

## Araştırma Makalesi / Research Article

**6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri**Süleyman GÜCEK<sup>1\*</sup>, Kamil Bekir AFACAN<sup>2</sup>, İsmail ZORLUER<sup>3</sup><sup>1,3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar.<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26000, Eskişehir.Sorumlu yazar e-posta\*: [sgucek@aku.edu.tr](mailto:sgucek@aku.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4839-1851>[kafacan@ogu.edu.tr](mailto:kafacan@ogu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3667-4432>[izorluer@aku.edu.tr](mailto:izorluer@aku.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5017-084X>

Geliş Tarihi: 17.05. 2023

Kabul Tarihi: 01.06.2023

**Öz****Anahtar kelimeler**Antakya; Gölbaşı;  
Türkoğlu; Sıvılaşma;  
Zemin Büyütmesi;  
Sahaya Özel Analiz.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) ve Elbistan ( $M_w=7.6$ ) Depremleri 11 ilimizi etkilemiş olup depremler, Türkiye'nin doğusunda ve güney doğusunda yer alan Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Malatya, Gaziantep, Osmaniye, Adana, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Elazığ illerinde binlerce insanımızın hayatlarını kaybetmesine, on binlerce insanın yaralanmasına, alt yapı ve ulaşım sistemlerinde, yapılarda ve yollarda ciddi hasarlara neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında 6 Şubat depremleri sonrasında sahaya özel analizlerle, hasarın ve yıkımın ne kadar büyük olduğunu tahmin edebilme kapasitesi araştırılmıştır. Her türlü statik-sismik tasarım için yönetmelik genel bir standart sunmaktadır. Depremlerin yıkıcılığının azaltılmasına bir katkı sağlamak amacıyla bölgede depremden en çok etkilenen 3 farklı bölgeden alınan sondaj-sismik ölçüm bilgilerine dayanarak sahaya özel analizler yapılmıştır. Arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından yararlanılarak DeepSoil v6 programında zemin büyütme ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır.

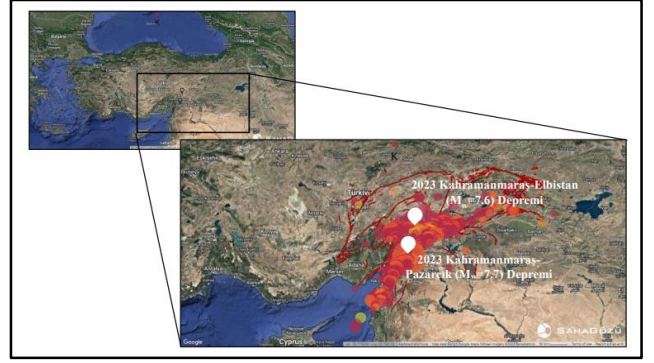
**The Facts of Soil Amplification and Liquefaction After the Earthquakes of February 6, 2023: Examples of Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu****Abstract****Keywords**Antakya; Gölbaşı;  
Türkoğlu; Liquefaction;  
Soil Amplification; Site  
Specific Analysis.

February 6, 2023, Kahramanmaraş-Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) and Elbistan ( $M_w=7.6$ ) Earthquakes affected 11 provinces and the earthquakes occurred in the provinces of Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Malatya, Gaziantep, Osmaniye, Adana, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa and Elazığ located in the east and southeast of Turkey, thousands of our people lost their lives, tens of thousands of people were injured, and in infrastructure and transportation systems, structures and roads. caused serious damage. Within the scope of this study, the capacity to predict the extent of damage and destruction was investigated with site-specific analyzes after the 6 February earthquakes. The regulation provides a general standard for any static-seismic design. In order to contribute to the reduction of the destructiveness of earthquakes, site-specific analyzes were made based on the drilling-seismic measurement information obtained from 3 different regions in the region that were most affected by the earthquake. Soil amplification and liquefaction were analyzed in the DeepSoil v6 program, using the field and laboratory test results.

