden deprem risk sınıfları.

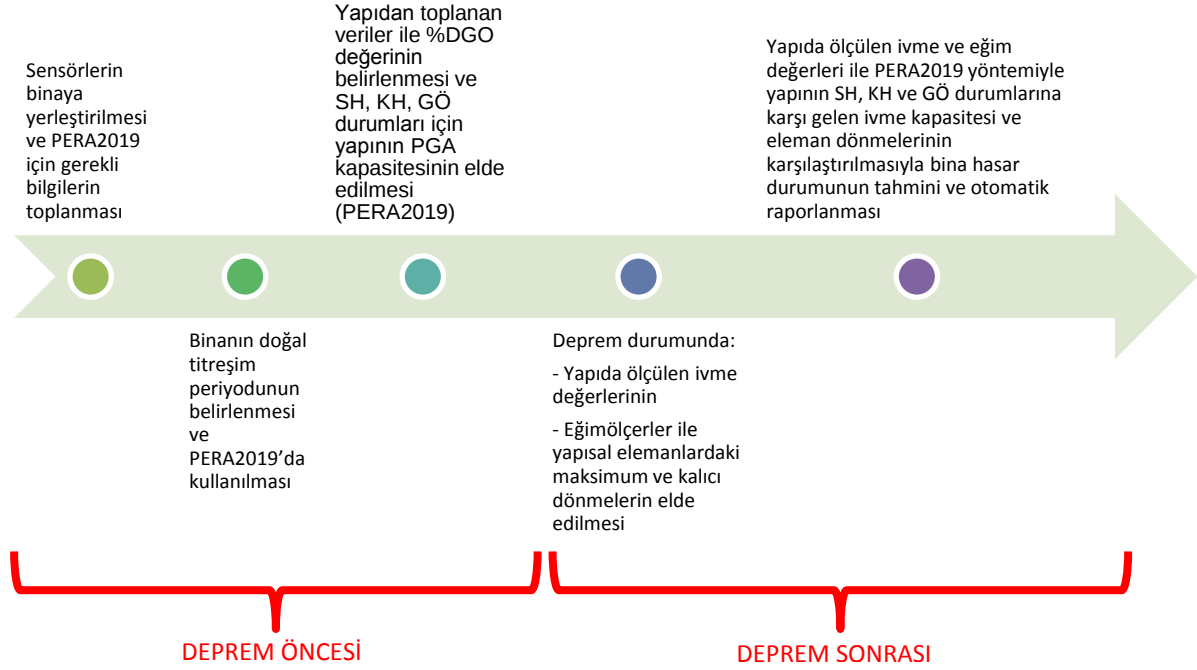
| DGO (%)    | Risk Sınıfı | Risk Düzeyi     |
|------------|-------------|-----------------|
| $\geq 100$ | A           | Düşük Risk      |
| 75-99      | B           | Düşük Risk      |
| 50-74      | C           | Orta Risk       |
| 25-49      | D           | Yüksek Risk     |
| <25        | E           | Çok Yüksek Risk |

## YSİ SİSTEMLERİ VE PERA2019 İLE BÜTÜNLEŞİK HASAR TAHMİNİ KONSEPTİ

Gelişen teknoloji ile birlikte, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) tabanlı ölçüm cihazlarının hassasiyetleri artmış ve ekonomik olarak daha ulaşılabilir hale gelmiştir. Bu durum, MEMS tabanlı sistemlerin inşaat mühendisliğindeki YSİ uygulamalarında daha çok kullanılmasının önünü açmıştır (Sabato vd., 2016). Bu sensörlerin olay tabanlı çalışan ve akıllı sistemlerle entegrasyonu ile düşük güç tüketimli, dahili bataryalar ile kablosuz olarak uzun süre çalışabilen (6-12 ay) ve kolay kurulabilen YSİ sistemleri elde etmek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, akıllı veri transferi protokolleri ile sensörler aracılığıyla toplanan verilerin kablosuz ve kayıpsız aktarılması yapılabilmektedir. Günümüzde bu şekilde çalışan ivmeölçer ve eğimölçer sensörleri binalar, köprüler, barajlar ve tarihi yapılar gibi birçok inşaat mühendisliği uygulamasının izlenmesinde aktif olarak kullanılmaktadır (Sun & Swamy, 2010; Stefano vd., 2016; Zhu vd., 2018).

