Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KARAYOLLARINDA DİRENÇLİLİK DEĞERLENDİRMESİ: D100 KARAYOLU ÜZERİNE BİR VAKA ANALİZİ

RESILIENCE ASSESSMENT OF HIGHWAYS: A CASE STUDY ON THE D100 HIGHWAY

Ahmet Kaan YILDIRIM[1], İlknur BOZBEY[2], Sadık ÖZTOPRAK[3]

ÖZET

Bu çalışmada karayollarının deprem sonrası dirençliliği, hasargörebilirliğe bağlı işlevsellik kaybı ve onarım süresi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Hasargörebilirlik için kırılganlık eğrileri ve indeks tabanlı yaklaşımlar kullanılırken onarım süresi için onarım eğrileri kullanılmıştır. Hasar durumu için sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma yerdeğiştirmeleri seçilmiştir. Yaklaşım sıvılaşma sonrası ciddi yanal yayılma potansiyeli bulunan Küçükçekmece ile Avcılar arasında iç ve dış kumsal olarak adlandırılan bölgedeki D100 karayoluna uygulanmıştır. Çalışmada D100 karayolu elde edilen sıvılaşma potansiyel haritalarına göre üç bölüme ayrıldıktan sonra dirençlilik değerlendirmesi yapılmıştır. Hasargörebilirlik değerlendirmesi sonrasında birinci ve üçüncü bölümün ağır hasar, ikinci bölümün orta hasar alacağı ve bu hasar sonrasında karayolunda işlevsellik kaybının birinci ve üçüncü bölümde yaklaşık %45'e, ikinci bölümde ise %70'e düşeceği tahmin edilmiştir. Onarım eğrilerine göre bu işlevsellik kayıplarının deprem sonrası tam işlevselliğe ulaşma süresi sırasıyla 60 ve 7 gündür. Oluşturulan dirençlilik üçgenine göre karayolunun ikinci bölümünün birinci ve üçüncü bölümünden göreceli olarak daha dirençli olduğu ortaya konulmuştur. Sonuç olarak bu çalışma, karayollarının sismik dirençliliğinin değerlendirilmesine özgün bir yaklaşım sunmakta ve sismik bölgelerde altyapı güvenliliğinin arttırılmasına yönelik bir karar destek aracı önermektedir.
Anahtar Kelimeler: *Sismik hasargörebilirlik, Karayolu dirençliliği, Sıvılaşma, Yanal yayılma*

ABSTRACT

In this study, the post-earthquake resilience of highways was evaluated by jointly considering functionality loss associated with vulnerability and the time required for recovery. Fragility curves and index-based approaches were employed to assess vulnerability, while restoration curves were used to estimate recovery time. Liquefaction-induced lateral spreading displacements were selected as the primary damage mechanism. The proposed approach was applied to the D100 Highway along the narrow coastal corridor between Küçükçekmece and Avcılar, locally known as the inner and outer beach area, where a significant potential for liquefaction-induced lateral spreading exists. Based on the developed liquefaction potential maps, the D100 Highway was divided into three sections, and resilience assessments were performed separately for each section.The vulnerability assessment indicated that the first and third sections are expected to experience heavy damage, whereas the second section is expected to experience moderate damage. Following these damage states, the functionality level of the highway was estimated to decrease to approximately 45% in the first and third sections and to approximately 70% in the second section. According to the restoration curves, the times required to regain full functionality after the earthquake were estimated as 60 days for the first and third sections and 7 days for the second section. Based on the constructed resilience triangle, the second section of the highway was found to be relatively more resilient than the first and third sections. Overall, this study proposes an original approach for evaluating the seismic resilience of highways and provides a decision-support framework aimed at improving infrastructure safety in seismically active regions.
Keywords: *Seismic vulnerability, Highway resilience, Liquefaction, Lateral spreading*

[1] Dr.Öğr.Üyesi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, ahmetkaan.yildirim@nisantasi.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof.Dr, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
[3] Prof.Dr, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