## 1. Giriş

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) ve Elbistan ( $M_w=7.6$ ) Depremleri 11 ilimizi etkilemiş olup bu depremler, Türkiye'nin doğusunda ve güney doğusunda yer alan Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Gaziantep, Osmaniye, Elazığ, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Adana illerinde binlerce insanımızın hayatını kaybetmesine, on binlerce insanımızın da yaralanmasına, altyapı ve ulaşım sistemlerinde ve binalarda ciddi hasarlara sebep olmuştur. Ülkemiz ne yazık ki depremlerin yoğun yaşandığı bir coğrafyadadır. Meydana gelen depremlerin oluşumunu ve ivmesini dikkate aldığımızda, yapılarımızın betonarme tasarımları yeterli olsa bile zeminde gerçekleşecek sıvılaşma ve zemin büyütme olaylarının depremin şiddetini artırdığını bir kez daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sebeple sadece üst yapılarda değil, zemin araştırmalarına da ciddi anlamda önem verilmesi gerekliliğini net bir şekilde ortaya koymuştur.

Kahramanmaraş merkezli depremler 6 Şubat 2023 tarihinde, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde yerel saat ile sabaha karşı 04:17'de (GMT 01:17), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının yayınlamış olduğu verilere göre moment büyüklüğü  $M_w:7.7$  olan büyük bir deprem meydana gelmiştir. AFAD verilerine göre merkez üssü Kahramanmaraş-Pazarcık olan deprem, Kahramanmaraş ilinin yaklaşık 33 km güney doğusunda, Osmaniye ilinin yaklaşık 55 km kuzey doğusunda, Gaziantep ilinin ise yaklaşık 40 km kuzey batısında merkezi bir yerde bulunmaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından depremin merkez derinliği ise 8.6 km olarak belirlenmiştir. Kahramanmaraş Pazarcık depreminin hemen ardından yaklaşık 9 saat sonra, Ekinözü-Elbistan Kahramanmaraş bölgesinde yerel saat ile öğleden sonra saat 13:24'de (GMT 10:24) moment büyüklüğü  $M_w: 7.6$  olan ikinci büyük bir deprem meydana gelmiştir.



Şekil 1. Türkiye Haritası. 6 Şubat 2023 Pazarcık-Kahramanmaraş ve Elbistan-Kahramanmaraş depremlerinin yaklaşık yerleri beyaz imge ile belirtilmiştir (Rapor: METU/EERC 2023-01)

6 Şubat 2023 tarihi öğlen saatlerinde meydana gelen ikinci depremin merkez üssü, Kahramanmaraş ilinin 60 km kuzey doğusunda, Malatya ilinin yaklaşık 120 km doğusunda, Adıyaman ilinin ise yaklaşık 100 km kuzey batısında yer alıp, merkez derinliği ise 7.0 km olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de Türkiye haritasında gösterildiği gibi bölgede sonradan meydana gelen depremlerin merkez üsleri ile birlikte on binin üzerinde meydana gelen artçı depremler gösterilmektedir. Türkiye'nin Kuzey Doğu Anadolu Fay sisteminden sonra en aktif ve büyük fay sisteminden diğeri olan Doğu Anadolu Fay Zonunda (DAFZ) meydana gelmiştir. Meydana gelen bu iki depremin Doğu Anadolu Fay sisteminin özelliklerine uygun olduğu tespit edilmiş olup, sol-yanal doğrultu atımlı fay mekanizması şeklinde meydana gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında Hatay/Antakya, Adıyaman/Merkez ve Gölbasi ilçesi ile birlikte Kahramanmaraş/Dulkadiroğlu/Elbistan ilçelerinden farklı noktalardaki zemin profillerini dikkate alarak sondaj kuyularından elde edilen veriler ile DeepSoil v6 programı kullanılarak zemin büyütme değerleri ve sıvılaşma potansiyelleri belirlenmiştir. 2018 Deprem Yönetmeliği Sismik Haritası göz önünde bulundurularak noktasal olarak spektrum zarfları elde edilmiş, Doğu Anadolu Fay zonunun özelliklerine uygun olarak seçilen deprem kayıtları seçilmiş ve ölçeklendirilmiş daha sonra da 1 boyutlu sahaya özel eşdeğer lineer ve lineer olmayan analizlerde Darendeli (2001) yaklaşımı kullanılmıştır.

