

Sahaya Özel Analizlerin Önemi: 6 Şubat 2023 Depremleri

The Importance of Site-Specific Analysis: February 6, 2023 Earthquakes

Kamil Bekir AFACAN¹, Süleyman GÜCEK²

ÖZET

6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) merkezli depremler, Türkiye'nin doğu ve güneydoğusundaki 11 ili ciddi şekilde etkiledi. Depremler Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Malatya, Gaziantep, Osmaniye, Adana, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Elazığ'da büyük yıkıma neden oldu; binlerce ölüm ve on binlerce yaralanma yaşandı. Altyapı sistemleri, ulaşım yolları ve binalarda kapsamlı hasarlar meydana geldi. Bu çalışma, deprem sonrası saha analizleriyle hasar ve yıkım büyüklüğünü tahmin etme kapasitesini araştırmaktadır. Deprem sonrası yapılan saha analizleri, hasarın boyutunu belirlemede ve gelecekteki benzer felaketlere hazırlıkta önemli bir rol oynamaktadır. Depremlerin etkilerini azaltmak amacıyla genel statik ve sismik tasarım yönetmelikleri standartlar sunsa da, bu çalışmada sahaya özgü analizler yapılarak bölgesel etkiler incelenmiştir. Üç farklı bölgeden alınan sondaj ve sismik ölçüm verileri kullanılarak zemin özellikleri ve yapısal etkiler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. DeepSoil v6 yazılımı ile zemin büyütme ve sıvılaşma analizleri yapılmış; bu analizler zemin ve yapı etkileşimlerinin anlaşılmasını ve yapı güvenliğinin artırılmasını hedeflemiştir. Sonuçlar, deprem sonrası hasar tahmini ve yapı güvenliğini artırma konusunda önemli veriler sunmakta ve gelecekteki sismik etkinlikler için önleyici tedbirlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu tür çalışmalar, toplumların deprem riskine karşı daha hazırlıklı olmasını ve can ve mal kaybını en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sahaya Özel Analiz, Antakya, Türkoğlu, Gölbaşı, Sıvılaşma, Zemin Büyütme.

ABSTRACT

On February 6, 2023, the earthquakes centered in Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) and Elbistan (Mw=7.6) severely affected 11 provinces in eastern and southeastern Turkey. The earthquakes caused major destruction in Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Malatya, Gaziantep, Osmaniye, Adana, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa and Elazığ, resulting in thousands of deaths and tens of thousands of injuries. Extensive damage occurred to infrastructure systems, transportation routes and buildings. This study investigates the ability to estimate the extent of damage and destruction through post-earthquake field analyses. Post-earthquake field analyses play an important role in determining the extent of damage and preparing for similar disasters in the future. Although general static and seismic design regulations provide standards to reduce the effects of earthquakes, this study examined regional effects by conducting site-specific analyses. Using drilling and seismic

¹ Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, kafacan@ogu.edu.tr

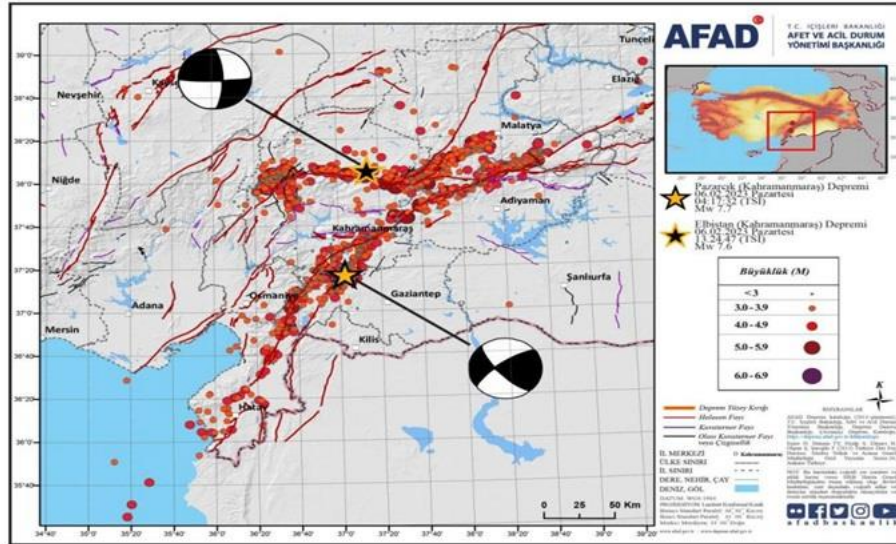
² Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, sgucek@aku.edu.tr (Sorumlu yazar)

measurement data from three different regions, soil properties and structural effects were analyzed in detail. Soil amplification and liquefaction analyses were performed using DeepSoil v6 software; these analyses aimed to understand soil and structure interactions and to increase structural safety. The results provide important data on post-earthquake damage estimation and increasing structural safety, and contribute to the development of preventive measures for future seismic events. Such studies aim to better prepare societies for earthquake risk and to minimize loss of life and property.

