

İkincil Afetlerden Deprem Sonrası Yangına Yönelik Simülasyon Metodolojileri: Kavramsal Bir Bakış Açısı

Kerem Can BULUT^{1*}, Alev TAŞKIN²

¹ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, 34349, İstanbul, Türkiye; ORCID: 0009-0006-9396-6286

² Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, 34349, İstanbul, Türkiye; ORCID: 0000-0003-1803-9408

* Corresponding Author: kcbulut@hotmail.com

Received: 1 March 2024; Accepted: 17 July 2024

Reference/Atf: K. C. Bulut, A. Taşkın, “İkincil Afetlerden Deprem Sonrası Yangına Yönelik Simülasyon Metodolojileri: Kavramsal Bir Bakış Açısı”, Researcher, vol.4, no.1, pp.79-93, July 2024, doi: 10.55185/researcher.1445609

Özet



Deprem sonrası yangınlar; önemli bir ikincil afet olarak yaşam kaybı, yapı hasarı ve finansal zarar açısından deprem kaynaklı sismik hasarın boyutlarını büyük ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Yoğun nüfusa sahip kentsel bölgelerde deprem nedeniyle yangınla mücadele ekipmanlarının zarar görmesi, yolların gerekli itfaiye ve acil müdahale faaliyetlerini engelleyecek biçimde tıkanması, yangına sebebiyet verebilecek elektrik ve gaz hatlarında meydana gelebilecek hasarlar ve iletişim hatlarındaki olası kesintiler sebebiyle deprem sonrası yangın riski üzerinde durulması gereken önemli bir risktir. Simülasyon metodolojileri, deprem sonrası yangın riskinin değerlendirilmesinde ve mevcut risklere karşı topluluk direncini artıracak önlemlerin belirlenmesinde literatürde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, 2000 yılı sonrasında yayımlanan, deprem sonrası yangın riskinin ele alınmasında ve bu afetlere karşı yürütülebilecek faaliyetlerin değerlendirilmesinde simülasyon metodolojilerini kullanan makaleler incelenmiştir. İlgili anahtar kelimeler kullanılarak ulaşılan çalışmaların bibliyografik özellikleri sunularak, deprem sonrası yangını simülasyon odağında ele alan çalışmalara kavramsal bir bakış açısı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: deprem sonrası yangın, ikincil afet, simülasyon, bibliyografik analiz, literatür araştırması

Simulation Methodologies for Post Earthquake Fire as a Secondary Disaster: A Conceptual Framework

Abstract

As a major secondary disaster, post earthquake fires have the potential to significantly enhance the extent of seismic damage caused by earthquakes in terms of fatalities, structural damage and financial loss. Due to possible damage to firefighting equipment, road blockages that restrict the requirement for emergency response and firefighting operations, potential damage to gas and electricity lines that could result in fires and potential disruptions to communication lines, there is a significant risk of post earthquake fire that should be assessed in densely populated urban areas. Simulation methodologies are one of the most widely used techniques in the literature in assessing post earthquake fire risk and determining actions that may improve community resilience against existing risks. This study examines articles published after 2000 that use simulation methodologies to address post earthquake fire risk and evaluate preventative actions that can be taken against these disasters. A conceptual framework is provided to the studies that address post earthquake fire in a simulation focus by displaying the bibliographic features of the studies that are accessed using the relevant keywords.

Keywords: post earthquake fire, secondary disaster, simulation, bibliographic analysis, literature review

1. Giriş

Depremler, afet yönetimi literatüründe en sık ele alınan doğal afetler arasında yer almaktadır. Çeşitli ikincil afetleri tetikleme potansiyeli bulunan depremlerin topluluk üzerinde birçok yıkıcı etkisi bulunmakta olup, bunlar arasından en önemlisi şüphesiz can kaybına neden olma potansiyelidir. İstatistiksel veriler, deprem nedenli can kayıplarının deprem sonrası yangınlar, tsunami ve heyelan gibi diğer tehlikeleri de içeren çeşitli nedenlerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır [1]. Deprem kaynaklı olarak meydana gelen ve depremin meydana getirdiği kayıpları ileri boyutlara ulaştırma potansiyeline sahip bu tehlikeler arasında, deprem sonrası yangınlar kentsel bölgelerde yaygın olarak yaşanan en yıkıcı olaylardan biri olarak kabul edilmektedir [2].

Deprem sonrası yangınlar, genellikle büyük depremler nedeniyle meydana gelen, geniş boyutta mali ve insani kayıplara yol açabilen ciddi bir ikincil afet olarak kabul edilmektedir [3]. Deprem sonrası yangınlar; doğal gaz kaynaklı tutuşmalar, bitki örtüsü ve çarpık kentleşme nedenli tutuşmalar, depremi takip eden kaos durumunun ortaya çıkardığı olaylar, binalarda aktif yangınla mücadele sistemlerinin yer almaması, yangın koruma sistemlerinde deprem kaynaklı meydana gelen hasar, rüzgar kuvveti ve potansiyel hava hareketi gibi çok çeşitli faktörler nedeniyle meydana gelebilmektedir [4]. Deprem sonrasında binalardaki yangınla mücadele ekipmanlarının zarar görmesi, yıkılan binalar nedeniyle yolların tıkanması ve bu nedenle kurtarma faaliyetlerinin zorluğunun artması gibi faktörler deprem sonrası yangın kayıplarının boyutunu büyük ölçüde artırmaktadır [2].

Tarihsel deprem sonrası yangın olayları incelendiğinde, 1906 San Francisco depreminde meydana gelen güçlü sarsıntıya rağmen oluşan hasarın büyük çoğunluğu deprem kaynaklı yangınlardan kaynaklanmış ve sonuç olarak 28,000'den fazla bina etkilenmiştir [5]. 1923 Kanto depremini takiben iki gün süren yangınlar meydana gelmiş ve 694,000'den fazla binayı etkileyerek 140,000'den fazla can kaybına neden olmuştur [2]. 1994 Northridge depreminde ortalama 110 yangın rapor edilmiş, 1995 Kobe depreminde ise özellikle şehir merkezinin yoğun yapılaşmış bölgelerinde meydana gelen 108 yangın rapor edilmiştir [5]. Tarihsel olaylara dair verilerin de ortaya koyduğu üzere, deprem sonrası yangınlar depremin yıkıcı etkilerini daha ileri seviyeye taşıma potansiyeline sahip önemli ikincil afetler olup, bu afetlerin incelenmesi etkili afet yönetimi ve topluluk direncinin artırılması açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, literatürde deprem sonrası yangın afetini incelemede simülasyon yaklaşımlarını ele alan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmaların literatürdeki yeri ve üzerine yoğunlaştıkları konuları değerlendirmek üzere bibliyografik analizler yürütülmüştür.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatür araştırması sürecinde izlenen metod ve ilgili anahtar kelimelerle ulaşılan çalışmaların bibliyografik analiz sonuçları sunulmuştur.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, simülasyon metodolojileri çerçevesinde deprem sonrası yangın riskine odaklanan çalışmalar ele alınarak bu çalışmalar detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

Çalışmanın dördüncü ve son bölümünde ise uygulanan bibliyografik analizler ile literatür incelemesi ile elde edilen çıkarımlar ve sonuçlara yer verilmiştir.

2. Literatür Araştırması ve Bibliyografik Analiz

Literatürde deprem sonrası yangın afetini simülasyon yaklaşımları ile ele alan çalışmalara kavramsal bir bakış açısı sunmak üzere; deprem sonrası yangın literatüründe sıklıkla kullanılan “post earthquake fire (deprem sonrası yangın)” ve “fire following earthquake (depremi takip eden yangın)” anahtar kelimeleri, “simulation (simülasyon)” anahtar kelimesi ile birlikte ilgili veri tabanları üzerinde araştırılmıştır. Çalışmada, araştırmacılar tarafından en sık kullanılan akademik veri tabanları arasında olmaları sebebiyle Scopus ve Web of Science veri tabanlarından yararlanılmıştır. Bibliyografik analiz için bu iki veri tabanından elde edilen sonuçlar bir araya getirilmiştir.

İlgili anahtar kelimeler için literatür araştırması adımları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de sunulmuştur:

Tablo 1: “Post Earthquake Fire (Deprem Sonrası Yangın)” ve “Simulation (Simülasyon)” Anahtar Kelimeleri için Literatür Araştırması Adımları

“Post Earthquake Fire (Deprem Sonrası Yangın)” ve “Simulation (Simülasyon)” Anahtar Kelimeleri için Literatür Araştırması Adımları	Veri Tabanları	
	Scopus	Web of Science
1) Anahtar kelimelerin makale başlığı, özet ve anahtar kelimeler içerisinde aratılması sonucu ulaşılan doküman sayısı	66	32
2) 2000 ve 2023 arasında yayımlanan çalışmaların filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	65	32
3) Doküman tipinin “Makale (Article)” olarak filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	48	27
4) Doküman dilinin “İngilizce” olarak filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	37	27

Tablo 2: “Fire Following Earthquake (Depremi Takip Eden Yangın)” ve “Simulation (Simülasyon)” Anahtar Kelimeleri için Literatür Araştırması Adımları

“Fire Following Earthquake (Depremi Takip Eden Yangın)” ve “Simulation (Simülasyon)” Anahtar Kelimeleri için Literatür Araştırması Adımları	Veri Tabanları	
	Scopus	Web of Science
1) Anahtar kelimelerin makale başlığı, özet ve anahtar kelimeler içerisinde aratılması sonucu ulaşılan doküman sayısı	31	19
2) 2000 ve 2023 arasında yayımlanan çalışmaların filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	29	19
3) Doküman tipinin “Makale (Article)” olarak filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	20	16
4) Doküman dilinin “İngilizce” olarak filtrelenmesi sonucunda ulaşılan doküman sayısı	18	15

Veri tabanları üzerinden ulaşılan ve ilgili filtrelemeler sonucunda elde edilen çalışmaların kayıtları RStudio’da kullanılmak üzere BibTeX formatında dışarıya aktarılmıştır. BibTeX dokümanları, R programının “bibliometrix” kütüphanesinin “convert2df” fonksiyonu kullanılarak okunmuştur. Scopus ve Web of Science için final doküman sayıları sırasıyla 55 ve 42 olmuştur.