## 2. Bölgenin Jeolojisi

Bu çalışma kapsamında depremlerin en çok etkilediği illerin başında Hatay, Adıyaman ve Kahramanmaraş gelmektedir. Arabistan ve Afrika levhalarının kuzeye doğru hareketleri neticesinde Anadolu levhasının ise tam tersi yönünde güney batıya doğru hareketi neticesinde kaymasına neden olmaktadır. Bu büyük levhaların hareketleri özellikle de Hatay ve civarını ciddi şekilde etkileyen Doğu Anadolu Fay Sisteminin güneydeki kolu şeklinde hareket eden Ölü Deniz Fayı (ÖDF), Amanos Fayı (AF) ve Hatay-Antakya-Kıbrıs Transform Fayı (KATF) boyunca yıllardır meydana gelmiş olan gerilmelerin toplamda ciddi bir şekilde enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Özellikle bu bölgedeki aletsel ve tarihsel dönemlerdeki depremlerin oluşumu ve tekrarı de bunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sebeplerden dolayı ciddi anlamda yer değiştirmelere maruz kalan Antakya, Adıyaman, Kahramanmaraş, Gaziantep'in batısı ve yakın çevresi Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre, deprem riski olan bölgeler içinde yer almaktadır (Yayla, 2011).

En çok hasar gören illerin başında gelen Hatay ili Antakya ilçesi, Asi nehri boyunca şehrin tam ortasından geçecek şekilde uzanan arazi, genç olmakla birlikte yerleşmemiş gevşek olarak tabii edebileceğimiz dere birikintilerinden meydana gelmektedir. Antakya merkez, Mezozoyik ve Paleozoyik jeolojik genç birimlerinden meydana gelen iki kayaç serisi ile birlikte erken Pliyosende diye tabir edilen gelişmiş olan Karasu vadisi sınırlarının içerisine yerleşmiştir. Oluşum şekline bağlı olarak yaklaşık 1300-1400 m'lik bir genç Senozoyik çökmüştür. Antakya bölgesinde geniş havzaya yayılan sedimanlar esas olarak çakıl, kum, kil ve siltleri içerisinde fazlasıyla gevşek bir şekilde barındıran alüvyonlu zemin diye bildiğimiz birikintilerden oluşmaktadır. Hatay Antakya ilçesinin zemin özelliklerinden kısaca bahsedecek olursak şöyle tanımlanabilir: en büyük problemlerden birisi olan yer altı su seviyesinin yüksek olması aynı zamanda kumlu killi siltli olarak ifade edilen alüvyonların oluşturduğu Kuvaterner materyallerini esas olarak içermektedir (Saban, 2010).

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü 2008 Kahramanmaraş raporuna göre, Kahramanmaraş merkez ilçe Dulkadiroğlu ve Elbistan ilçeleri, yerleşim alanı ve çevresinde, birbirinden farklı kaya türü ve zemin özellikleri sunan birimler yüzeylenmektedir. Kaya birimleri kuvarsit şeyl, kumtaşı, dolomit-dolomitik kireçtaşı, killi kireçtaşı, ve kıltaşı zemin özellikleri sunan birimler ise Kuvaterner yaşlı, tutturulmamış, bazen gevşek tutturulmuş, genç (Kuvaterner yaşlı) yamaç molozları ve güncel alüvyal çökellerden oluşmaktadır. Kahramanmaraş'ın önemli bir kısmı alüvyon, bir kısmı da biraz daha yaşlı ama yine zayıf zemin birimlerinden oluşmaktadır. İl merkezi kuzeydeki Ahır Dağı'nın eteklerine yerleşmiştir. İçerisinde Aksu Çayı'nın yer aldığı geniş ova tamamen bu nehir tarafından taşınan alüvyonlar ile doldurulmuştur.

Adıyaman merkez ve gölbaşı ilçesi, çalışma alanı ve yakın çevresi Stratigrafik olarak çalışma alanı ve yakın çevresinde yaşlıdan gence doğru; allokon kökenli Jura-Alt Kretase yaşlı Koçali Karmaşığı ve Alt Maestrihtiyen yaşlı Karadut Karmaşığı temel konumundadır. Bunların üzerine Üst Maestrihtiyen yaşlı Germav formasyonu (Şırnak Grubu) açısal uyumsuzlukla gelmektedir. Eosen transgresyonu ile Lütesiyen yaşlı Hoya formasyonu (Midyat Grubu) çökelmiş olup, daha yaşlı birimleri açısal uyumsuz olarak örtmektedirler. Pliyosen yaşlı Esmepuru formasyonu kendisinden yaşlı birimler üzerine açısal uyumsuz olarak gelmekte olup üstte Pliyo-Kuvaterner yaşlı Döndükler formasyonu ile geçişlidir. Pliyo-Kuvaterner yaşlı Pazarcık formasyonu ise daha yaşlı birimler üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır. Çalışma alanlarını siltli-killi kum, güncel alüvyonlar, yamaç molozları ve güncel bataklık çökelleri Kuvaterner birimleri oluşturmaktadır (Akıl vd., 2008).

Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş illerinde meydana gelen hasarların temel sebebi alüvyon zemindir. Deprem dalgaları bu tür zeminler tarafından büyütülerek binalara iletilir. Zemin büyütmesi olarak da tanımlanan bu durum meydana gelen depremlerle birlikte yapılar daha şiddetli sarsıldığı için sonucunda da hasar oranı fazla

olmuştur. Örneğin 2020 yılında yaşanan İzmir ve Sivrice depremleri deprem merkezinden çok uzaklarda büyük hasarlar yaratmış, bunun ana nedeni olarak da düşük yapı kalitesi yanı sıra zemin büyütmesi gösterilmiştir. Bu depremde de görülüyor ki depremlerin merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olmasına rağmen hasarın diğer uzak illerde de (Hatay, Malatya gibi) büyük olduğu gözlemlenmiştir. Zemin büyütmesinin yanı sıra yapılan araştırmalarda, deprem etkisiyle birlikte Kahramanmaraş/Dulkadiroğlu ve Elbistan, Hatay/Antakya, Adıyaman/Gölbaşı ilçelerinde sıvılaşma olaylarının da bariz bir şekilde yaşandığı gözlemlenmiştir. Belli büyüklüğe ulaşan depremlerde belli koşullara sahip zeminlerde meydana gelebilen sıvılaşma, zeminin üstündeki yapıları taşıyamamasına neden olmuş ve yapılar yer sarsıntısının bir sonucu olan bu olay nedeniyle de ciddi hasarlar aldığı gözlemlenmiştir.

### 3. 6 Şubat Depremleri ve Saha Gözlemleri

6 Şubat depremleri sonrası bölgede yapılan geoteknik saha çalışmalarından da kısaca bahsetmek gerekmektedir. Saha incelemeleri neticesinde deprem bölgelerinde çok ciddi zararlar veren sıvılaşma ve zemin büyütmesi olaylarının ön plana çıktığı görülmektedir. Bu geoteknik problemler neticesinde zemin deformasyonlarının, temel ve yapı performansının, istinat yapılarının, şevlerin ve boş arazilerin ciddi anlamda etkilendiği gözlemlenmiştir.

İnceleme yapılan bölgelerde sıvılaşma esaslı problemler, Şekil 2a, 2b ve 2c'de sunulduğu üzere çökme şeklinde ve kum kaynaması meydana gelen sismik kaynaklı zemin sıvılaşmasının yüzey belirtileri gözlemlenmiştir.

Bu sıvılaşma olaylarının bir kısmı yapıların olmadığı boş zemin sahası olarak adlandırılan bölgelerde, bir kısmı da yerleşim alanları içerisinde ve bina temellerinin çevresinde gözlemlenmiştir. Birçok bölgede bina temellerinin kenar kısımlarında tespit edilen kum kaynamalarını mevcuttur. Sıvılaşma kaynaklı yüzey izlerinin en yoğun olduğu bölge Adıyaman-Gölbaşı ilçesi olarak gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