Keywords: Site Specific Analysis, Antakya, Türkoğlu, Gölbaşı, Liquefaction, Soil Amplification.

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) merkezli depremler, Türkiye'nin doğu ve güneydoğusundaki 11 ili etkilemiştir. Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Gaziantep, Osmaniye, Elazığ, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Adana illerinde büyük can ve mal kaybına, altyapı ve binalarda ciddi hasara neden olmuştur. Türkiye, yoğun deprem faaliyetlerinin yaşandığı bir bölgede yer aldığından, zemin özelliklerinin depremlerin etkilerini artırabileceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, zemin büyütmesi ve sıvılaşma olaylarına özel önem verilmesi gerekmektedir. İlk büyük deprem, 6 Şubat 2023 sabahı saat 04:17'de Kahramanmaraş-Pazarcık'ta meydana gelmiş ve Mw:7.7 büyüklüğündedir. Merkezi, Kahramanmaraş'ın 33 km güneydoğusunda yer almaktadır. Aynı gün öğleden sonra saat 13:24'te Elbistan bölgesinde Mw:7.6 büyüklüğünde ikinci bir deprem gerçekleşmiştir. Her iki deprem de Doğu Anadolu Fay Zonu'nda meydana gelmiştir.



Şekil 1. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan depremlerinin yaklaşık yerleri (AFAD).

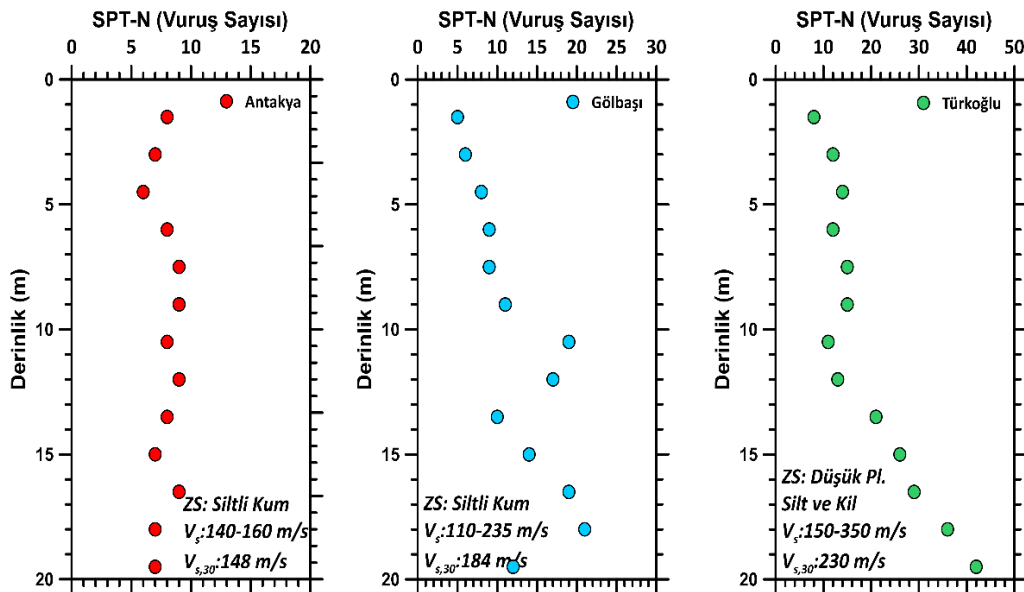
Bu çalışmada, Hatay/Antakya, Adıyaman/Gölbaşı ile Kahramanmaraş/Türkoğlu bölgelerinde zemin profilleri incelenmiştir. Sondaj verileri ve DeepSoil v6 yazılımı kullanılarak zemin büyütme ve sıvılaşma potansiyelleri analiz edilmiştir. 2018 Deprem Yönetmeliği Sismik Haritası referans alınarak yapılan analizlerde, eşdeğer lineer ve lineer olmayan yöntemlerle sonuçlar elde edilmiştir.