R programının “bibliometrix” kütüphanesinin “mergeDbSources” fonksiyonu kullanılarak, iki veri tabanından elde edilen dokümanlar bir araya getirilmiş ve tekrarlanan dokümanların elenmesi sağlanmıştır. 42 adet dokümanın yinelenildiği belirlenmiştir. Bir araya getirme ve yinelenen dokümanları eleme süreçlerinden sonra elde edilen doküman sayısı 55 olarak belirlenmiştir. Bu 55 çalışmaya ait veriler, Bibliometrix ve VOSViewer yazılımlarında kullanılmak üzere “.xlsx” ve “.txt” formatlarına çevrilmiştir.

Bibliometrix, R üzerine kurulu bir açık kaynak uygulaması olup kapsamlı bilimsel haritalama analizi için kullanılmaktadır [6]. Bibliometrix, birçok farklı bibliyometrik veri ögesinin derinlemesine analizini

sağlamaktadır. VOSViewer ise çok sayıda farklı bibliyografik veri ögesi arasındaki ilişkilerin haritalanması ve görsel tasvirini sağlayan bir yazılımdır [7].

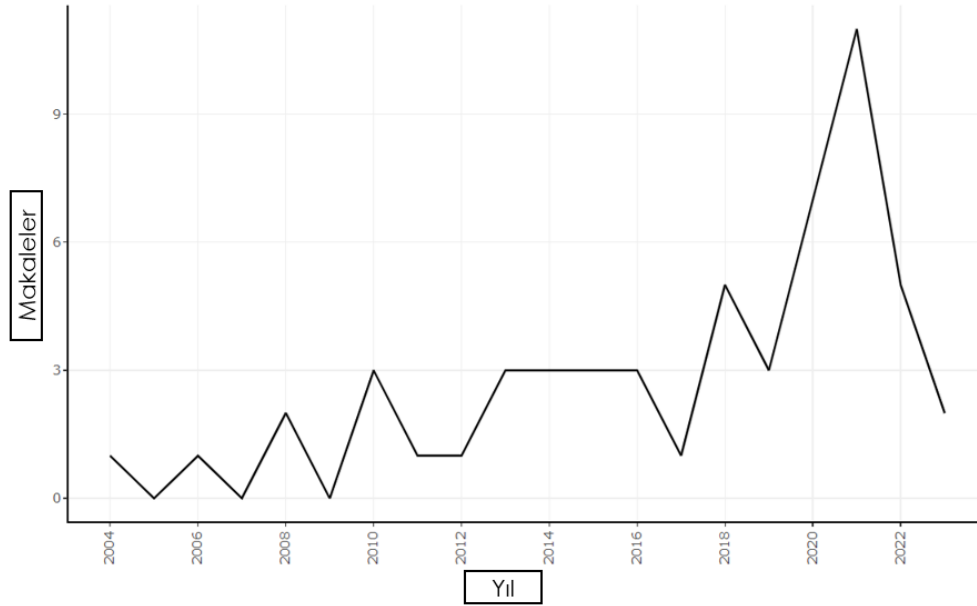
Bibliometrix üzerinden elde edilen, analizde kullanılan çalışmaların verisi hakkındaki temel bilgiler Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Anahtar Kelimelerin Bibliyografik Verisi için Temel Bilgiler

BİBLİYOGRAFİK VERİ İÇİN TEMEL BİLGİLER

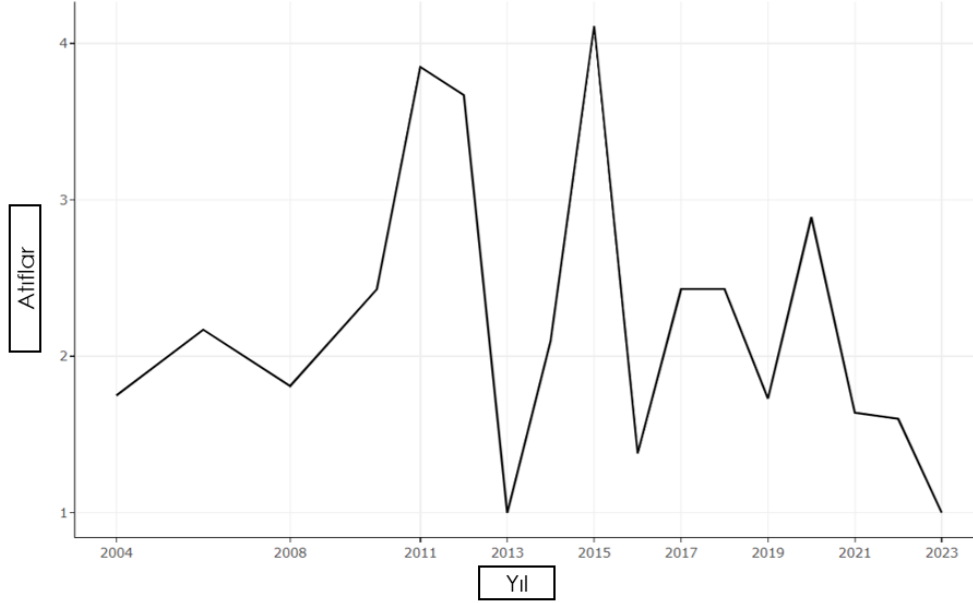
<i>Zaman Aralığı</i>	2004:2023
<i>Kaynaklar (Dergiler, Kitaplar vb.)</i>	32
<i>Dokümanlar</i>	55
<i>Yıllık Büyüme Oranı %</i>	3.72
<i>Dokümanların Ortalama Yaşı</i>	6.84
<i>Doküman Başına Ortalama Alıntılar</i>	15.22
<i>DOKÜMAN İÇERİĞİ</i>	
<i>Artı Anahtar Kelimeler</i>	495
<i>Yazarın Anahtar Kelimeleri</i>	201

Bibliyografik verilerin Bibliometrix'e aktarılmasından sonra bu veriler kullanılarak çeşitli analizler yürütülmüştür. İlk olarak yıllık bilimsel üretkenlik ve yıllık ortalama atıflar analiz edilmiştir. Yıllık bilimsel üretkenlik analizi sonuçları Şekil 2.1'de sunulmuştur. 2020 ve 2023 yılları arasındaki makale sayıları sırasıyla 7, 11, 5 ve 2'dir. 2021 yılı 11 makale ile bu konuda en çok yayın yapılan yıldır.



Şekil 1: Anahtar Kelimeler için Yıllık Bilimsel Üretkenlik Analizi

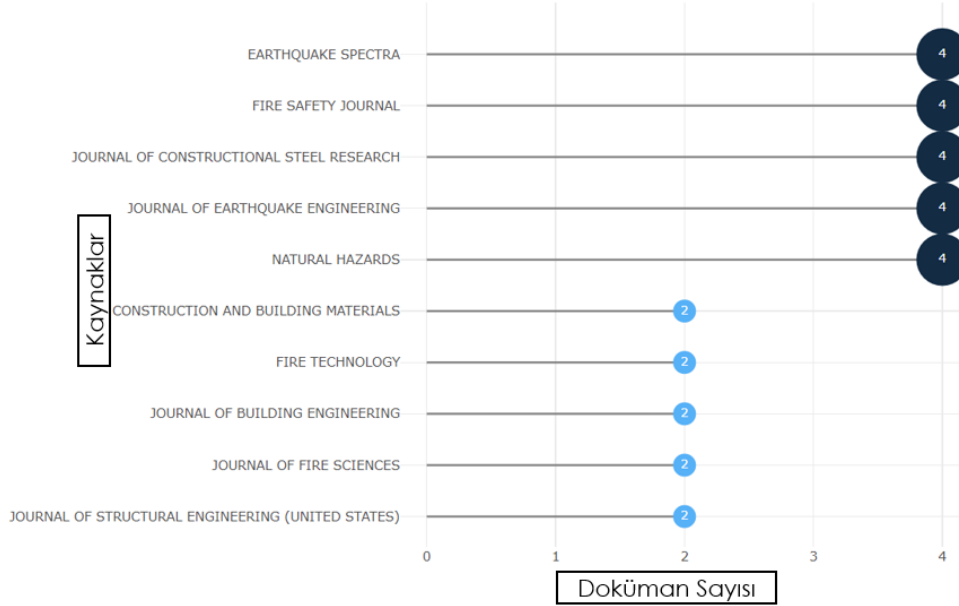
Anahtar kelimeler için yıllık ortalama atıflara yönelik analiz sonucu Şekil 2.2'de sunulmuştur. 2020 ve 2023 yılları arasındaki yıllık ortalama atıf sayıları sırasıyla 2.89, 1.64, 1.60 ve 1 olmuştur. En yüksek ortalama atıf sayısına sahip olan yıl 4.11 ile 2015 olmuştur.