Akıllı YSİ sistemleri ve PERA2019 hızlı değerlendirme yönteminin entegre edilmesi ile oluşturulan hasar tahmin konsepti akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir. İlk adımda takip edilecek yapıya ivmeölçer ve eğimölçer sensörlerin kurulumu yapılmaktadır. İvmeölçer sensörleri, deprem esnasında ölçülecek yer ivmesi ve yapı üzerindeki spektral ivme değerleri hakkında veri sağlayacak olup, eğimölçer sensörler ise PERA2019 yöntemi uyarınca belirlenecek kritik kattaki yapısal elemanlarda deprem etkileri neticesinde meydana gelen maksimum ve kalıcı dönmeleri ölçecektir. Bu adımda, Çizelge 1’de belirtilen ve PERA2019’un yapıda uygulanması için gerekli olan bilgiler de yapıdan toplanacaktır. İkinci adımda ise binaya yerleştirilen ivmeölçer sensörleri aracılığıyla yapının dinamik özellikleri (örn. doğal titreşim frekansı, titreşim mod şekli) belirlenecektir. Yapının dinamik özellikleri PERA2019 yöntemine veri girişi olarak kullanılacak olup bina için spektral ivme talebinin belirlenmesinde ve  $PGA_{Talep}$  parametresinin bulunmasında kullanılacaktır. Ayrıca deprem sonrasında yapının doğal titreşim frekansında meydana gelebilecek değişikliklerin takip edilmesi amacıyla da kullanılacaktır. Literatürde bu konu ile ilgili yapısal hasar ile doğal titreşim frekansı arasındaki ilişkinin araştırıldığı çalışmalardan faydalanılacaktır (Göksu vd., 2017; İnci vd., 2017). Üçüncü adım ise toplanan veriler ışığında PERA2019 algoritmasının uygulanması ve yapının Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans hedefleri için

$PGA_{Kapasite}$  parametrelerinin elde edilmesini kapsamaktadır. Bu üç adımda belirtilen işlemlerin depremden önce yapılması gerekmektedir. Dördüncü adımda ise olası bir deprem sonrasında yapının maruz kaldığı deprem talebini ( $PGA_{Talep}$ ) ve eleman hasarlarını değerlendirmek adına ivmeölçerlerden elde edilen verilerin PERA2019 yöntemi ile yapının SH, KH ve GÖ durumları için yaklaşık olarak hesaplanan  $PGA_{Kapasite}$  değerleri ile karşılaştırılması yapılacaktır. Eğimölçerler ile kaydedilen maksimum ve kalıcı eleman dönmeleri de SH, KH ve GÖ durumlarına karşı gelen eleman dönme seviyeleri göz önünde bulundurularak değerlendirilecektir.



Şekil 1. Bütünleşik YSİ sistemi ile hasar tahmini akış şeması

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında afet sonrası hasar tahmin/tespitinde kullanılabilecek bir hasar tahmin algoritması konsepti sunulmuştur. Yeni nesil olay tabanlı çalışan YSİ sistemleri ve bina performansının hızlı değerlendirilmesi için geliştirilen PERA2019 yöntemini bütünleşik olarak kullanan algoritma ile hasar tahmin işlemleri insan faktöründen olabildiğince bağımsız, hızlı ve otomatik olarak gerçekleştirilebilecektir. Binalar deprem öncesinde PERA2019 yöntemiyle hızlı şekilde değerlendirilecek ve YSİ sistemleri ile takip edilecektir. PERA2019 yöntemi ile bina için SH, KH ve GÖ durumlarına karşı gelen ivme kapasiteleri ve eleman dönmeleri yaklaşık olarak belirlenecektir. Deprem esnasında yapıda meydana gelen ivmeler ve eleman dönmeleri kurulmuş olan YSİ sistemleri ile ölçülüp kaydedilecektir. Deprem sonrasında ise deprem öncesinde yapılan hızlı inceleme ile SH, KH ve GÖ durumları için yaklaşık olarak belirlenen ivme kapasiteleri ve eleman dönmeleri ile deprem esnasında YSİ sistemleri ile ölçülen ivme ve dönme değerleri karşılaştırılarak binanın hasar durumu tahmin edilip raporlanacaktır. Hasar tespit uygulamalarını bir sonraki seviyeye taşıyabilecek olan izleme konsepti ile afet sonrasındaki koordinasyon ve hasar tespitlerinin çok daha hızlı yapılabilmesi neticesinde depremler sonrasında günlük hayata dönüş süreci daha da kolaylaşabilecektir.