2. BÖLGENİN JEOLojİSİ

Bu çalışma, depremlerden en çok etkilenen illerin Hatay, Adıyaman ve Kahramanmaraş olduğunu belirtmektedir. Anadolu levhasının güneybatıya kayması, Arabistan ve Afrika levhalarının kuzeye hareket etmesiyle levha sınırında gerilmeye neden olmuş ve bu durum, Hatay ve çevresinde etkili olan Ölü Deniz Fayı, Amanos Fayı ve Hatay-Antakya-Kıbrıs Transform Fayı gibi fay hatları boyunca enerjinin birikmesine yol açmıştır. Bu bölgelerdeki depremlerin sıklığı, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre bu illerin yüksek deprem riski taşıdığını göstermektedir (Yayla, 2011). Hatay'ın Antakya ilçesi, Asi Nehri boyunca uzanan genç alüvyon birikintilerinden oluşur. Antakya'nın zemini, Mezozoyik ve Paleozoyik birimlerle birlikte erken Pliyosen dönemine ait Karasu Vadisi sınırlarında yer alan 1300-1400 m'lik Senozoyik çöküntülerden meydana gelmiştir. Bölgedeki alüvyonlar, çakıl, kum, kil ve silt içerir, yeraltı su seviyesinin yüksek olması ve gevşek alüvyon zemin özellikleri, önemli problemler arasında yer alır (Saban, 2010). Kahramanmaraş'ta ise, merkez ilçe Dulkadiroğlu ve Elbistan, çeşitli kaya türleri ve zemin özellikleri sunar. Bu zeminler, kuvarsit, kumtaşı, dolomit-dolomitik kireçtaşı, killi kireçtaşı ve kiltaşından oluşur. Ayrıca, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve yamaç molozları da bulunmaktadır. Kahramanmaraş'ın büyük kısmı alüvyonlarla kaplıdır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2008). Adıyaman'ın merkez ve Gölbaşı ilçelerinde, yaşlı kökenli Koçalı Karmaşığı ve Karadut Karmaşığı gibi birimler bulunur. Üst Maestrihtiyen yaşlı Germav Formasyonu ve Eosen dönemine ait Hoya Formasyonu gibi diğer birimler, bu bölgede bulunur. Pliyosen yaşlı Esmepuru Formasyonu ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı Pazarcık Formasyonu da mevcut olup, siltli-killi kum, alüvyonlar ve bataklık çökelleri içerir (Akıl vd., 2008).

3. ZEMİN PROFİLLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, Antakya (Hatay), Gölbaşı (Adıyaman) ve Türkoğlu (Kahramanmaraş) şehirlerinde yapılan sondaj analizleri ele alınmıştır. Seçilen sondaj noktaları, konum olarak birbirlerinden uzak ve profil olarak farklılık gösterdiğinden sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yeraltı su seviyesi tüm bölgelerde 4.5 metre olarak ölçülmüştür. Sondaj profillerine ait bilgiler Şekil 2'de gösterilmektedir.



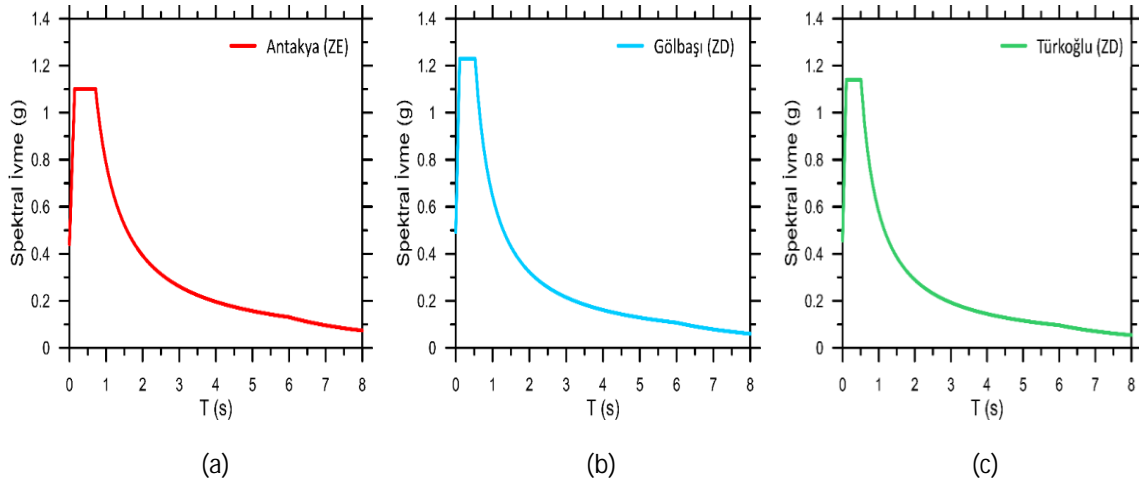
Şekil 2. Bölgeden elde edilen zemin profilleri.