Şekil 2: Anahtar Kelimeler için Yıllık Ortalama Atıflar Analizi

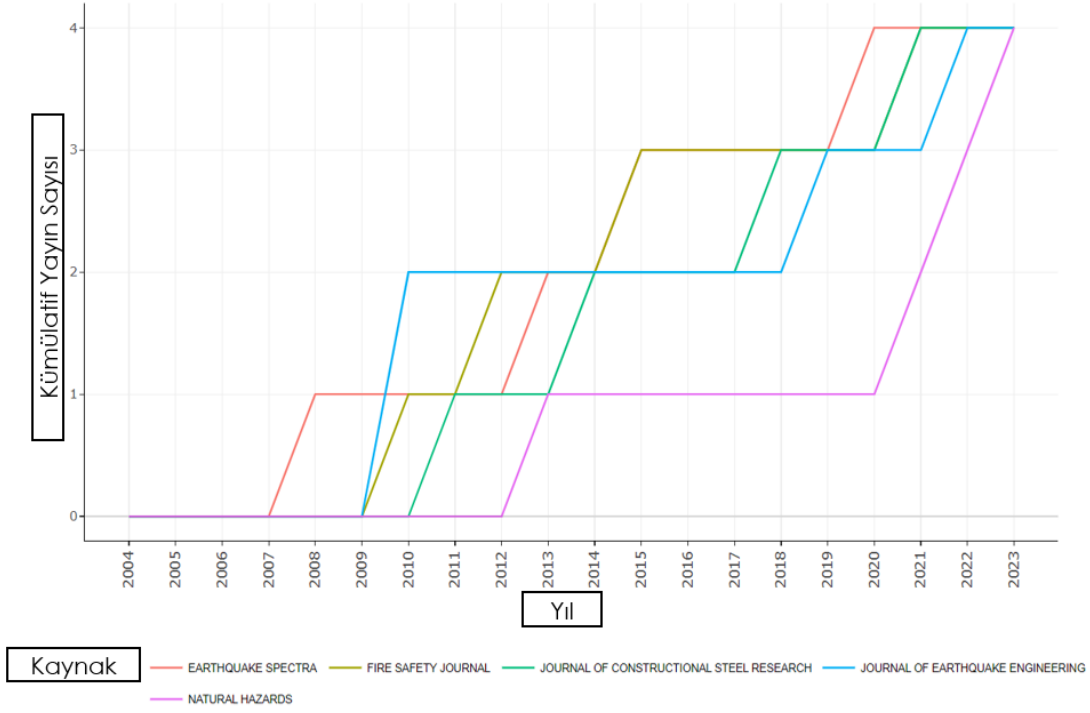
Bibliyografik verinin temel özelliklerinin incelenmesinden sonra; kaynaklar, yazarlar ve dokümanlar olmak üzere üç temel başlık üzerinde bibliyografik veriyi daha detaylı değerlendirmek üzere çeşitli analizler yürütülmüştür.

Kaynaklar başlığı altında en ilgili kaynakların belirlenmesine yönelik analiz yürütülmüştür. Bu analizin sonuçları Şekil 2.3'te sunulmuştur. Earthquake Spectra, Fire Safety Journal, Journal of Constructional Steel Research, Journal of Earthquake Engineering ve Natural Hazards isimli kaynaklar, her biri için 4 doküman sayısı ile, anahtar kelimeler için en ilgili kaynaklar olmuştur.



Şekil 3: Anahtar Kelimeler için En İlgili Kaynaklar Analizi

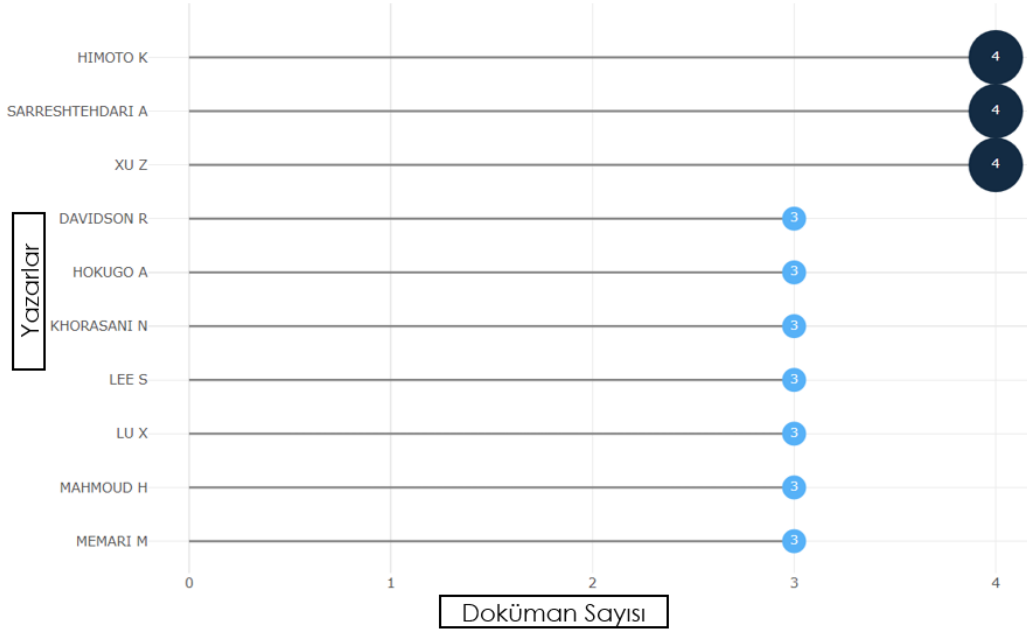
Devamında, ilgili anahtar kelimeler için en yüksek doküman sayısına sahip kaynakların zaman içerisindeki üretkenlikleri incelenmiştir. Bu analizin sonuçları Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 4: En İlgili Kaynakların Zaman İçerisindeki Üretkenlik Analizi

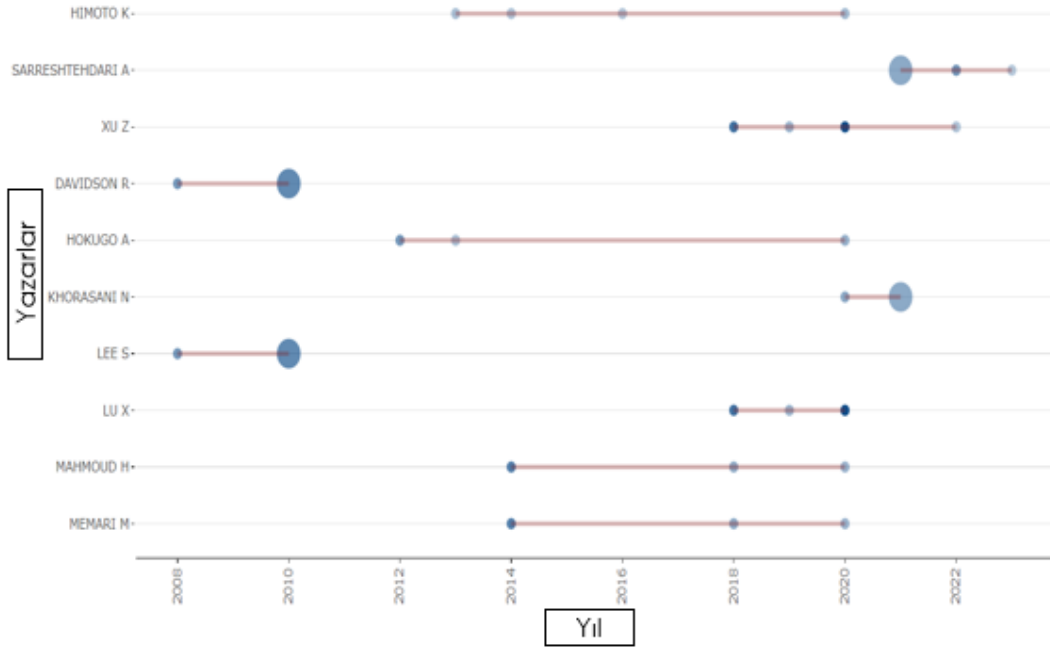
Yazarlar başlığı altında; yazarlar ve ülkeler için iki farklı alanda analizler yürütülmüştür.

Doküman sayısına bağlı olarak ele alınan anahtar kelimeler için en ilgili yazarlara yönelik analiz sonucu Şekil 2.5'te sunulmuştur. Himoto K., Sarreshtehdari A. Ve Xu Z., ilgili anahtar kelimeler için en yüksek doküman sayısını sağlayan yazarlar olarak belirlenmiştir.



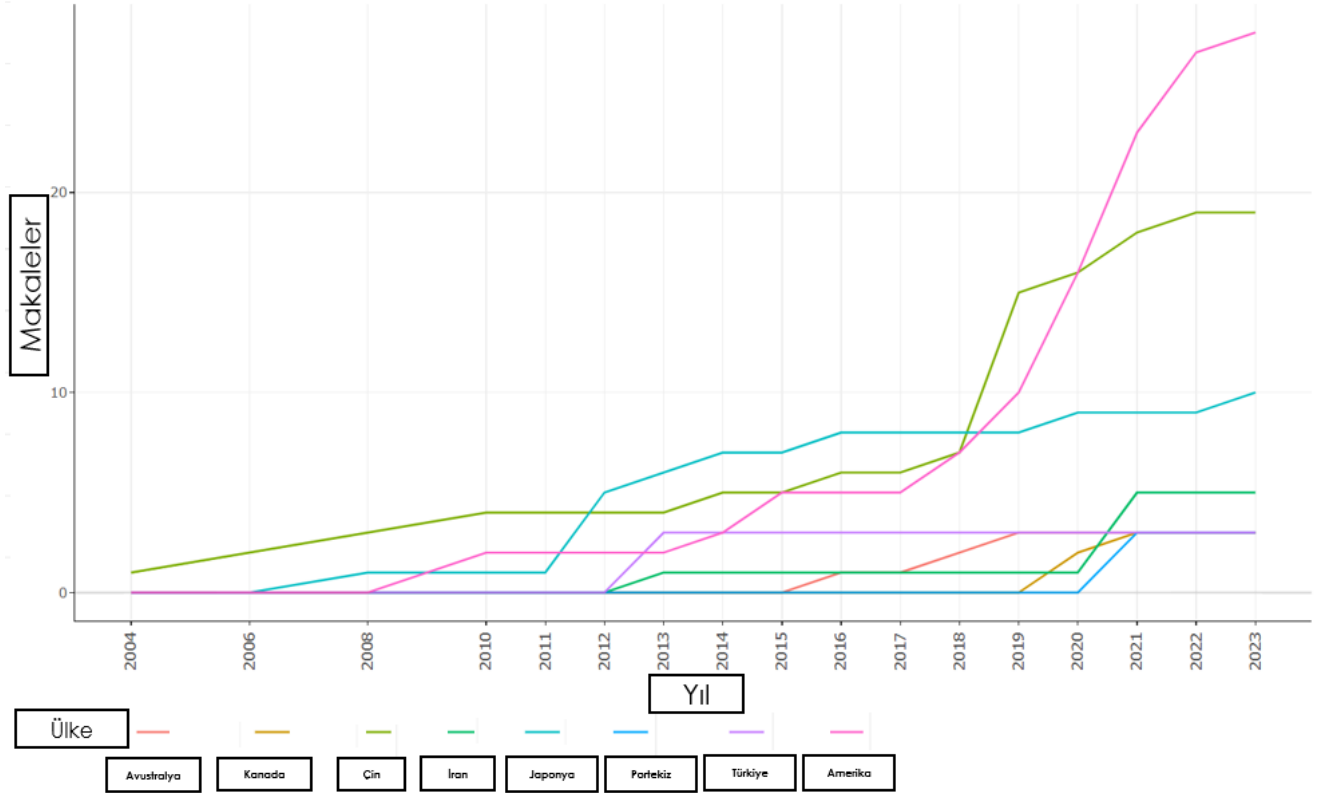
Şekil 5: Anahtar Kelimeler için En İlgili Yazarlar Analizi