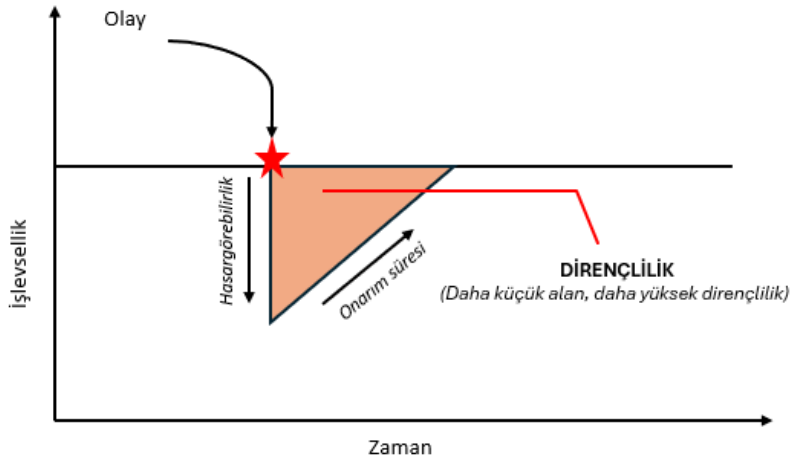
1. GİRİŞ

Dirençlilik kavramı ilk olarak Holling (1973) tarafından sistemlerin sürekliliğinin, değişim ve hasarı sönümleme, popülasyonlar veya durum değişkenleri arasındaki aynı ilişkiyi sürdürme yeteneklerinin bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Dirençlilik, birçok tanımı olan bir terimdir. Bu tanımlar analiz nesnesine (örneğin sistem, topluluk/bölge) bağlı olarak değişmektedir (Carlson vd., 2012). Dirençlilik, bir sistemin kesintilere karşı direnç gösterebilmesi, bu kesintilerden hızla toparlanarak ve uyum sağlayarak işlevini sürdürebilmesi yeteneğidir. Bu kavram, özellikle kritik altyapı sistemleri ve geoteknik varlıkların doğal afetlerle başa çıkabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Doğal afetler ise kritik altyapıları tahrip etme potansiyeline sahiptir ve toplumlar üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Dolgular, köprü temelleri, istinat yapıları ve tüneller gibi geoteknik yapılar ulaştırma altyapısının hayati bileşenleri olup halka temel hareketlilik hizmeti sağlar. Ancak inşaat mühendisliğinde kullanılan malzemeler arasında bilinmezliklerle dolu olan zemin nedeniyle bu geoteknik varlıkların tehlikelere karşı kırılganlığı en yüksek düzeydedir (Lee, 2016). Doğal olarak, kamu güvenliği, ekonomi ve yaşam kalitesi, büyük ölçüde geoteknik altyapının durumuyla ilişkilidir. Bu nedenle, geoteknik mühendislerinin yalnızca fiziksel altyapı sistemlerinin değil aynı zamanda yerel toplulukların dirençliliğini artırmada da önemli bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir. Dirençlilik kavramının geoteknik altyapılara pratikte uygulanabilmesi için sistematik olarak altyapı dirençliliğini nicel olarak ölçebilecek bir çerçeveye ihtiyaç vardır. Bu çerçeve çeşitli dirençlilik ölçütlerini ve sürdürülebilirlik göstergelerini içermeli kapsamlı bir analiz sağlamalıdır. Böylece geoteknik varlıklar dikkate alınarak altyapı sisteminin dirençliliğini artırmaya yönelik en etkili stratejinin belirlenmesinde bir karar destek aracı olarak kullanılabilir. Altyapı, toplumumuzun ve ekonomimizin belkemiği olarak kabul edilmekte olup dünyanın ekonomik ve sosyal refahı ile sürdürülebilirliğinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ulaşım sistemleri temel kritik altyapılardan biri olarak ulusal güvenliğin korunmasında ve doğal afetler sırasında ve/veya sonrasında ülkelerin toparlanma sürecini desteklemede hayati bir rol üstlenmektedir (El-maissi vd., 2021). Bununla birlikte, depremler ulaşım sistemlerini etkileyebilecek ve işlevsiz hâle getirebilecek en yıkıcı afetlerden biri olarak kabul edilmektedir. Karayolları, depremler sırasında ve sonrasında afet müdahalesi ile iyileştirme süreçlerinde hayati bir rol üstlenmektedir. Arama-kurtarma ekiplerinin afet bölgesine hızlı bir şekilde ulaşması, acil tıbbi yardımların sağlanması ve temel ihtiyaçların depremden etkilenen bölgelere ulaştırılması gibi kritik faaliyetler büyük ölçüde karayolu ulaşımının sürekliliğine bağlıdır (Byun ve D'Ayala, 2022). Ayrıca, karayolları deprem sonrasında sosyo-ekonomik sistemlerin yeniden inşasında önemli bir lojistik altyapı olarak işlev görmektedir. Bu sebeple karayollarının depremlere karşı dirençli olması gerekmektedir. Mühendislik disiplinlerinde uygulanan dirençlilik kavramı, çoğunlukla Pimm (1984)'in tanımını takip eder ve hasarlara karşı dayanıklılık ve iyileşme hızına odaklanır. Bu kavramdan yola çıkarak bu çalışmada karayollarının deprem sonrası dirençliliği, hasargörebilirliğe bağlı işlevsellik kaybı ve onarım süresi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Hasargörebilirlik için kırılganlık eğrileri ve indeks tabanlı yaklaşımlar kullanılırken onarım süresi için onarım eğrileri kullanılmıştır. Hasar durumu için sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma yerdeğiştirmeleri seçilmiştir. Yaklaşım sıvılaşma sonrası ciddi yanal yayılma potansiyeli bulunan Küçükçekmece ile Avcılar arasında iç ve dış kumsal olarak adlandırılan bölgedeki D100 karayoluna uygulanmıştır. Çalışma, karayollarının sismik dirençliliğinin değerlendirilmesine özgün bir yaklaşım sunmakta ve

sismik bölgelerde altyapı güvenliliğinin arttırılmasına yönelik bir karar destek aracı önermektedir.