Şekil 2'ye göre, Antakya sondajında, çok yumuşak ve sıvılaşma potansiyeli yüksek siltli kum profili hakimdir. Ortalama kayma dalgası hızı ($V_{s,30}$) 148 m/s olarak ölçülmüş ve zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir. Gölbaşı sondajında ise, 10 metre derinlikten sonra siltli kumdan oluşan, daha sert bir zemin profili bulunmuştur. Bu profilin zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiş olup, $V_{s,30}$ değeri 184 m/s'tir. Kayma dalgası hızları Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) ile ölçülmüştür. Türkoğlu'ndaki zemin profili de benzer özellikler göstermekte olup, yaklaşık 14 metre derinlikten sonra zemin rijitleşmektedir. Türkoğlu örnek profili, diğerlerine göre daha yüksek kayma dalga hızına sahip olup, bu nedenle ZD zemin sınıfında değerlendirilmiştir.

Boyutlu (1-B) analizler için, tabakaların sığ olduğu veya anakayanın derinlerde bulunduğu durumlarda, ZD ve ZE zeminler için deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde ZD zemin özelliklerinin dikkate alınması önemlidir (TBDY, 2018). Sismik haritadan elde edilen noktasal parametreler ve oluşturulan spektrumlar, Tablo 1 ve Şekil 3a, 3b, ve 3c'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yönetmelikten elde edilen Deprem Düzeyi-2 tasarım parametreleri.

Parametre	Antakya (ZE)	Antakya (ZE)	Gölbaşı (ZD)	Türkoğlu (ZD)
SDS	1.102	1.101	1.23	1.14
SD1	0.545	0.785	0.645	0.579
TA	0.99	0.143	0.105	0.102
TA	0.495	0.713	0.524	0.508
PGA	0.486	0.486	0.512	0.445



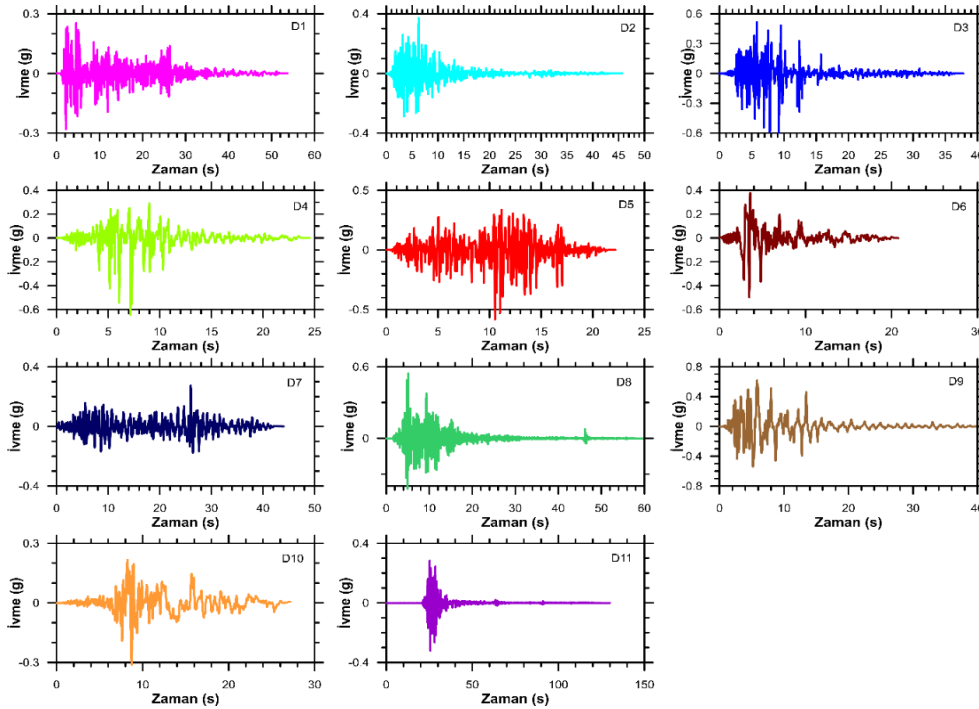
Şekil 3. Seçilen bölgeler için yönetmelik tarafından önerilen spektrumlar.