En ilgili yazarların belirlenmesini takiben, ele alınan anahtar kelimeler için en ilgili yazarların zaman içerisindeki üretkenlikleri incelenmiştir. Bu analiz sonuçları Şekil 2.6'da sunulmuştur.



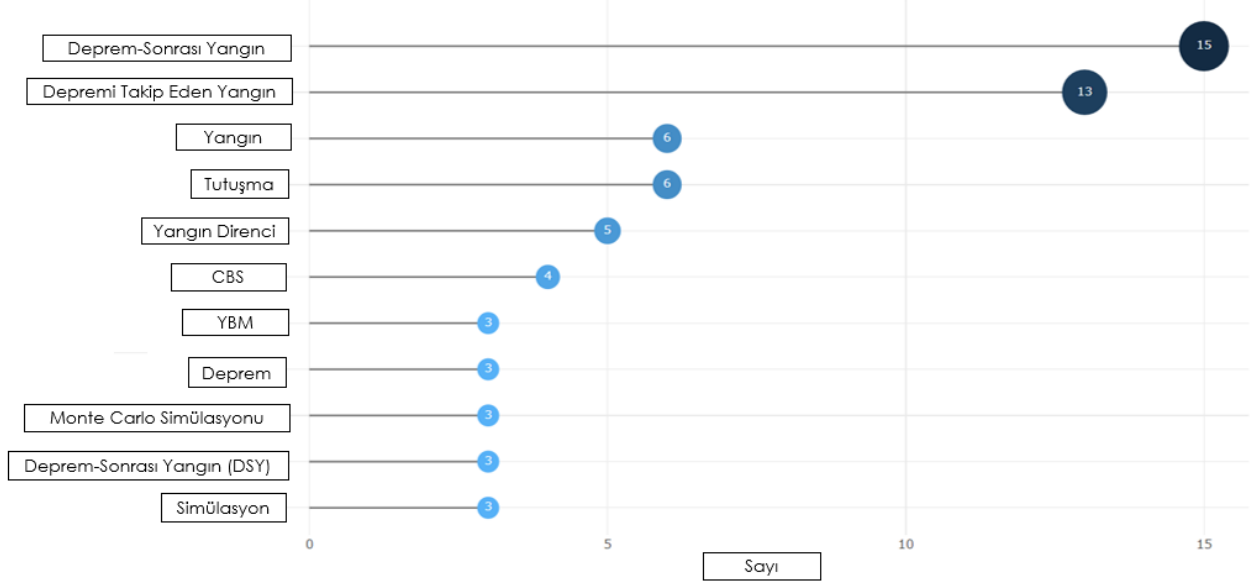
Şekil 6: En İlgili Yazarların Zaman İçerisindeki Üretkenlik Analizi

Ülkeler alanında, ilgili anahtar kelimeler için ülkelerin zamana bağlı üretkenliği analiz edilmiştir. Ülkelerin zamana içerisindeki üretkenliklerine ilişkin analizin sonuçları Şekil 2.7'de sunulmuştur. Bilimsel üretkenliği en yüksek ülkeler sıklık dereceleri sırasıyla 28, 19 ve 10 olmak üzere Amerika, Çin ve Japonya olmuştur. Son yıllarda özellikle Amerika'da bu konudaki çalışmaların artış gösterdiği görülmektedir.



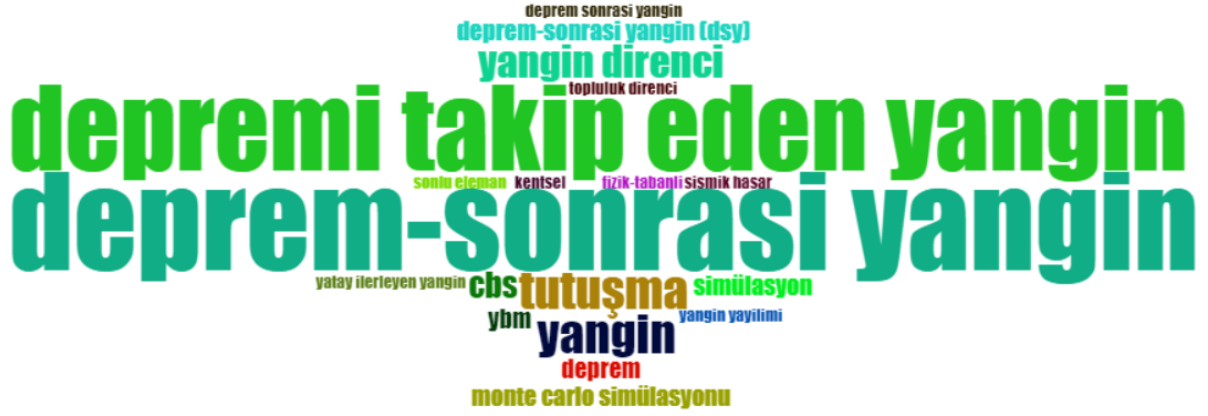
Şekil 7: Anahtar Kelimeler için Ülkelerin Zaman İçerisindeki Üretkenlikleri Analizi

Dokümanlar başlığı altında anahtar kelimeler hakkında çeşitli analizler yürütülmüştür. Yazar anahtar kelimeleri arasında en çok tekrar eden anahtar kelimeler belirlendikten sonra, bu anahtar kelimeler için bir kelime bulutu oluşturulmuş ve artı anahtar kelimeler için popüler terimlerin analizi gerçekleştirilmiştir. En sık tekrar eden yazar anahtar kelimeleri Şekil 2.8’de sunulmuştur. Sıklıklarına göre en çok yinelenen anahtar kelimeler; “deprem-sonrası yangın”, “depremi takip eden yangın”, “yangın”, “tutuşma” ve “yangın direnci” olmuştur. “CBS”, Coğrafi Bilgi Sistemi’ni, “YBM” ise Yapı Bilgi Modellemesi’ni temsil etmektedir.



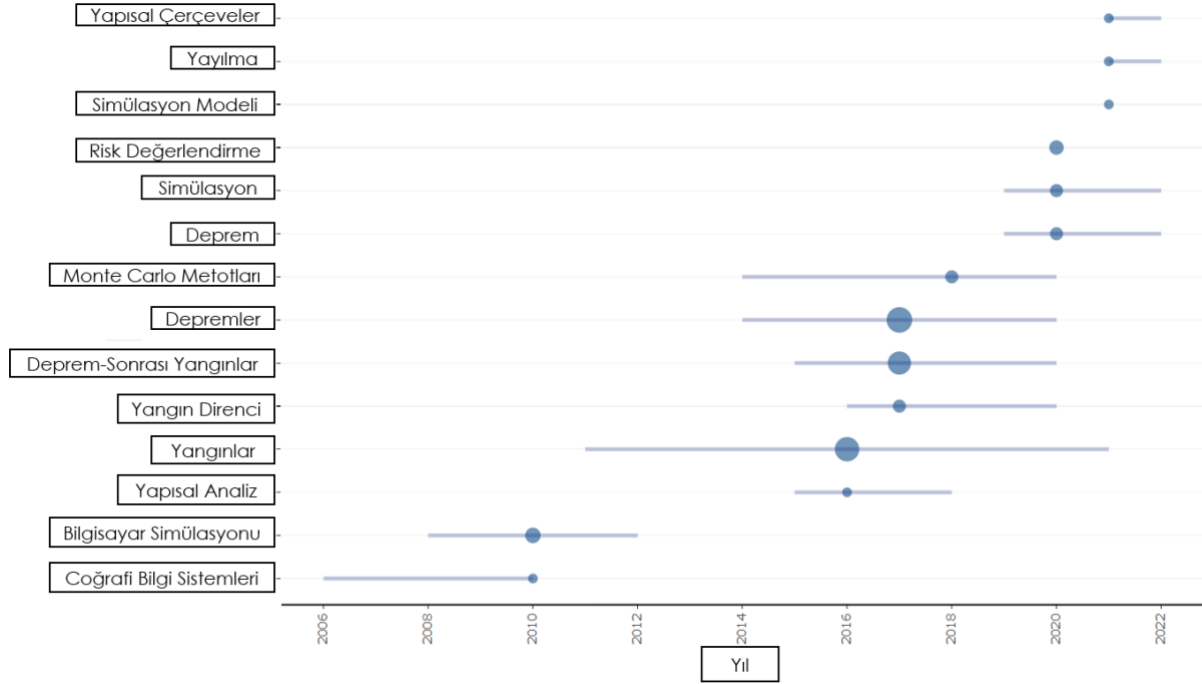
Şekil 8: En Sık Tekrarlanan Yazar Anahtar Kelimeleri Analizi

Yazar anahtar kelimeleri arasında en sık tekrar eden anahtar kelimeler için oluşturulan kelime bulutu, Şekil 2.9’da sunulmuştur.