## KAYNAKLAR

Boduroglu, H., Ozdemir, P., Binbir, E., & Ilki, A. (2013): Seismic Damage Assessment Methodology Developed for Turkish Compulsory Insurance System. Proceedings of the 9th Annual International

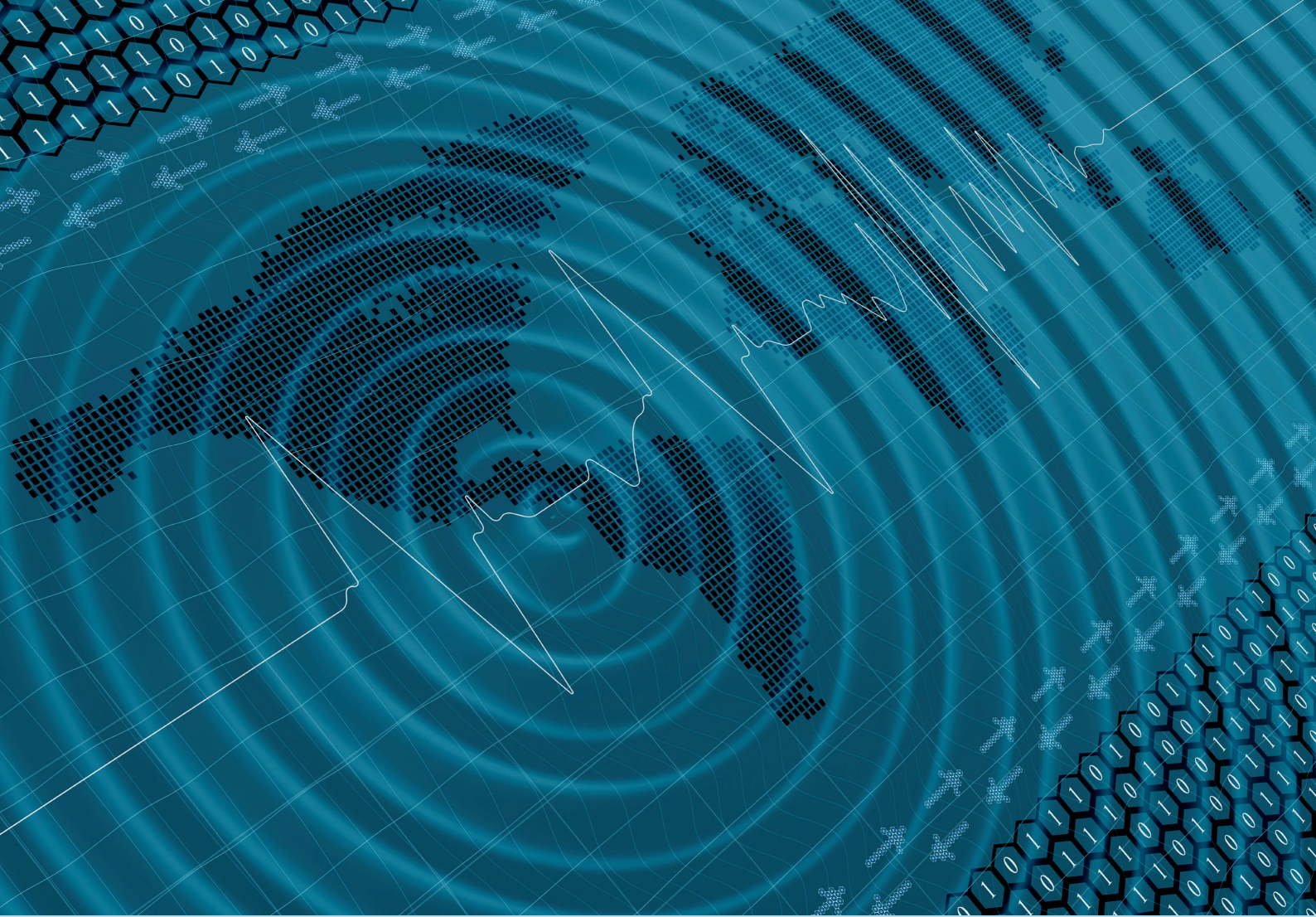
- Conference of the International Institute for Infrastructure Renewal and Reconstruction. Brisbane, Australia.
- Celep, Z., Erken, A., Taskin, B., & İlki, A. (2011). Failures of Masonry and Concrete Buildings During the March 8, 2010 Kovancılar and Palu (Elazığ) Earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 868-889.
- Çaktı, E., Şafak, E., Hancılar, U. ve Şeşetyan, K., (2019). İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminlerinin Güncellenmesi, Teknik Rapor, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- De Stefano, A., Matta, E., & Clemente, P. (2016). Structural Health Monitoring of Historical Heritage in Italy: Some Relevant Experiences. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 83-106.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara
- Erdik, M. (2000). Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.
- Goksu, C., Inci, P., Demir, U., Yazgan, U., & İlki, A. (2017). Field Testing of Substandard RC Buildings Through Forced Vibration Tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(8), 3245-3263.
- Gurbuz, T., Cengiz, A., Kolemenoglu, S., Demir, C., & İlki, A. (2022). Damages and Failures of Structures in İzmir (Turkey) During the October 30, 2020 Aegean Sea Earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-42.
- İlki, A., Demir C., Comert M., & Kusunoki K. (2013): "Evaluation of Seismic Damage Assessment Methodologies Based on Field Observations, Test Results and Analytical Studies," 2013 International Van Earthquake Symposium, 2013. (keynote lecture).
- İlki, A., Comert, M., Demir, C., Orakcal, K., Ulugtekin, D., Tapan, M., & Kumbasar, N. (2014). Performance Based Rapid Seismic Assessment Method (PERA) for Reinforced Concrete Frame Buildings. *Advances in structural engineering*, 17(3), 439-459.
- İlki, A., Halıcı, O., Kupcu, E., Comert, M., & Demir, C. (2020, April). Modifications on Seismic Damage Assessment System of TCIP Based on Reparability. In 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan.
- İlki, A., Halıcı, O. F., Comert, M., & Demir, C. (2021a). The modified post-earthquake damage assessment methodology for TCIP (TCIP-DAM-2020). In *Advances in Assessment and Modeling of Earthquake Loss* (pp. 85-107). Springer, Cham.