2. MATERYAL VE METOD

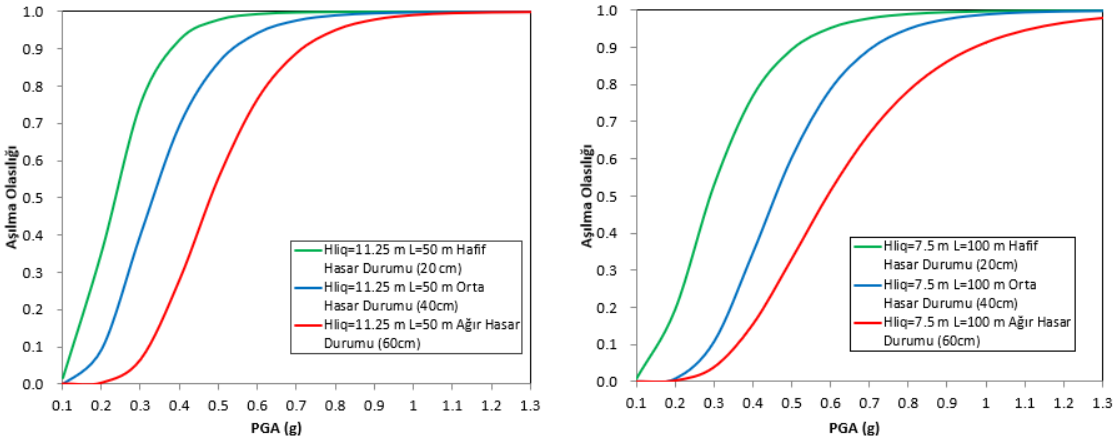
Karayollarında dirençlilik, hasargörebilirlik ve hasar sonrası varlıkların eski işlevselliğine geri döndürülmesi için gerekli olan onarım süresinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1'de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1'e göre yıkıcı olayın meydana geldiği anda karayolunun işlevselliğinde ani bir azalma gerçekleşmektedir. Bu azalma sistemin hasargörebilirlik düzeyini temsil etmektedir. Olay sonrasında gerçekleştirilen acil müdahale, geçici onarım ve kalıcı iyileştirme faaliyetleriyle birlikte işlevsellik zaman içerisinde yeniden artmakta, sistem hedeflenen hizmet düzeyine ulaşmasına kadar geçen süre ise onarım süresi olarak tanımlanmaktadır. Daha dirençli bir karayolu sistemi oluşturulabilmesi için olay sonrasında meydana gelen dirençlilik üçgeni olarak tanımlanan alanın mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Bu alanın daha küçük olması ise olay öncesi hasargörebilirliğin azaltılmasına ya da sistemi orijinal durumuna getirebilmek için geçen sürenin kısaltılmasına bağlıdır.



Şekil 1. Yıkıcı bir olay sonrasında karayolu işlevselliği hasargörebilirlik onarım süresi ve dirençlilik arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Brabhaharan, 2006).

Bu çalışma kapsamında karayollarının deprem sonrası dirençliliğinin değerlendirilmesi amacıyla hasargörebilirlik, işlevsellik kaybı, onarım süresi bileşenlerini bütünleşik olarak ele alan bir değerlendirme çerçevesi benimsenmiştir. Önerilen yaklaşımda karayolu sisteminin sismik performansını etkileyen temel hasar mekanizması olarak sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma dikkate alınmıştır. Hasargörebilirlik Yıldırım (2025)'te önerilen karayolu dolgularında sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma için üretilen kırılganlık eğrileri ve hasargörebilirlik indeksi kullanılarak yapılmıştır.

Yıldırım (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı sıvılaşabilir tabaka kalınlığı ve serbest yüzeye uzaklık koşullarını temsil eden nümerik modeller için iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen yanal yer değiştirme değerleri esas alınarak analitik kırılganlık eğrileri üretilmiştir. Bu kapsamda hafif, orta ve ağır hasar durumları için belirlenen yanal yer değiştirme eşiklerinin aşılma olasılıkları PGA'ya bağlı olarak tanımlanmış ve her bir zemin-geometri kombinasyonu için hasar olasılığını ifade eden kırılganlık ilişkileri elde edilmiştir. Şekil 2'de farklı sıvılaşabilir tabaka kalınlığı ve serbest yüzeye uzaklık koşulları için geliştirilen analitik kırılganlık eğrilerine örnekler sunulmaktadır.



Şekil 2. Farklı sıvılaşabilir tabaka kalınlığı ve serbest yüzeye uzaklık koşulları için geliştirilen analitik kırılganlık eğrileri (Yıldırım, 2025)

Yıldırım (2025) tarafından karayollarının yanal yayılma etkilerine karşı hasargörebilirliğinin nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla Karayolları için Yanal Yayılma Kaynaklı Hasargörebilirlik İndeksi (KYYHİ) önerilmiştir. KYYHİ sismik, topoğrafik, yapısal ve zemin özelliklerini birlikte dikkate almakta, ana parametreler ile bu parametrelere bağlı faktörlerin göreli önemleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle ağırlıklandırılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. KYYHİ için AHP ile elde edilen parametre ve faktör ağırlıkları ile kategori puanları (Yıldırım,2025)

Ana parametre	Faktör	Kategori	Puan
SISMIK *Parametre ağırlığı* 0.40	R_{JB} *Faktör ağırlığı 0.44*	0 km 10 km 20 km 30 km	40 30 20 10
	M_w *Faktör ağırlığı 0.56*	7.5 7.0 6.5	30 20 10
TOPOĞRAFYA *Parametre ağırlığı* 0.25	Eğim *Faktör ağırlığı 0.47*	3% 2% 1%	30 20 10
	Serbest Sahaya Uzaklık *Faktör ağırlığı 0.53*	50 100 200 400	40 30 20 10
YAPISAL *Parametre ağırlığı* 0.16	Şerit Sayısı *Faktör ağırlığı 0.24*	<2 şerit >2 şerit	20 10
	Dolgu Yüksekliği *Faktör ağırlığı 0.32*	H>8m 5m<H<8m 2m<H<5m H<2m	40 30 20 10
	Dolgu Eğimi *Faktör ağırlığı 0.24*	>2/3 <2/3	20 10
	Dolgu Kalitesi *Faktör ağırlığı 0.20*	Standartlara uygun değil Standartlara uygun	20 10