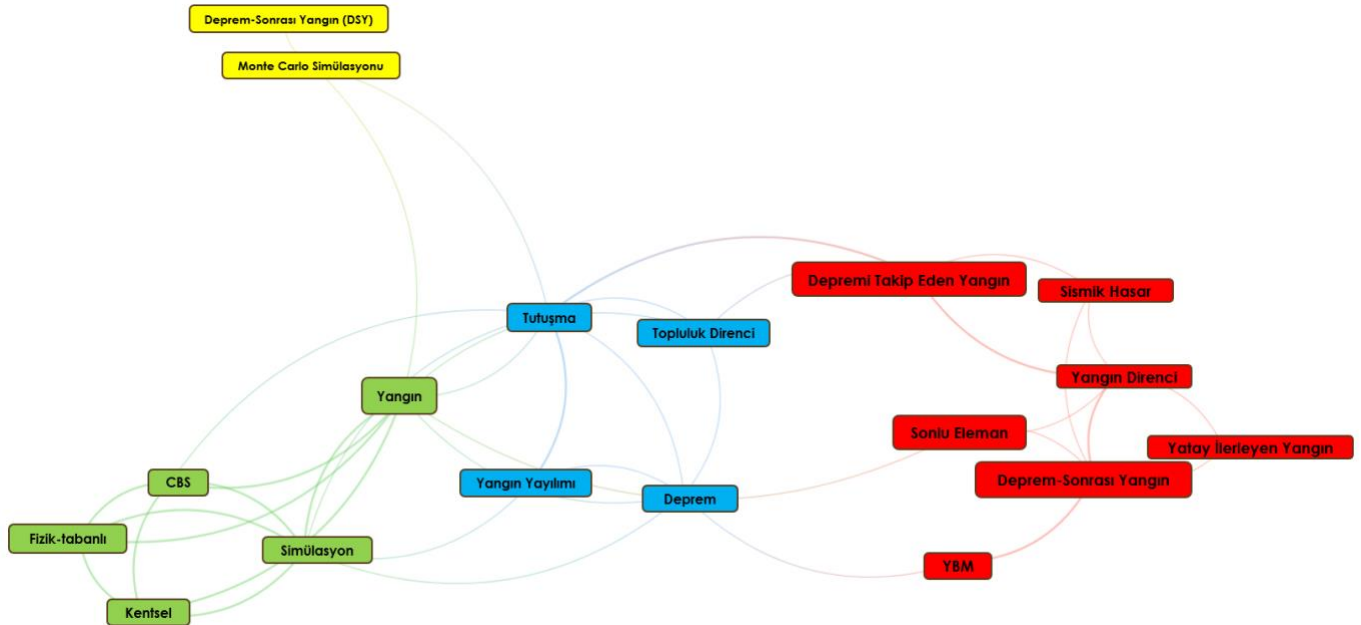
Şekil 9: En Sık Tekrarlanan Yazar Anahtar Kelimeleri İçin Kelime Bulutu

2004 ve 2023 yılları arasında ele alınan tüm makalelerin artı anahtar kelimeleri ele alınarak popüler terimler için bir analiz yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.10’da sunulmuştur. Simülasyon ile ilgili anahtar kelimelerin özellikle son yıllardaki popülerliği görülmektedir.



Şekil 10: Artı Anahtar Kelimeler için Popüler Terimler Analizi

Bibliometrix üzerinde ilgili anahtar kelimeler için elde edilen bibliyografik verinin analizi sonrasında, Scopus ve Web of Science veri tabanlarından elde edilen dokümanların birleştirilmiş veri seti VOSViewer üzerinde anahtar kelime haritalama analizi yürütmek üzere kullanılmıştır. Haritalama sürecinde, anahtar kelimeler için minimum tekrarlama sayısı iki olarak belirlenmiş ve böylece haritada birbirleriyle ilişkili 18 adet anahtar kelime içerilmiştir. Oluşturulan anahtar kelime haritası dört sınıftan meydana gelmektedir. VOSViewer tarafından oluşturulan anahtar kelime haritası Şekil 2.11'de sunulmuştur.



Şekil 11: Anahtar Kelimeler için Ortak Haritalama Analizi

“Deprem-sonrası yangın”, 15 ile en çok tekrar eden anahtar kelime olmuş ve toplam bağlantı gücü 7 olarak belirlenmiştir. “Depremi takip eden yangın” anahtar kelimesinin bağlantı gücü ise 6 olarak belirlenmiştir. “Simülasyon” anahtar kelimesinin bağlantı gücü ise 11 olarak belirlenmiştir.

3. Deprem Sonrası Yangın Riskini Ele Almada Simülasyon Yaklaşımlarını Kullanan Çalışmaların İncelenmesi

Bu bölümde, deprem sonrası yangın riskini ele almada simülasyon metodolojilerini kullanan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmaların bir bölümü deprem sonrası yangın nedeniyle meydana gelen risk faktörlerinin tahmini, değerlendirilmesi ve analizine odaklanırken, bir kısmı ise binaların deprem kaynaklı sismik sarsıntı sonrası yapısal olarak yangına dayanıklılığını ele alan çalışmalardan meydana gelmektedir. Deprem sonrası yangın için risk faktörlerinin belirlenmesi ve bunların neden olacağı kayıpların analizine yönelik simülasyon metodolojilerini ele alan çalışmalar bu çalışmanın ana odak noktası olduğundan, ulaşılan dokümanlar arasında çalışmanın odağı dışında kalan 21 adet çalışma elenerek geriye kalan 34 çalışma incelenmiş ve araştırma çerçevesi kapsamında en ilgili olan çalışmalar detaylı olarak ele alınmıştır.

Ren ve Xi tarafından yapılan çalışmada, deprem sonrasında yangınların meydana gelebileceği yerleri belirlemek üzere Japonya, Amerika ve Çin'deki tarihi verilerine dayalı olan, Huygens prensibi kullanılarak gerçekleştirilen dinamik bir yangın yayılma süreci simüle edilmiştir. Deprem sonrası yangınların yayılabileceği alanların simülasyonu amacıyla Arc Info'ya dayalı bir bilgisayar sistemi geliştirilerek, bu sistemin şehir imarında ve acil müdahale planlamasında kullanılabileceği belirtilmiştir [8]. Zhao vd. tarafından, deprem sonrası yangınların temel mekânsal ve zamansal özellikleri belirlenmiş ve 20. yüzyılda meydana gelen tarihi deprem sonrası yangın verileri toplanarak, deprem sonrası yangınlar regresyon analizi yöntemiyle modellenmiştir. Deprem sonrası yangınların mekansal ve zamansal olasılık dağılımını oluşturmak için bir rassal Poisson olayı ve Weibull dağılım modeli önerilmiş, meydana gelebilecek tutuşmaları tahmin etmek için Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı bir stokastik simülasyon şeması önerilmiştir [9]. Lee vd. tarafından, deprem sonrası yangının etkilerini tahmin etmek üzere geliştirilen mevcut tutuşma ve yayılma/bastırma modelleri incelenmiştir. Uygulanabilirlik açısından ampirik yayılma modelleri yerine fizik tabanlı yayılma modellerine ve farklı simülasyon teknikleri kullanılan modellere yönelik bir eğilime dikkat çekilmiştir. Bu modellerin eğim, bitki örtüsü ve bina hasarı, itfaiye teşkilatlarının söndürme çalışmalarının etkileri, su temini ve ulaşım sistemlerinin işleyişi açısından geliştirilebileceği belirtilmiştir [10]. Huang vd. tarafından yapılan çalışmada, Tayvan'da meydana gelen bir deprem Monte Carlo simülasyonu uygulanarak simüle edilmiş ve bu depremden sonra meydana gelen deprem sonrası yangın olaylarının sayısı belirlenerek şehrin farklı bölgelerinin deprem sonrası yangın riski tolerans olasılık seviyeleri analiz edilmiştir [11]. Zhao tarafından yapılan çalışmada, deprem sonrası yangın yayılımının karmaşık davranışını araştırmak ve yangının sebep olduğu kayıpları değerlendirmek amacıyla deprem sonrası yangınların dinamik simülasyonunu gerçekleştirmek üzere entegre bir yazılım sistemi geliştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda yangın çıkışları ile sismik zamanlama arasındaki ilişkinin modellenmesi gerekeceği, yangının sıçrama yoluyla yayılmasının önemli bir faktör olarak ele alınması gerektiği ve su basıncının doğru tahmininin modelleme için yüksek öneme sahip olduğu belirtilmiştir [12]. Lee ve Davidson, deprem sonrasında kentsel yangınların nasıl yayıldığını modelleyen yeni bir simülasyon modeli sunmuştur. Yangının bir oda veya çatıdaki gelişimi, odadan odaya yangın yayılımı ve binadan binaya yangın yayılımı modellerini bünyesinde barındıran ve uyarlayan bu modelin, yangınların ne kadar, ne hızda, nerede ve nasıl yayılabileceğinin yanı sıra, bunda hangi unsurların en etkili olduğunun araştırılmasında da kullanılabileceği belirtilmiştir [13]. Lee ve Davidson tarafından diğer bir çalışmada, yangın yayılımının farklı biçimlerini içeren fizik tabanlı simülasyon modeline sahip bir vaka çalışması anlatılmış ve yangın yayılımının daha gerçekçi ve derinlemesine incelenmesine olanak sağlanmıştır. Aktif yangın söndürmenin entegre edilmesi ve su temini ile ulaşım hatları arasındaki etkileşimin dahil edilmesi yoluyla risk azaltma stratejilerinin değerlendirilebileceği belirtilmiştir [14]. Nishino vd., deprem sonrası yangınlarda kişilerin ve yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla hava koşulları, yangın çıkışlarının sayısı ve yeri, ilk aşamadaki yangınla mücadele faaliyetleri, ilk tahliye edilenlerin yerleri, yolların tıkanması ve binalarda deprem kaynaklı oluşan hasar gibi yangının yayılması ve tahliyesine ilişkin belirsiz faktörleri ele alan bir risk değerlendirme yöntemi sunmayı amaçlamıştır. Risk, Monte Carlo simülasyonu ve fizik bazlı yangın yayılımı ve tahliyesi simülasyonlarının bir kombinasyonu ile hesaplanmıştır [15]. Himoto vd. tarafından yapılan çalışmada, yer hareketi nedeniyle binalarda meydana gelen yapısal hasarı ve yangının ısınması nedeniyle ilerlemesini dikkate alarak fizik-tabanlı bir deprem sonrası yangın yayılma modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, 1995 depremi sırasında Kobe şehir