Şekil 3'de, Plato spektral ivmelerinin (SDS) zemin sınıfına bağlı olarak köşe periyotlarının nasıl farklılaştığı gösterilmektedir. Analizlerde kullanılacak deprem kayıtları, bölgenin jeolojisi, fay uzaklığı ve beklenen deprem büyüklüklerine göre seçilmiş olup, bu bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları ve özellikleri.

Sıra	Deprem	Yıl	İstasyon	M _w	R(km)	PGA(g)
1	İmperial Valley-02	1940	El Centro Array	6.95	6.09	0.281
2	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	6.24	4.06	0.372
3	İmperial Valley-06	1979	Bonds Corner	6.53	2.66	0.598
4	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	14.37	0.645
5	Superstition Hills- 02	1987	Superstition Mtn Camera	6.54	5.61	0.583
6	Erzincan-Türkiye	1992	Erzincan	6.69	4.38	0.496
7	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	11.03	0.274
8	Big Bear-01	1992	Big Bear Lake-Civic	6.46	8.3	0.545
9	Kobe-Japan	1995	Takatori	6.9	1.47	0.618
10	Kocaeli-Türkiye	1999	Düzce	7.51	15.37	0.312
11	Chi-Chi Taiwan-04	1999	CHY074	6.2	6.2	0.323

Seçilen ivme zaman grafikleri Şekil 4'de verilmiştir. Kayıtlar, en büyük ivme, süre ve frekans içeriği açısından farklılık göstermektedir. Bu kayıtlar, üç farklı nokta için ayrı ayrı ölçeklendirilmiş ve taban ivmesi olarak kullanılmıştır.

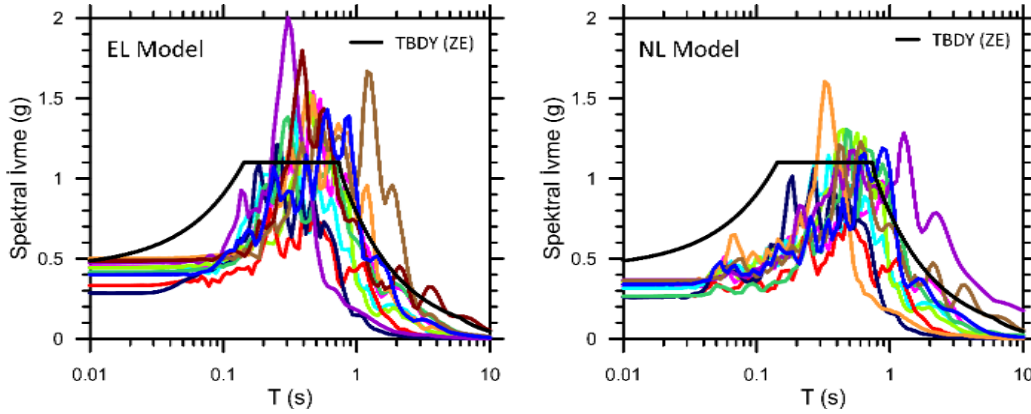


Şekil 4. Kullanılan deprem kayıtlarının ivme-zaman grafikleri.