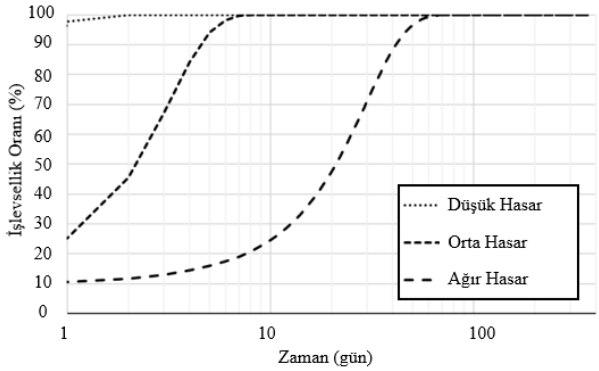
Ana parametre	Faktör	Kategori	Puan
ZEMIN *Parametre ağırlığı* 0.18	Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı *Faktör ağırlığı 0.*49	10 m 8 m 6 m 4 m 2 m	50 40 30 20 10
	Sıvılaşan Zeminin İDO *Faktör ağırlığı 0.*11	0 5% 10% 15% 20%	50 40 30 20 10
	Sıvılaşan Zeminin Sıkılığı *Faktör ağırlığı 0.*40	Gevşek Orta Sıkı Sıkı	30 20 10

Her faktör için tanımlanan kategori puanları, parametre ve faktör ağırlıkları ile birlikte aşağıdaki denklem kullanılarak indeks değerine dönüştürülmektedir.

$$KYYH\dot{I} = \sum_{i=1}^{2} P_i \sum_{j=1}^{2\ ya\ da\ 4} F_j . K_{ijk} \quad (1)$$

Burada,
Pi=Parametre ağırlık katsayısı
Fj=Faktör ağırlık katsayısı
Kijk=Kategori puanı k=2,3,4 ya da 5

Hasargörebilirlik değerlendirmesi yukarıda bahsedilen iki yönteme göre yapılmış ve Hasargörebilirlik sonrası işlevsellik kaybına göre onarım süresi için ise HAZUS (2024)'te sunulan onarım eğrileri kullanılmıştır (Şekil 3). Bu çalışma kapsamında önerilen çerçeveye örnek teşkil etmesi amacıyla Küçükçekmece-Avcılar D100 karayolu çalışma alanı olarak seçilmiştir.



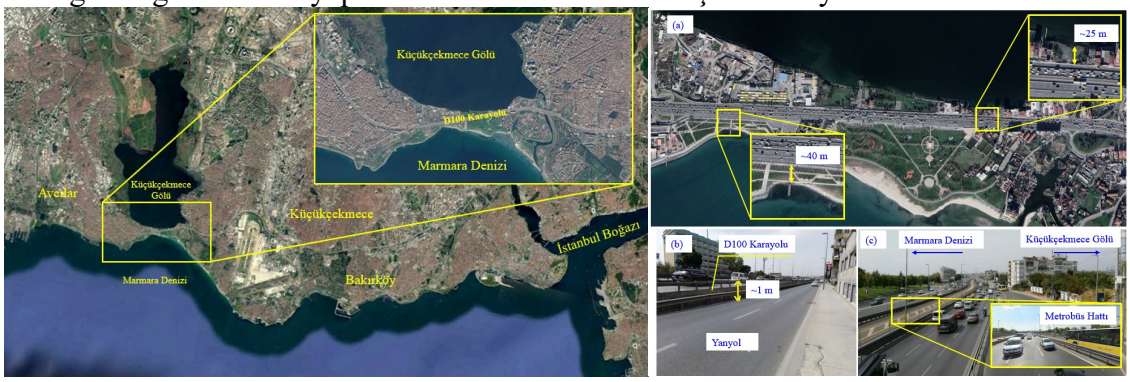
Şekil 3. Karayolları için onarım eğrileri (HAZUS,2024)

3. KÜÇÜKÇEKMECE-AVCILAR D100 KARAYOLUNUN DİRENÇLİLİK DEĞERLENDİRMESİ

3.1.Çalışma Alanının Tanıtılması

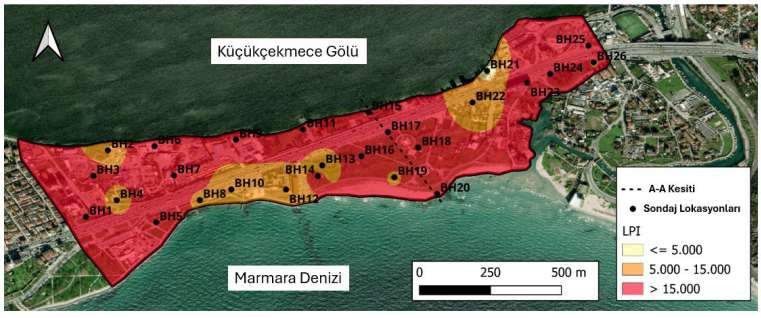
D100 Karayolu, İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakaları arasındaki en önemli ulaşım bağlantılarından biridir. Bu karayolu, Küçükçekmece Gölü ile Marmara Denizi arasında "iç ve dış kumsal" olarak adlandırılan dar bir koridor boyunca uzanmakta ve batı yönünde devam etmektedir. Çalışma alanındaki karayolu kesimi, her iki yönde üçer trafik şeridi, bir metrobüs şeridi ve yan yollardan oluşmaktadır. Google Earth Pro üzerinden gerçekleştirilen ölçümler, karayolunun toplam genişliğinin yaklaşık 50 m olduğunu göstermektedir.