bölgesindeki yangının yayılımının simülasyonu ile doğrulanmış ve yanan bina sayısına ilişkin beklenen değerler elde edilmiştir [16]. Omidvar vd., İran'ın Kirmanşah kenti altında gömülü olan yakıt boru hattı sistemleri, boru hattı arızaları ve deprem sonrası yangın açısından hasar analizine odaklanmıştır. Simülasyon metodolojileri ile deprem sonrasında yangına maruz kalacak alan, ev sayısı ve nüfus için olasılık dağılım fonksiyonu hesaplanmıştır ve yangın hasarını azaltmak için risk hafifletme seçenekleri değerlendirilmiştir [17]. Himoto ve Nakamura, Monte Carlo simülasyonu ve fizik tabanlı kentsel yangın yayılım modeli kullanarak Japonya'nın Kyoto kentindeki 2131 tarihi binanın deprem sonrası yangın güvenliği açısından değerlendirilmesine yönelik bir analiz yapmayı amaçlamıştır. Tarihi yapıların yakınında tutuşma, yangının ilk aşamasında yangınla mücadele faaliyetlerinin yetersizliği ve kentsel bölgelerde geniş alana yayılan yangınlar, tarihi yapıların yangına maruz kalmasına neden olan özel olaylar olarak ele alınmıştır. Yapıların ve çevrelerindeki kentsel alanların yangın güvenliği açısından iyileştirilmesinin, tarihi binaların yangın güvenliğini artıracığı belirtilmiştir [18]. Shang vd., Monte Carlo simülasyonu ile deprem sonrası yangınları simüle ederek Tayvan'ın Taipei şehrinin yangın kurtarma kapasitesini değerlendirmiştir. Çalışmada sunulan modelin, ilgili alandaki potansiyel afet kaynak planlama ihtiyaçlarını değerlendirmek üzere kullanılabileceği belirtilmiş ve elde edilen bulgulardan yola çıkılarak ilgili riski azaltmaya yönelik stratejiler önerilmiştir [19]. Himoto ve Suzuki, altı farklı yangın koruma ekipmanında meydana gelebilecek sismik hasarı ele alarak, orta yükseklikte ve çok katlı binalarda deprem sonrası yangın riskini tahmin etmek üzere bir model oluşturmuştur. Bu model, duman yayılmasına yönelik model, bina sakinlerinin yangınla mücadele faaliyetlerine yönelik model ve bina sakinlerinin tahliyesine yönelik model olmak üzere üç alt modelden oluşmaktadır. Uygulanan vaka çalışmasında deprem sonrası yangın riski Monte Carlo simülasyonu ile değerlendirilmiş ve yangın güvenliği ekipmanının bulunmamasının sonuç olarak insan kayıplarının kapsamını artırdığı belirlenmiştir [20]. Liu vd. tarafından yapılan çalışmada, sismik olarak zayıf bir kentsel bölgede deprem sonrası yangın etkisi altında yolların boşaltılması sorunu ele alınmış ve kalabalık akışı, tahliye alanı ve deprem sonrası yangın ilişkileri araştırılmıştır. Bina yüksekliği ve rüzgar hızı, simülasyon modelinde ele alınacak hassas faktörler olarak belirlenmiş ve bu faktörlerin farklı değerlerinin yangının yayılma hızını da farklı şekilde etkilediği belirlenmiştir [21]. Xu vd. tarafından yapılan çalışmada, yağmurlama sistemlerinin sismik hasarını dikkate alan ve bu hasarın neden olduğu yangın yayılımının etkisinin niceliksel olarak değerlendirilmesine yardımcı olan bir deprem sonrası yangın simülasyonu yöntemi önerilmiştir. Deprem sonrası yangının yayılma sürecinin simüle edildiği bir vaka çalışması sonucunda hasarlı bir yağmurlama sisteminin yatay ve düşey yönde daha ciddi yangın tehlikelerine neden olabileceği sonucuna varılmıştır [22]. Lu vd. tarafından, bina sismik hasarını dikkate alarak deprem sonrası yangın afetinin fizik tabanlı simülasyonu ve yüksek kaliteli görselleştirilmesi için bir çerçeve sunulmuştur. İncelenen bölgedeki binaların sismik hasarı simüle edilmiş ve yangın yayılımı ile duman etkilerinin simüle etmeye yönelik bir görselleştirme yöntemi sunulmuştur. Farklı yer hareketleri ve bina sismik dirençlerinin tutuşma ve yangının yayılması üzerindeki etkisi dikkate alınarak deprem sonrası yangın olayının daha gerçekçi modellenebileceği belirtilmiştir [23]. Li vd. tarafından, sismik hasar ve deprem sonrası yangınların etkisi altında su dağıtım şebekelerinin hem yangınla mücadele akışını hem de orijinal talebi karşılamadaki afet sonrası performansını değerlendirmek amacıyla simülasyona dayalı bir model sunulmuştur. Hizmet verilebilirlikteki en önemli azalmanın deprem sonrası yangını takiben ilk birkaç saatte meydana gelen yoğun yangınla mücadele akışından kaynaklandığı ve yangınla mücadele için güvenilir bir ilave su kaynağının inşa edilmesinin yangın hasarını etkili bir şekilde azaltabileceği belirlenmiştir [24]. Nishino ve Hokuo, deprem sonrası yangın riskinin değerlendirilmesi amacıyla binalardaki deprem sonrası yangınların sayısının zaman serisi tahmini için stokastik bir model geliştirmiştir. Elektrik kaynaklarından meydana gelen tutuşmaların zamana bağlı oluşum modeli ile gaz, petrol veya diğer kaynaklardan meydana gelen tutuşmalar için zamandan bağımsız bir tutuşma modeli olmak üzere iki tür Poisson regresyon modeli kullanılmıştır. Önerilen modelin doğrulanması için 2011 Tohoku depremi tutuşma sayılarının zaman serisi tahmini Monte Carlo simülasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [25]. Rafi vd., yangının hem bina içerisindeki hem de binadan binaya yayılma mekanizmalarını dikkate alarak, yapı malzemelerine dayalı olarak yangının kitlesel yayılımının simülasyonu için bir model sunmuştur. Yapı bilgi verilerinin Coğrafi Bilgi Sistemi'ne entegrasyonu ve yangın yayılma mekaniğinin matematiksel formülasyonu ile uygulanan modelin, çalışmada ele alınan her iki modelleme mekanizması için de yangını yeterince simüle edebildiği ve literatürdeki diğer yöntemlere basit ve güvenilir bir alternatif olabileceği sonucuna