4. ZEMİN BÜYÜTME VE SIVILAŞMA ANALİZİ SONUÇLARI

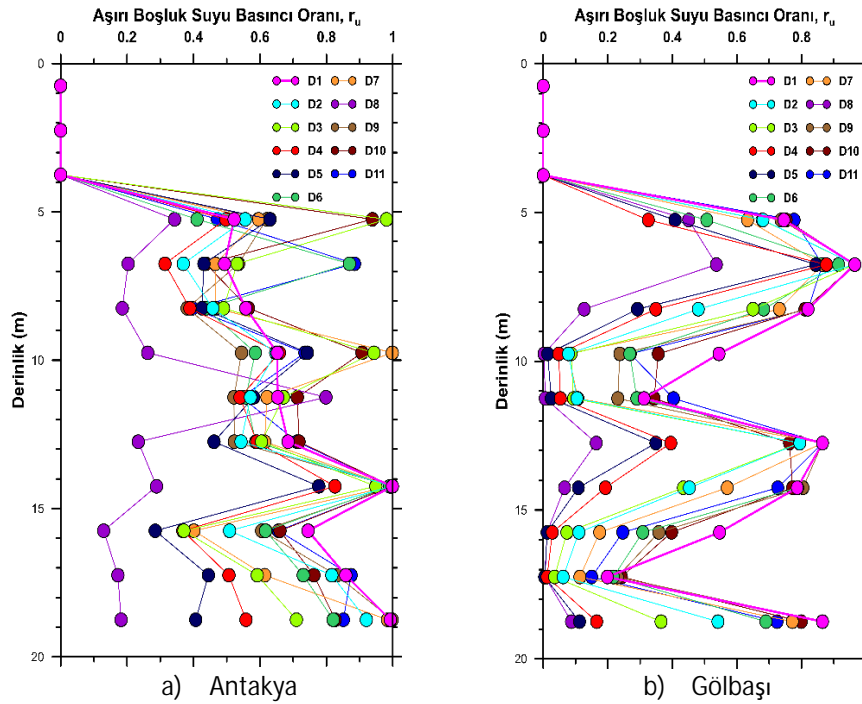
Sahaya özel bir boyutlu analizler, eşdeğer doğrusal ve lineer olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Türkiye'de bu konuda Eskişehir'de (Civelekler vd., 2018), Afyonkarahisar'da (Gücek ve Zorluer, 2021) ve Kütahya'da (Zorluer vd., 2022) örnekleri gibi birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, sonuçlar iki farklı analiz yöntemiyle değerlendirilecek ve zeminlerin dinamik davranışı Darendeli (2001) yöntemiyle modellenmiştir. Antakya örneğinde, zemin büyütmesinin yanı sıra sivilaşma riski olan siltli kum içeriği nedeniyle

lineer olmayan sivilaşma analizi yapılmıştır. Tabandan alınan kayıtların yüzeydeki spektral davranışı, yönetmeliğin önerdiği tasarım spektrumu ile birlikte Şekil 5'de gösterilmiştir.



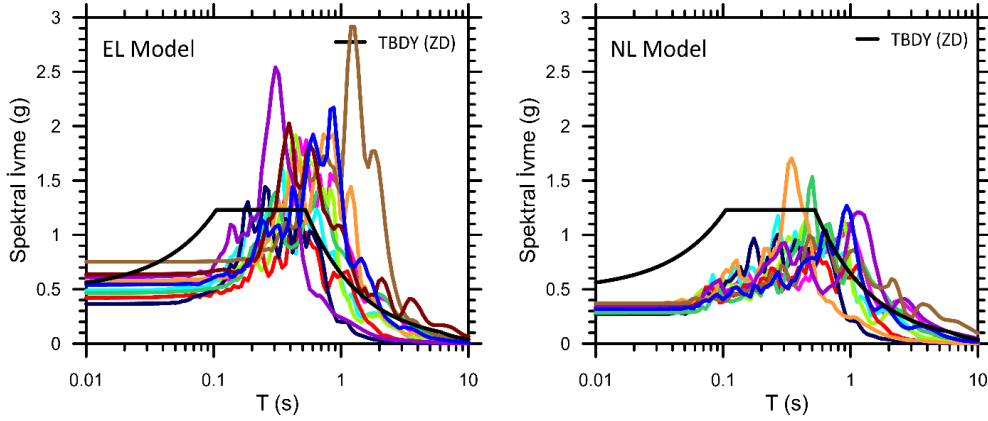
Şekil 5. Antakya bölgesi için farklı analizlerden elde edilen yüzey spektral ivmeleri.