Karayolunun göle en yakın noktası yaklaşık 25 m mesafede bulunurken, Marmara Denizi'ne olan en kısa mesafesi yaklaşık 40 m'dir (Şekil 4). Bu dar koridor, İstanbul'un Küçükçekmece ve Bakırköy ilçeleri ile Avcılar, Beylikdüzü ve Esenyurt gibi ilçeler arasındaki ana ulaşım bağlantılarından biri olarak hizmet vermektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2023 yılı trafik hacim haritalarına göre, bölgedeki yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) değeri 139.500 araç/gün'dür (KGM, 2023). Karayolu aynı zamanda bölgenin toplu taşıma ağının önemli bileşenlerinden biri olan Metrobüs hattı için de bir ulaşım koridoru olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, atıksu boru hatları, içme suyu boru hatları ve doğal gaz hatları gibi diğer kritik altyapı sistemleri de bu koridor içerisinde yer almaktadır.

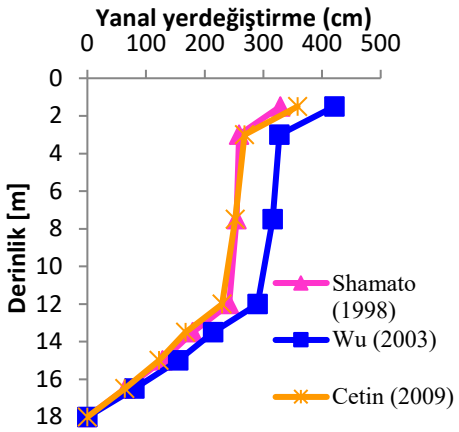


Şekil 4. Çalışma alanı konumu

Çalışma alanında İBB (2007) tarafından mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında yapılan sondajlara göre kalınlığı 0 ile 5 metre arasında değişen bir yapay dolgu tabakası gözlemlenmiş olup, bunun altında 30 metreye kadar uzanan bir alüvyon tabakası bulunmaktadır. Alüvyon tabakasının üst kısımlarında çakıllı kum oluşumu bulunurken, derinlik arttıkça ince dane oranı artmaktadır. Çalışma alanındaki yeraltı suyu seviyesi 0 ile 5 metre arasında değişmekte olup, ortalama derinlik yaklaşık 2–2.5 metredir. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için ilk olarak yarı ampirik sıvılaşma analizleri Youd & Idriss (2001) tarafından önerilen basitleştirilmiş SPT tabanlı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deprem büyüklüğünün belirlenmesinde deterministik bir yaklaşım benimsenmiştir. Proje sahasının sismik tehlikesine en büyük katkıyı sağlayan deprem, Akkar vd. (2014) hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritalarında (TDTH) dikkate alınan deprem katalogları incelenerek belirlenmiştir. Marmara Bölgesi için meydana gelen depremler ve tekerrür modellerinin değerlendirilmesi sonucunda, sıvılaşma analizlerinde moment büyüklüğü Mw = 7.5 olan bir depremin kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir sondaj lokasyonu için Iwasaki (1978) ve Iwasaki vd. (1982)'e göre Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) hesaplanmıştır. LPI değerlerinin hesaplanmasının ardından, çalışma alanına ait LPI haritası QGIS (2023) ortamında Ters Mesafe Ağırlıklı (Inverse Distance Weighting, IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 5. Çalışma alanı için üretilen sıvılaşma potansiyel indeksi haritası



Şekil 6. BH15 sondajı için oturma ve yanal yer değiştirme.

Şekil 5'e göre, çalışma alanı genel olarak yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip olmakla birlikte, bazı bölgelerde orta düzeyde sıvılaşma potansiyeli görülmektedir. Sıvılaşma sonrası meydana gelebilecek deformasyonların tahmin edilmesi amacıyla, karayoluna yakın konumda bulunan BH15 sondajı için yanal yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, Settle 3D (2009) programı kullanılarak Wu (2002), Shamoto vd. (1998) ve Cetin vd. (2009) tarafından önerilen yöntemler esas alınarak gerçekleştirilmiştir.BH15 sondajı için hesaplanan yanal yer değiştirme ve oturma değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'ya göre, yüzeyde meydana gelen yanal yer değiştirmelerin yaklaşık 330–420 cm arasında değiştiği hesaplanmıştır. Shamoto (1998) ve Cetin (2009) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirine nispeten yakınken, Wu (2003) yöntemi önemli ölçüde daha yüksek yanal yer değiştirme değerleri vermektedir. Bu çalışmada yanal yayılma deplasmanının büyüklüğü doğrudan dirençlilik hesabında kullanılmamış, yanal yayılmanın sahada oluşma potansiyeli bir hasargörebilirlik göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Kırılganlık Eğrileri ve Hasargörebilirlik İndeksine göre Değerlendirme