varılmıştır [26]. Coar vd. su şebekesi tasarımı, sismik tehlike ve elektrik şebekesine bağımlılık senaryosu olmak üzere üç parametrenin yangın musluklarında deprem sonrası su mevcudiyeti üzerindeki etkilerini inceleyerek deprem sonrası yangın söndürme kapasitesini topluluk düzeyinde değerlendirmeyi amaçlamıştır. Şebeke davranışının gerçekçi temsili için su temin performansı ile topoloji bazlı ve enerji bazlı şebeke performans ölçümlerinin kullanılması gerektiği belirtilirken; su şebekesinin elektrik şebekesine açık bağımlılığının dikkate alınması tavsiye edilmiştir [27]. Himoto tarafından yapılan çalışmada, hiyerarşik Bayes yaklaşımı kullanılarak Japonya'da 1995-2016 yılları arasında meydana gelen beş büyük deprem sonrası yangın tutuşma olasılıklarının analizi sunulmuştur. Tutuşma nedenlerine yönelik parametrelerin hedef sonsal dağılımlarından örnekler alınabilmesi için simülasyon metodolojilerinden yararlanılmıştır. Hiyerarşik Bayes yaklaşımının, farklı bölgesel ve mevsimsel özellikleri modelleme sorununu çözmek için sistematik ve rasyonel bir çerçeve sağlayarak deprem sonrası tutuşma olasılıklarını tahmin etmede istatistiksel güvenilirliği artırdığı belirtilmiştir [28]. Lu vd. tarafından Yapı Bilgi Modellemesi ve sanal gerçekliğe dayalı iç mekan deprem sonrası yangın kurtarma senaryosunun simülasyonu için bir çalışma yürütülmüştür. Bina bileşenlerinin sismik hasarı ve duman yayılımının görselleştirilmesi ile bina içi yangın yayılımı ve kurtarma aşamaları analiz edilmiştir. Önerilen metodolojinin gerçekçi bir deprem sonrası yangın senaryosu oluşturulmasına bilimsel bir temel sağlayacağı belirtilmiştir [29]. Lotfi vd. tarafından, deprem sonrası yangın afeti sırasında yüksek katlı bir binada güvenli bir tahliye planının garanti edilip edilemeyeceğini değerlendirmek üzere bir çerçeve önerilmiştir. Bu amaçla; Yapı Bilgi Modellemesi'nden yararlanılarak çok katlı bir bina modellenmiş, yangın ve duman simülasyonları ile senaryo analizleri yapılmıştır. Doğru sonuçlar elde edilebilmesi için yangının tamamen simüle edilmesi ve binanın tüm katlarının dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [3]. Sarreshtehdari ve Elhami Khorasani, yangın söndürme sürecini ve itfaiye müdahalesini modelleyerek deprem sonrası yangınları simüle etmeye yönelik mevcut yöntemleri geliştirmeyi amaçlamıştır. Ulaşım ağı, su ve elektrik şebekeleri gibi altyapı sistemlerinin katmanları ile bina envanteri, depremin topluma verdiği hasarı karakterize edecek şekilde modellenmiştir. Yangın yayılımı ile yangını bastırma faaliyetleri de modellenerek tutuşma konumlarına itfaiye atamaları için bir karar verme algoritması uygulanmıştır [30]. Coar vd., art arda gelen deprem ve yangın felaketlerinin etkileri ile yapı envanteri, su şebekesi ve ulaşım ağı olmak üzere üç altyapı sisteminin zarar görebilirliğini, depremi takip eden 12 saat içerisinde itfaiyecilerin ve diğer acil durum hizmetlerinin ihtiyaçlarına özel olarak odaklanarak ele almıştır. Kentsel bir alan için topluluk ölçeğinde tahmin modelleri oluşturmak üzere bir çerçeve sunulurken, mevcut veri deprem sonrası yangın hasarına en duyarlı bölgelerin belirlenmesinde kullanılmıştır [31]. Hou ve Li, sismik boru hattı hasarının ve deprem sonrası yangınların çoklu tutuşma etkileri altında, su dağıtım sisteminin yangınla mücadele kapasitesini değerlendirmek ve deprem sonrası yangınlar ile boru hattı hasarının mekansal dağılımlarını simüle etmek üzere entegre bir prosedür geliştirmiştir. Önerilen yöntemin olası uygulamaları için çoklu eş zamanlı su taleplerinin etkileri üzerine analizler yapılmış ve yangının tutuşma olasılığını azaltmanın deprem sonrası yangına direnme kapasitesini artırmada boru hattı sistemini güçlendirmeye göre daha etkili olduğu belirtilmiştir [32]. Scheele vd. tarafından yapılan çalışmada; aktif faylara yakınlık, yakın aralıklı ahşap kaplı binalar, zarar görebilirliği yüksek su ve gaz altyapısı, sık şiddetli rüzgarlar ve acil durum hizmetlerine erişimin zor olması gibi tutuşmaya ve yangının yayılmasına duyarlı birçok özelliğe sahip olan Yeni Zelanda'nın Wellington şehri ele alınmıştır. Yer hareketlerindeki belirsizlik, tutuşmaların sayısı ve lokasyonları, hava koşulları ve yangınla mücadele kapasitesi ele alınarak deprem sonrası yangının tutuşması, yayılması ve bastırılması modellenmiş ve riskli alanlar belirlenmiştir [33]. Tong ve Gernay, geçmişte meydana gelen bir deprem sonrasında yangın çıkma sayısını etkileyen değişkenleri analiz ederek, deprem sonrasında oluşabilecek yangın sayısını tahmin etmeyi amaçlamıştır. Önerilen modelin simülasyon uygulaması için varsayımsal bir vaka çalışması uygulanmıştır. Hiyerarşik Bayes modeliyle elde edilen tutuşma verilerinin, ele alınan geçmiş depremlerde yaşanan tutuşma sayılarıyla uyumlu olduğu, modelin gelecekteki sismik olaylarda tutuşmaları değerlendirmek üzere kullanılabilmesi belirtilmiştir [34]. Wu vd. tarafından, deprem sonrası bina çökmelerini ve yangın nedeniyle yolların geçiş kabiliyetini dikkate alan bir deprem sonrası trafik simülasyon yöntemi önerilmiştir. Elde edilen sonuçların deprem sonrası trafik durumunun belirlenmesinde ve deprem sonrası tahliye ve kurtarma kararlarının alınmasında referans sağlayabileceği belirtilmiştir [35]. Nishino ise, bölgesel ölçekte yer sarsıntısı ve deprem sonrası yangınlara ilişkin çoklu tehlike riskini değerlendirmek üzere olasılıksal bir metodoloji sunmuştur. Kullanılan yangın modelleri; deprem sonrası yangın tutuşma

modelleri, hava durumu modeli, fizik-tabanlı kentsel yangın yayılma modeli ve itfaiye müdahale modellerini içermektedir. Belirsiz faktörlerin değerlendirmelere dahil edilmesini sağlayan entegre modelleme metodolojisinin, mevcut riskin anlaşılmasında ve risk azaltmaya yönelik karar verme aşamalarında kullanışlı olacağı belirtilmiştir [36].

4. Sonuç ve Çıkarımlar

Deprem sonrası yangınlar, birçok belirsiz risk faktörü barındırmaları sebebiyle ikincil afetlerin en tehlikelilerinden biri olarak tanımlanmaktadır ve tarihi olaylara dair veriler de bunu doğrulamaktadır. Bu afetler, sismik hasarın daha ileri boyutlara ulaşmasına sebebiyet verebilmektedir.

Bu çalışmada, deprem sonrası yangın afetinde simülasyon metodolojileri üzerine kavramsal bir bakış açısı sunmak amacıyla literatür araştırması ve bibliyografik analiz yaklaşımlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla bibliyografik veri analizi ve görselleştirmesinde yaygın olarak kullanılan Bibliometrix ve VosViewer araçları kullanılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar; deprem sonrası yangınların belirli bina tipleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, deprem sonrası yangının su hattı, ulaşım ağı veya sismik hasara uğramış yangınla mücadele ekipmanları gibi spesifik faktörler açısından ele alınması, yangını bastırma, yangınla mücadele ve tahliye faaliyetlerinin analizi, risk değerlendirmesi ve kayıp tahmini gibi çeşitli alanlardadır. Simülasyon metodolojileri; deprem sonrası yangının tutuşma aşamasında tutuşmalarının sayısının, yerlerinin ve zamanlarının belirlenmesi, yangından etkilenebilecek binaların ve toplam nüfusun belirlenmesi, belirli bina tiplerinin güvenilirliğinin analiz edilmesi, potansiyel toplam yanan alanın belirlenmesi ve itfaiyecilerin öncelikli olarak çalışması gereken alanın belirlenmesi için kullanılabilir. Yangının yayılma aşamasında yangının nereye, ne şekilde ve ne hızda yayıldığının incelenmesi, yangının gelişiminin modellenmesi, farklı zaman aralıklarında yapıların durumlarının analizi ile zaman içerisinde yangına maruz kalan yapı sayısı ve toplam nüfusun belirlenmesi, belirli yangınla mücadele ekipmanlarının sismik hasarı ele alınarak yangın yayılımının değerlendirilmesi ve duman yayılımının incelenmesi amacıyla simülasyon metodolojilerinden yararlanılmaktadır. Bastırma ve tahliye aşamasında ise yangının sürme zamanının belirlenmesi, su şebekesi vb. altyapı unsurlarının sismik hasarı dikkate alınarak yangınla mücadele faaliyetlerinin değerlendirilmesi, tahliye planları ve kurtarma faaliyetlerinin değerlendirilmesi, tahsis edilmesi gereken itfaiye araçlarının sayısının belirlenmesi ve tahliye süresinin belirlenmesi için trafik simülasyonu gibi çeşitli alanlarda simülasyon yer almaktadır.

Simülasyon modellerinde kullanılan veriler çalışmanın kapsamına ve ele alınan bölgeye göre çeşitlilik göstermektedir. Tutuşma modellerinde genellikle tepe yer ivmesi, sismik yoğunluk ve tutuşma kaynaklarının durumu gibi girdiler dikkate alınmaktadır. Yayılma ve bastırma modellerinde ise bina özelliklerine, imar planına ve çevre koşullarına ilişkin çeşitli faktörler analize dahil edilmektedir. Bina yüksekliği, binalar arası alan, bina çeşitleri ve bina şekilleri, ahşap bina yüzdesi, bina hasar durumu, eğim ve bitki örtüsü gibi faktörler bunlara örnek olarak sıralanabilir. Hava durumuna ilişkin hava sıcaklığı, nem, yağış, rüzgar hızı ile rüzgar yönü gibi faktörler de bu modellerde içerilen değişkenler arasında yer almaktadır. Bastırma modellerinde ayrıca yangını söndürmek üzere mevcut su kaynakları ve su şebekesinin durumu, gerekli su miktarı ve trafik ağı gibi faktörler de ele alınmaktadır. Sismik yoğunluğun ölçümündeki potansiyel belirsizlikler ve hatalar, geçmiş depremlere ilişkin farklı kaynaklardan elde edilen verilerde tekrar, çelişki ve sapmalar ile veri eksikliği nedeniyle deprem sonrası yangında etkili olan birçok farklı faktör arasındaki niceliksel ilişkilerin belirsizliği gibi durumlar modellemeyi güçleştiren faktörler arasında yer almaktadır.