Yönetmeliğin sağladığı spektral değerlerle ölçeklendirilen kayıtların yüzeydeki etkileri genellikle olumlu sonuçlar vermiştir; hem eşdeğer lineer hem de lineer olmayan analizlere göre güvenli tasarım önerilmektedir. Ancak büyük yıkımın temel nedeni sivilaşmadır. Aşırı boşluk suyu basıncı oranı, sivilaşma göstergesi olarak kullanılır ve bu oran 1'e yaklaştığında sivilaşma riski artar. Şekil 6-a'da, ilgili profilde aşırı boşluk suyu basıncı oranının derinlik boyunca nasıl değiştiği gösterilmiştir. Deprem senaryolarında farklı derinliklerde bu oran 1 değerine ulaşmış ve tabakalar sivilaşmıştır. Su seviyesinin 4.5 metre derinlikte olduğu gözlemlenmiştir. Bölgedeki büyük hasarın nedeni tahminlerin üzerinde bir sismik yük olsa da, yönetmeliğe göre ölçeklendirilmiş taban ivmeleri kullanılarak yapılan analizlerde de birçok tabakada sivilaşma gözlemlenmiştir. Bu durum, yıkıcılığın önemli bir etkenidir. Ayrıca, sivilaşma olmayan tabakalarda bile dayanım kaybı yaşanmış, zemin iyileştirmesi yapılmadan inşa edilen yapılar ise yıkım veya deformasyon riski taşımıştır.



Şekil 6. Zemin profili boyunca sivilaşma değişimi.

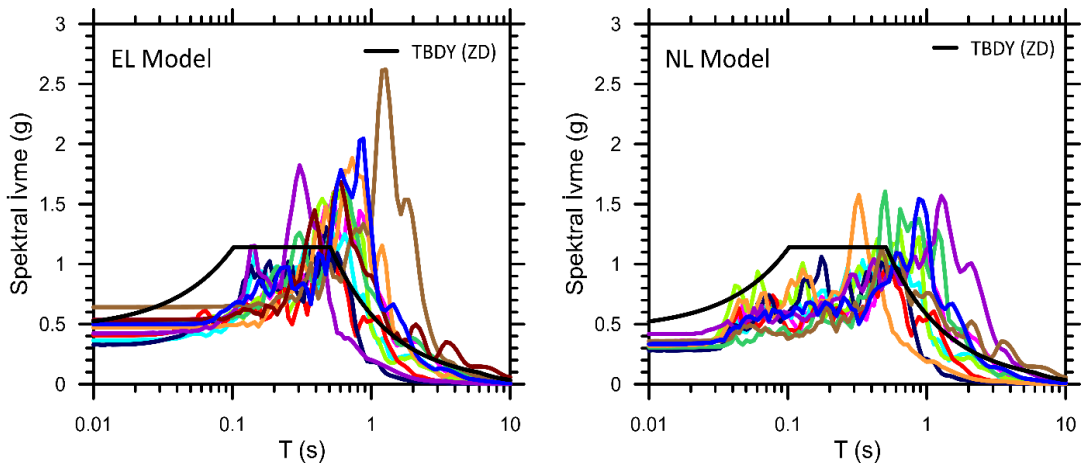
Gölbashi örneğinde, Antakya'daki gibi sıvılaşma riski nedeniyle hem zemin büyütmesi hem de lineer olmayan sıvılaşma analizi yapılmıştır. Şekil 6-b'de, en az bir tabakada sıvılaşma gözlemlenmiş ve bazı tabakalarda taşıma gücü kaybı yaşanmıştır. Şekil 7'de yüzeydeki spektral davranış gösterilmektedir. Düşük periyotlarda yönetmelik, her iki yöntemde de güvenli sonuçlar sunmuştur. Ancak, lineer olmayan yöntemde uzun periyotlarda bazı kayıtlar yönetmeliğin üzerinde kalmış, yine de yönetmelik pozitif bir tasarım spektrumu önermiştir.



Şekil 7. Gölbashi bölgesi için farklı analizlerden elde edilen yüzey spektral ivmeleri.

Eşdeğer lineer yöntemde, hem plato spektral ivmesi hem de orta-uzun periyot davranış değerleri yönetmelik standartlarının altında kalmıştır. Bu saha için, SDS değeri 1.2 yerine 1.5-1.6, TB periyodu ise 1.0-1.2 s olarak önerilebilir; bu değerler yönetmeliğin üzerindedir. Ayrıca, iki farklı senaryoda spektral ivmeler 2.5g ve 2.9g seviyelerindedir, bu da binaların bu periyotlarda 0.45g'lik bir ivmeyi büyük hisseceğini gösterir. Yüksek periyotların eksik hesaplanması, çok katlı yapılarda dinamik yüklerin yetersiz modellenmesine neden olarak yıkıcılığın büyük olmasına katkıda bulunur. Bu nedenle, parametrik çalışmaların saha özel davranışlarla doğrulanarak standart hale getirilmesi önemlidir.