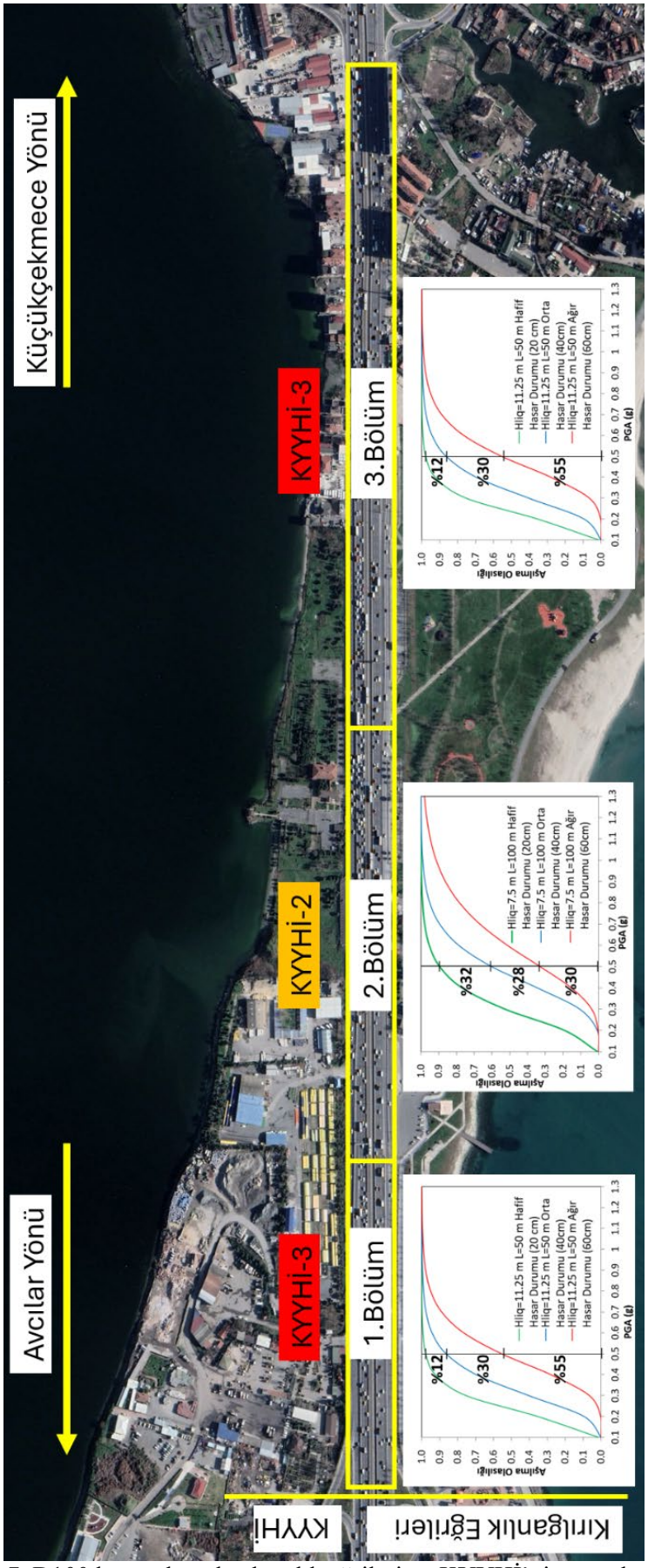
Küçükçekmece-Avcılar D100 karayolunun hasargörebilirliğinin belirlenebilmesi için bir önceki bölümde üretilen sıvılaşma potansiyel indeksi haritası ve serbest sahaya uzaklık değerlerine göre karayolu üç bölüme ayrılmıştır. İlk olarak her üç bölüme Yıldırım (2025)'te sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma potansiyeli olan bölgelerde bulunan karayolları için üretilen kırılganlık eğrileri uygulanmıştır. Zemin ve topoğrafya özelliklerine göre birinci ve üçüncü bölüme serbest yüzeye olan uzaklık 50 m ve sıvılaşan tabaka kalınlığı 11.25 m olan eğriler uygulanırken ikinci bölüme serbest yüzeye olan uzaklık 100 m ve sıvılaşan tabaka kalınlığı 7.5 m olan eğriler uygulanmıştır (Şekil 7). Şekil 7'ye göre birinci ve üçüncü bölümde %55 olasılıkla ağır hasar meydana geleceği belirlenirken ikinci bölüm için bu değer %30 dur. İkinci aşamada Yıldırım (2025) önerilen indeks tabanlı hasargörebilirlik değerlendirmesi yapılmıştır (Tablo 2). Hesaplamalar sonucunda D100 karayolunun birinci ve üçüncü bölümü için KYYHİ değeri 28 olarak elde edilirken ikinci bölüm için elde edilen değer 25'tir. Bu değerler Yıldırım (2025)'te önerilen Tablo 3'e göre değerlendirme yapıldığında birinci ve üçüncü bölümün KYYHİ-3 hasar seviyesine denk gelen orta-ağır hasar göreceği belirlenmiştir. İkinci bölümün ise KYYHİ-2 hasar seviyesine denk gelen düşük-orta hasar göreceği belirlenmiştir.

Tablo 2. Küçükçekmece-Avcılar D100 Karayoluna KYHHİ'nin uygulanması

Parametre	Faktör	Kategori	2. Bölüm	Kategori	1. ve 3. Bölüm
Sismik	**Faya Olan Uzaklık (R)**	0 km	5.28	0 km	5.28
		10 km		**10 km**	
		20 km		20 km	
		>30 km		>30 km	
	Moment Magnitüdü (Mw)	**7.5**	6.72	**7.5**	6.72
		7		7	
		6.5		6.5	
Topoğrafya	**Eğim**	3%	2.35	3%	2.35
		2%		**2%**	
		1%		1%	
	Serbest Sahaya Uzaklık	50 m	3.9	**50 m**	5.3
		100 m		100 m	
		200 m		200 m	
		400 m		400 m	
Yapısal	**Şerit Sayısı**	<2 şerit	0.38	<2 şerit	0.38
		>2 şerit		**>2 şerit**	
	Dolgu Yüksekliği	H>8m	0.51	H>8m	0.51
		5m<H<8m		5m<H<8m	
		2m<H<5m		2m<H<5m	
		H<2m		**H<2m**	
	Dolgu Eğimi	**>2/3**	0.77	**>2/3**	0.77
		<2/3		<2/3	
	Dolgu Kalitesi	Standartlara uygun değil	0.32	Standartlara uygun değil	0.32
		Standartlara uygun		**Standartlara uygun**	
Zemin	**Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı**	10 m	2.65	**10 m**	4.41
		8 m		8 m	
		6 m		6 m	
		4 m		4 m	
		2 m		2 m	
	Sıvılaşan Zeminin İDO	**0**	0.99	**0**	0.99
		5%		5%	
		10%		10%	
		15%		15%	
		20%		20%	
	Sıvılaşan Zeminin Sıkılığı	Gevşek	1.44	Gevşek	1.44
		Orta Sıkı		**Orta Sıkı**	
		Sıkı		Sıkı	
KYYHİ			**25**		**28**

Tablo 3. KYYHİ için seviye değerleri ve tanımlama (Yıldırım,2025).