Simülasyon metodolojileri ile entegre olarak, tutuşma alanlarına itfaiye araçlarının atanması gibi problemler için çok kriterli karar verme algoritmaları, yapıların ve binalardaki oda konfigürasyonunun detaylı incelemesi için Coğrafi Bilgi Sistemi, bina içi faktörlerin değerlendirmelere dahil edilmesi için Yapı Bilgi Modellemesi ve yer hareketi tahmini gibi deprem sonrası yangın çerçevesinde yer alan bazı faktörlerin ele alınması için çeşitli olasılıksal ve istatistiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Genel olarak modellerin tutuşma, yayılma ve tahliye faaliyetlerini bütünsel olarak ele alarak daha detaylı bir analiz sunulması önerilmektedir. Deprem kaynaklı bina, söndürme ekipmanı, gaz sistemi ve elektrik

ağı hasarı, yangınla mücadele çalışmaları, su temin ağı, ulaşım hatları, yangın yayılımının çeşitli mekanizmaları, iklimsel ve mevsimsel faktörler, depremin zamanlaması, bitki örtüsü, bölgesel jeoloji, tektonik çerçeve ve depremsellik gibi faktörlerin mevcut modellere entegre edilmesiyle daha etkili analizler yürütülebileceği belirtilmektedir. Mevcut modellerin uyarlanabilirliklerinin genişletilebileceği, duyarlılık analizi gibi çeşitli analizler ek doğrulamalar yapılabileceği, daha rasyonel verilerin kullanımı ile analizlerin geliştirilebileceği ve yangından korunma planlaması ile yangınla mücadele faaliyetleri kapsamında karar vericilerin ilgili afeti yorumlama kabiliyetlerinin geliştirilmesi için deprem sonrası yangın afetinin yüksek kalitede görselleştirilmesi ile karar verme süreçlerinin desteklenebileceği belirtilmektedir.

Deprem sonrası yangında simülasyon metodolojilerine kavramsal bir bakış açısının sunulduğu bu çalışmanın temel kısıtları olarak iki akademik veri tabanı ile belirli anahtar kelimeler ve filtreleme kriterlerinin kullanılmış olması sıralanabilir. Farklı akademik veri tabanlarının da araştırmaya dahil edilmesi ve çeşitlendirilmiş anahtar kelimeler ile ele alınan konuya dair daha detaylı bir analiz sağlanabilir.

Contribution of Researchers

All researchers have contributed equally to writing this paper.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Referanslar

- [1] A. Coburn & R Spence, "*Earthquake protection*", John Wiley & Sons, 2002.
- [2] B. Behnam, "*Post-earthquake fire analysis in urban structures: Risk management strategies*", CRC Press, 2017.
- [3] N. Lotfi, B. Behnam & F. Peyman, "A BIM-based framework for evacuation assessment of high-rise buildings under post-earthquake fires", *Journal of Building Engineering*, 43, 102559, 2021. DOI: 10.1016/j.job.2021.102559
- [4] N. Elhami Khorasani & M. E. Garlock, "Overview of fire following earthquake: Historical events and community responses", *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 8(02), 158-174, 2017. DOI: 10.1108/IJDRBE-02-2015-0005
- [5] C. Scawthorn, J. M. Eidinger & A. Schiff, (Eds.), "*Fire following earthquake*", Vol. 26, ASCE Publications, 2005.
- [6] M. Aria & C. Cuccurullo, "bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis", *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975, 2017.
- [7] N. Van Eck & L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping", *scientometrics*, 84(2), 523-538, 2010.
- [8] A. Z. Ren & X. Y. Xie, "The simulation of post-earthquake fire-prone area based on GIS", *Journal of fire sciences*, 22(5), 421-439, 2004. DOI: 10.1177/0734904104042440
- [9] S. J. Zhao, L. Y. Xiong & A. Z. Ren, "A spatial-temporal stochastic simulation of fire outbreaks following earthquake based on GIS", *Journal of Fire Sciences*, 24(4), 313-339, 2006. DOI: 10.1177/0734904106060786
- [10] S. Lee, R. Davidson, N. Ohnishi & C. Scawthorn, "Fire following earthquake—Reviewing the state-of-the-art of modeling", *Earthquake spectra*, 24(4), 933-967, 2008. DOI: 10.1193/1.2977493
- [11] C. J. Huang, Y. S. Wu, K. Y. Chang & C. H. Chang, "Reliability analysis of rescue capabilities of fire-fighting units after earthquake", *Journal of Applied Fire Science*, 18(2), 143-154, 2008. DOI: 10.2190/AF.18.2.c
- [12] S. Zhao, "GisFFE—an integrated software system for the dynamic simulation of fires following an earthquake based on GIS", *Fire Safety Journal*, 45(2), 83-97, 2010. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.11.001
- [13] S. W. Lee & R. A. Davidson, "Physics-based simulation model of post-earthquake fire spread", *Journal of Earthquake Engineering*, 14(5), 670-687, 2010. DOI: 10.1080/13632460903336928
- [14] S. W. Lee & R. A. Davidson, "Application of a physics-based simulation model to examine post-earthquake fire spread", *Journal of Earthquake Engineering*, 14(5), 688-705, 2010. DOI: 10.1080/13632460903336936
- [15] T. Nishino, T. Tanaka & A. Hokugo, "An evaluation method for the urban post-earthquake fire risk considering multiple scenarios of fire spread and evacuation", *Fire safety journal*, 54, 167-180, 2012. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.06.002
- [16] K. Himoto, K. Mukaibo, Y. Akimoto, R. Kuroda, A. Hokugo & T. Tanaka, "A physics-based model for post-earthquake fire spread considering damage to building components caused by seismic motion and heating by fire", *Earthquake*

- spectra*, 29(3), 793-816, 2013. DOI: 10.1193/1.4000154
- [17] B. Omidvar, M. Eskandari & E. Peyghaleh, "Seismic damage to urban areas due to failed buried fuel pipelines case study: fire following earthquake in the city of Kermanshah, Iran", *Natural hazards*, 67, 169-192, 2013. DOI: 10.1007/s11069-013-0554-9
- [18] K. Himoto & T. Nakamura, "An Analysis of the post-earthquake fire safety of historic buildings in Kyoto, Japan", *Fire Technology*, 50, 1107-1125, 2014. DOI: 10.1007/s10694-013-0330-0
- [19] S. Shang, C. Su, C. Huang, S. Kao, Y. Wu & C. Lin, "The evaluation of fire rescue capability from post-earthquake fires in Taipei, Taiwan", *Journal of Earthquake and Tsunami*, 8(05), 1450014, 2014. DOI: 10.1142/S1793431114500146
- [20] K. Himoto & K. Suzuki, "Probabilistic fire risk assessment of a mid-rise or high-rise building with fire safety equipment systems damaged by seismic shaking", *Journal of Environmental Engineering (Japan)*, 81(728), 855-863, 2016. DOI: 10.3130/aije.81.855
- [21] X. Liu, W. Wang, T. Dong & Z. Yang, "Dynamic evaluation on road's evacuation capability under the influence of post-earthquake fire in urban seismic weak area", *Disaster Advances*, 11 (1), 57-65, 2018.
- [22] Z. Xu, Z. Zhang, X. Lu, X. Zeng & H. Guan, "Post-earthquake fire simulation considering overall seismic damage of sprinkler systems based on BIM and FEMA P-58", *Automation in Construction*, 90, 9-22, 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.02.015
- [23] X. Lu, X. Zeng, Z. Xu & H. Guan, "Physics-based simulation and high-fidelity visualization of fire following earthquake considering building seismic damage", *Journal of earthquake Engineering*, 23(7), 1173-1193, 2019. DOI: 10.1080/13632469.2017.1351409
- [24] Y. Li, J. Gao, H. Zhang, L. Deng & P. Xin, "Reliability assessment model of water distribution networks against fire following earthquake (FFE)", *Water*, 11(12), 2536, 2019. DOI: 10.3390/w11122536
- [25] T. Nishino & A. Hokugo, "A stochastic model for time series prediction of the number of post-earthquake fire ignitions in buildings based on the ignition record for the 2011 Tohoku Earthquake", *Earthquake spectra*, 36(1), 232-249, 2020. DOI: 10.1177/8755293019878184
- [26] M. M. Rafi, T. Aziz & S. H. Lodi, "A suggested model for mass fire spread", *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(4), 214-231, 2020. DOI: 10.1080/23789689.2018.1519308
- [27] M. Coar, M. Garlock & N. Elhami Khorasani, "Effects of water network dependency on the electric network for post-earthquake fire suppression", *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(5), 269-288, 2020. DOI: 10.1080/23789689.2018.1563408
- [28] K. Himoto, "Hierarchical Bayesian modeling of post-earthquake ignition probabilities considering inter-earthquake heterogeneity", *Risk Analysis*, 40(6), 1124-1138, 2020. DOI: 10.1111/risa.13455
- [29] X. Lu, Z. Yang, Z. Xu & C. Xiong, "Scenario simulation of indoor post-earthquake fire rescue based on building information model and virtual reality", *Advances in Engineering Software*, 143, 102792, 2020. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2020.102792
- [30] A. Sarreshtehdari & N. E. Khorasani, "Integrating the fire department response within a fire following earthquake framework for application in urban areas", *Fire safety journal*, 124, 103397, 2021. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103397
- [31] M. Coar, A. Sarreshtehdari, M. Garlock & N. Elhami Khorasani, "Methodology and challenges of fire following earthquake analysis: an urban community study considering water and transportation networks", *Natural hazards*, 109(1), 1-31, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04795-6
- [32] G. Hou & Q. Li, "Firefighting capacity evaluation of water distribution system subjected to multi-ignitions of post-earthquake fires", *Structural safety*, 88, 102035, 2021. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102035
- [33] F. Scheele, B. Lukovic, J. Moratalla, A. Dunant & N. Horspool, "Estimating fire following earthquake risk for Wellington City, New Zealand", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 55(4), 241-256, 2022. DOI: 10.5459/BNZSEE.55.4.241-256
- [34] Q. Tong & T. Gernay, "A hierarchical Bayesian model for predicting fire ignitions after an earthquake with application to California", *Natural Hazards*, 1-24, 2022. DOI: 10.1007/s11069-021-05109-6
- [35] Y. Wu, Z. Xu, C. Liang & R. Song, "Post-earthquake traffic simulation considering road traversability", *Sustainability*, 14(18), 11145, 2022. DOI: 10.3390/su141811145
- [36] T. Nishino, "Probabilistic urban cascading multi-hazard risk assessment methodology for ground shaking and post-earthquake fires", *Natural Hazards*, 116(3), 3165-3200, 2023. DOI: 10.1007/s11069-022-05802-0