Türkoğlu örneğinde ise, kum içermeyen düşük plastisiteli silt ve kil zeminlerin analiz sonuçları Şekil 8'de sunulmuştur. Buradaki amaç, kum ve kil baskın davranışların ne kadar farklılık gösterdiğini vurgulamaktır.



Şekil 8. Türkoğlu bölgesi için farklı analizlerden elde edilen yüzey spektral ivmeleri.

Diğer profillere göre daha yüksek kayma dalga hızına ve rijitliğe sahip bir zemin için bile, orta-yüksek periyotlarda yönetmelikten yüksek değerler elde edilmiştir. Lineer olmayan analizler, plato spektral ivmesi açısından güvenli sonuçlar sunsa da, yüksek periyotlarda bazı senaryolar yönetmelik değerlerinin üzerindedir, bu da tasarım spektrumunu güvensiz kılmaktadır. Eşdeğer lineer analizlerde ise yönetmelik tarafından önerilen kısa periyot spektral ivmesi de analiz sonuçlarının altında kalmıştır. Bu durum, hakim periyodu yüksek binaların eksik sismik tasarıma sahip olduğunu gösterir. Üç farklı nokta için yapılan analizler, yalnızca bu noktaları yansıtır ve genelleştirilemez. Ancak, arazi gözlemleri ile analiz sonuçlarının örtüştüğü gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, 6 Şubat depremleri sonrasında sahaya özel analizlerle hasarın büyüklüğünü tahmin etme kapasitesini araştırmıştır. Zeminin dinamik davranışı ve sahaya özel analizler, sismik tasarımda kritik öneme sahiptir. Yönetmelikler genel bir standart sunsa da, sahaya özel analizler önemlidir. Elde edilen bulgular şunlardır:

- **Sıvılaşma Potansiyeli:** Sıvılaşma riski taşıyan zeminlerde, zemin iyileştirmesi yapılmadan yapılaşmanın büyük hasara yol açacağı öngörülmektedir. Özellikle gevşek kumlu ve siltli kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin araştırılması gerekmektedir.
- **Spektrum Parametreleri:** Ana tasarım parametreleri (SDS, TA, TB) hesaplanırken parametrik ve sahaya özel analizlerin birlikte kullanılması gereklidir.
- **Zemin Büyütmesi:** Yerel zemin özellikleri nedeniyle zemin büyütmesi hasarı artırır. Analizler, kısa periyot spektral ivmesinin eksik kaldığını göstermiştir.
- **Tasarım Eksiklikleri:** Zemin büyütmesi, tasarımın sağ uç köşe periyodunun düşük kalmasına ve orta-yüksek periyotlarda sismik tasarım eksikliklerine yol açmıştır.

KAYNAKLAR

- Akıl, B., Akpınar, K., Üçkardeşler, C., Araz, H., Sağlam, M., Ecemiş, B., Uran, Ş.B., 2008. Doğu Anadolu Fay Zonu Üzerinde Yer Alan Gölbaşı (Adıyaman) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri ve Değerlendirilmesi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 51-1, s. 43-57.
- Civelekler, E., Okur, D.V., Afacan, K.B., 2018. Eşdeğer Analiz Yöntemi ile Zeminin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Örneği, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler, Eskişehir.
- Darendeli, M. B., 2001. Development of A New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas.
- Gücek, S., Zorluer, İ., 2021. Bir Boyutlu Analiz Yöntemiyle Sahaya Özel Sıvılaşma Risk Haritalarının Oluşturulması: Afyonkarahisar Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Afyonkarahisar.

- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- iyisan R, 1996, Zeminlerde kayma dalgası hızı ile penetrasyon deney sonuçları arasındaki bağıntılar, Teknik Dergi, 7, 32.
- Saban, Ö., 2010. Hatay İli Merkezinin Antakya Belediye Sınırları İçerisinde Zeminin "Kırılma Mikrotremor (Remi)" Yöntemi ile İncelenmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, Hatay.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, 30364.
- Yayla, F.O., 2011. Antakya Kent Merkezinde Sismik Hızlardan Hareketle Zemin Parametrelerinin Elde Edilmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, Hatay.
- Zorluer, İ., Kabak, S., Gücek, S., 2022. Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Belirlenen Sıvılaşma Riskinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Haritalanması: Kütahya Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Afyonkarahisar.