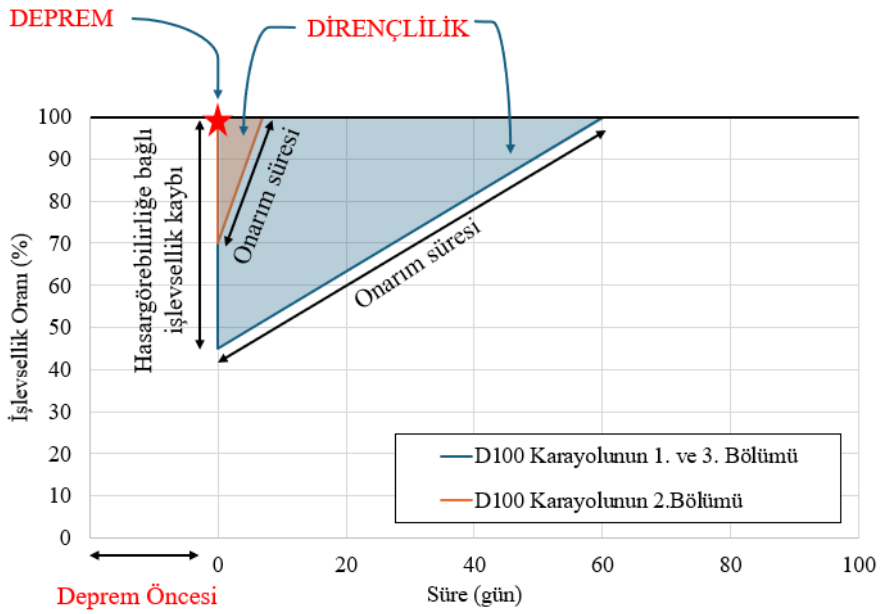
KYYHİ Seviye No	KYYHİ Limit Değer	Tanımlama
KYYHİ-1	10-18	Hasar Yok-Düşük Hasar
KYYHİ-2	18-26	Düşük-Orta Hasar
KYYHİ-3	26-34	Orta-Ağır Hasar



Şekil 7. D100 karayoluna kırılganlık eğrileri ve KYYHİ'nin uygulanması

3.3. D100 Karayolu Dirençlilik Değerlendirmesi

Bu çalışmada dirençlilik değerlendirmesi dirençliliğin tanımı üzerinden geliştirilen bir konsept ile uygulanmıştır. Bu konseptte dirençlilik, hasargörebilirliğin ve onarım süresinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Karayolunun hasargörebilirlik çalışmaları önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi kırılganlık eğrileri ve indeks tabanlı yaklaşımlar ile belirlenmiştir. Onarım süresi ise HAZUS (2024) teknik raporunda sunulan onarım eğrileri kullanılarak yapılmıştır. Küçükçekmece-Avcılar D100 karayolunun 1. ve 3. bölümü için yapılan hasargörebilirlik değerlendirmesine göre ağır hasar göreceği tahmini yapılmıştır. Bununla birlikte D100 karayolunun 2.bölümünün ise orta hasar göreceği değerlendirilmiştir. HAZUS onarım eğrilerinde elde edilen hasar durumlarına göre karayolunun 1. ve 3. bölümünün %100 işlevsellik oranına geri getirmek için geçecek onarım süresi 60 gündür. Karayolunun 2. bölümünün ise %100 işlevsellik oranına geri getirmek için geçecek onarım süresi 7 gündür. Şekil 8'e göre D100 karayolu mevcut %100 işlevsellik oranına sahipken meydana gelen bir deprem sonrasında karayolunda kırılganlık eğrileri ve indeks tabanlı değerlendirmeye göre 1. ve 3.bölümünün yaklaşık %55 ağır hasar göreceği ve 2.bölümün ise yaklaşık %30 orta hasar göreceği, bu hasar durumlarına göre karayolunun 1.ve 3. bölümünün %45 işlevsellik oranına ve 2.bölümünün ise %70 işlevsellik oranına düşeceği öngörülmüştür. Belirlenen işlevsellik oranı ve onarım süreleri grafiğe işlendiğinde D100 karayolu için dirençlilik alanları ortaya konulmuştur. Bu alanlara göre D100 karayolunun 1.ve 3. bölümünün dirençliliği 2.bölüme göre çok daha düşüktür.



Şekil 8. D100 karayolu için dirençlilik üçgenleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla sunulmuştur:

1. Çalışmada karayolu dirençliliği, hasargörebilirlik, deprem sonrası işlevsellik kaybı ve onarım süresinin birlikte değerlendirilmesine dayanan bütünleşik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Böylece yalnızca deprem sırasında meydana gelecek fiziksel hasarın değil, hasar sonrasında karayolunun mevcut işlevsellik durumuna tekrar gelmesi için gerekli olan onarım süresi de değerlendirilmiştir.