- İlki, A., Kahraman, T., Ozkan, S., Aydoğdu, H.H., Demir, C., Comert, M., (2021b). "Seismic Risk Assessment of Building Stock in Istanbul", *Proceedings, 14th International Congress on Advanced in Civil Engineering*, 6-8 September 2021, Istanbul.
- Inci, P., Goksu, C., Demir, U., & İlki, A. (2017, June). Ambient Vibration Testing of a Three-Storey Substandard RC Building at Different Levels of Structural Seismic Damage. In *International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (pp. 219-231). Springer, Cham.
- Kazama, M. & Noda, T. (2012): Damage statistics (Summary of the 2011 off The Pacific Coast of Tohoku Earthquake Damage). *Soils and Foundations*, 52 (5), 780-792.
- Riskli Bina Tespit Esasları (RBTE), (2019). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Sabato, A., Niezrecki, C., & Fortino, G. (2016). Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: a Review. *IEEE Sensors Journal*, 17(2), 226-235.
- Sun, M., Staszewski, W. J., & Swamy, R. N. (2010). Smart Sensing Technologies for Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures. *Advances in civil engineering*, 2010.
- Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakcal, K., & İlki, A. (2013). Failures of Structures During the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) Earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 606-628.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Zhu, L., Fu, Y., Chow, R., Spencer Jr, B. F., Park, J. W., & Mechitov, K. (2018). Development of a High-Sensitivity Wireless Accelerometer for Structural Health Monitoring. *Sensors*, 18(1), 262.

## YAZAR İNDEKSİ

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Ali Pınar             | 1      |
| Alper İlki            | 27, 38 |
| Burak Cavdaroglu      | 22     |
| Bülent Akbaş          | 18     |
| Cem Demir             | 38     |
| Eren Uçkan            | 18     |
| Eyüphan Koç           | 5      |
| Evşen Yanmaz Adam     | 33     |
| Hasan Hüseyin Aydoğdu | 27     |
| Hazım Kemal Ekenel    | 33     |
| Mehmet Akşit          | 14     |
| Mustafa Cömert        | 38     |
| Mustafa Erdik         | 1      |
| Ömer Faruk Halıcı     | 38     |
| Özlem Tut             | 27     |
| Sinan Akkar           | 10     |

TÜRKİYE  
DEPREM  
VAKFI

İTÜ



İTÜ  
YAYINEVİ

© İTÜ Yayınevi