2. Küçükçekmece-Avcılar D100 karayolu iç ve dış kumsal olarak nitelendirilen kısmının yüksek sıvılaşma potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Söz konusu karayolunda yapılan yanal yayılma değerlendirmesine göre bölgede 330-420 cm aralığında yanal yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

3. Yıldırım (2025) tarafından geliştirilen kırılganlık eğrilerine göre karayolunun belirli kesimlerinin ağır hasar durumunu aşma olasılığı %55'tir. Bununla birlikte Yıldırım (2025) KYYHİ değerlerine göre karayolunda orta-ağır hasarın meydana gelebileceği de belirlenmiştir.

4. Hasargörebilirlik sonuçlarına göre deprem sonrasında karayolunun 1. ve 3. bölümlerinde işlevselliğin yaklaşık %45 seviyesine, 2. bölümünde ise yaklaşık %70 seviyesine düşebileceği öngörülmüştür.

5. HAZUS (2024) onarım eğrileri esas alındığında, karayolunun tekrar %100 işlevsellik düzeyine ulaşması için 1. ve 3. bölümlerde yaklaşık 60 gün, 2. bölümde ise yaklaşık 7 gün onarım süresine ihtiyaç duyulacağı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak 1. ve 3. bölümlerde oluşan dirençliliğin 2. bölüme kıyasla belirgin şekilde daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum özellikle 1. ve 3. bölümlerin afet sonrası ulaşım, tahliye ve acil müdahale faaliyetleri açısından kritik kesimler olduğunu göstermektedir.

6. Karayolu kesimlerinin deprem sonrası hizmet seviyelerine yeniden ulaşma süreleri tahmininde HAZUS yaklaşımında tanımlanan onarım eğrileri sürelerinden faydalanılmıştır. Bununla birlikte söz konusu sürelerin ağırlıklı olarak ABD'deki altyapı, kurum kapasitesi, müdahale organizasyonu ve kaynak erişimi koşuları dikkate alınarak geliştirildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Gelecek çalışmalarda Türkiye'deki kurumsal kapasite, müdahale olanakları ve yerel yol bakım onarım süreçleri dikkate alınarak ülkeye özgü onarım eğrilerinin geliştirilmesi gerektiği ve dirençlilik değerlendirmesine bu şekilde dahil edilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Kubilay Keleşoğlu'na teşekkürlerini sunmaktadır. Ayrıca, arazi deney sonuçlarının temin edilmesine sağladıkları katkılardan dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü'ne teşekkür ederler. Bunun yanı sıra, bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından FDK-2022-36509 proje numarası kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Akkar, S., Azak, E., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu, M. B., Duman, T., Ergintav, S., Kadirioğlu, T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal, R. F., Kılıç, T., Özalp, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakut, A., Tolga Yılmaz, M., & Zülfikar, Ö. (2014). *Türkiye Sismik Tehlike Haritalarının Güncellenmesi*.

Brabhaharan, P. (2006). Recent Advances in Improving the Resilience of Road Networks. *2006 NZSEE Conference*, (12), 1-9. https://www.nzsee.org.nz/db/2006/Paper12.pdf

Byun, J. E., & D'Ayala, D. (2022). Urban seismic resilience mapping: a transportation network in Istanbul, Turkey. *Scientific Reports*, *12*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-11991-2

Carlson, L., Bassett, G., Buehring, W., Collins, M., Folga, S., Haffenden, B., Petit, F., Phillips, J., Verner, D., & Whitfield, R. (2012). Resilience Theory and Applications, Argonne National Laboratory. *Decision and Information Sciences Division, ANL/DIS-12-1, Argonne, IL. doi*, *10*, 1044521.

Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., & Seed, R. B. (2009). Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric) settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *135*(3), 387-398.

El-maissi, A. M., Argyroudis, S. A., & Nazri, F. M. (2021). Seismic vulnerability assessment methodologies for roadway assets and networks: A state-of-the-art review. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(1), 1-32. https://doi.org/10.3390/su13010061

HAZUS. (2024). *Hazus Earthquake Model Technical Manual*. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_hazus-earthquake-model-technical-manual-6-1.pdf

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*, 1-23.

İBB, D. ve Z. İ. M. (2007). *Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Çalışması*.

Iwasaki, T. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proc. of 2nd Int. National Conf. on Microzonation, 1978*, *2*, 885-896.

Iwasaki, T., Tokida, K. I., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle*, *3*(2), 1310-1330.

KGM. (2023). *2023 Yılı 1. Bölge Müdürlüğü Devlet Yolları Trafik Hacim Haritası: Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri (YOGT)*. https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/trafikhacimharitasi/2023HacimHaritalari/1_4_14otoyol.pdf

Lee, M. (2016). *Resilience Assessment in Geotechnical Engineering*.

Pimm, S. L. (1984). The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, *307*(5949), 321-326.

QGIS. (2023). QGIS geographic information system. Içinde *Open source geospatial foundation project* (3.34.14; ss. 504-507). Open Source Geospatial Foundation.

Settle 3D. (2009). *Settlement and Consolidation Analysis Theory Manual.* Rocscience Inc.

Shamoto, Y., Zhang, J.-M., & Tokimatsu, K. (1998). New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation. *Soil dynamics and earthquake engineering*, *17*(7-8), 427-438.

Wu, J. (2002). *Liquefaction triggering and post-liquefaction deformation of Monterey 0/30 sand under unidirectional cyclic simple shear loading*. University of California, Berkeley.

Yıldırım, A. K. (2025). *Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma potansiyeli olan bölgelerde karayolları için kırılganlık eğrilerinin üretilmesi ve Küçükçekmece Avcılar D100 karayoluna uygulanması* [Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *127*(4), 297-313.