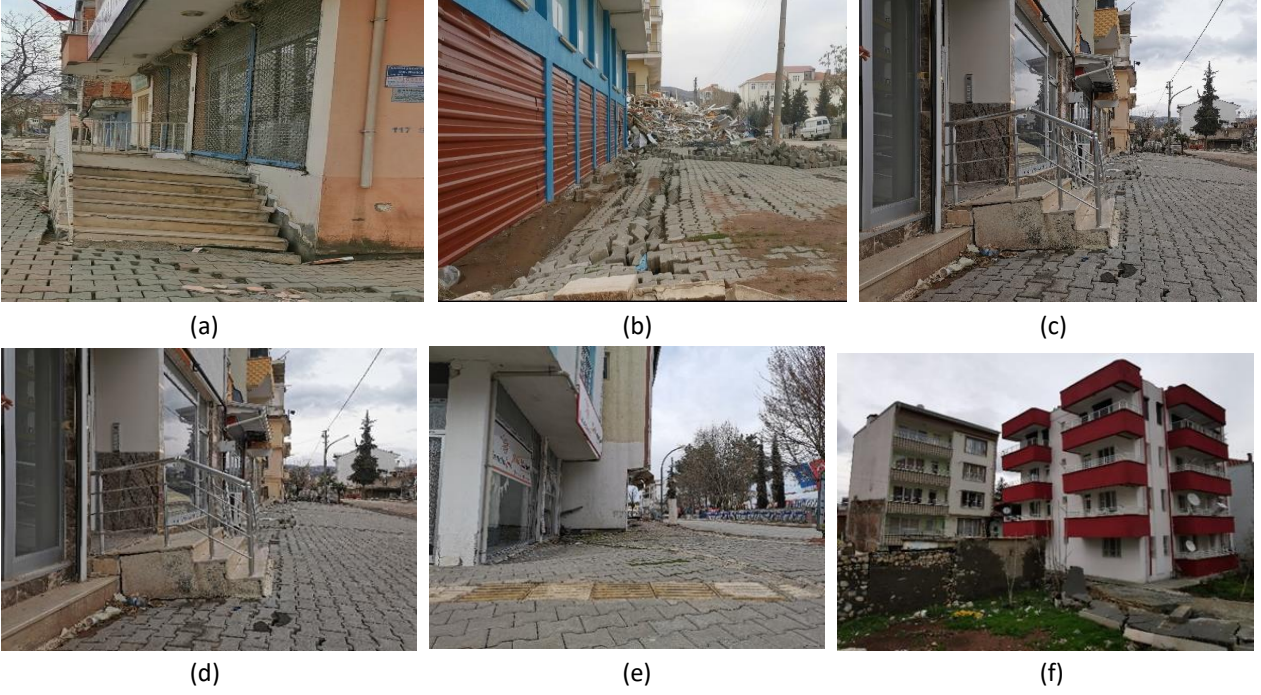


(c)

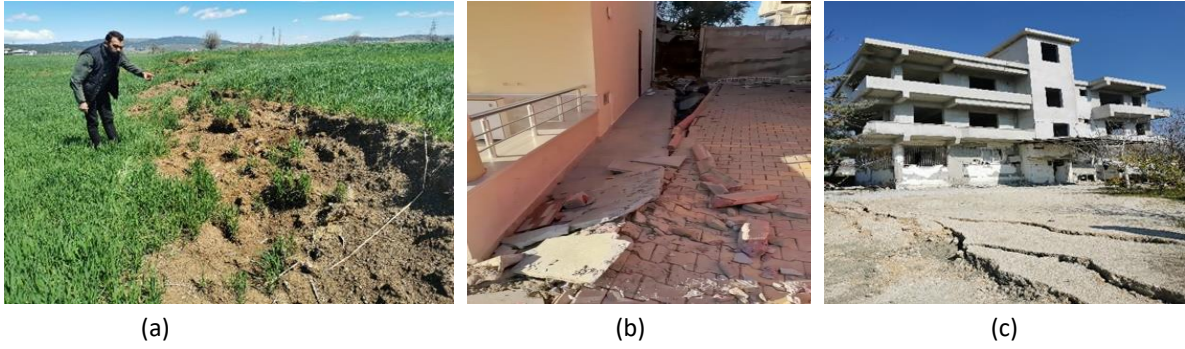
Şekil 2. Zemin Sıvılaşmasının Yüzeysel Belirtileri

Sismik dalga kaynaklı zemin sıvılaşması olayı, binalarda, yol yapılarında, istinat duvarlarında, şevlerde birçok yerde yapının deprem davranışı üzerinde önemli bir faktör olduğu net bir şekilde görülmüştür. Adıyaman Gölbaşı, Hatay Antakya başta olmak üzere depremden etkilenen birçok yerde yapıların temelleri sismik zemin sıvılaşmasından kaynaklı taşıma gücü yenilmeleri, yanıl kaymalar ve aşırı oturmaları neden olmuştur. Şekil 3a, 3b, 3c, 3d, 3e ve 3f'de görüldüğü üzere temel oturmalarının miktarı 15 santimetreden 80 cm'ye kadar değişmektedir.

Oturmanın yanı sıra deprem etkisiyle birlikte (Şekil 4a, 4b ve 4c) fay hattının da geçtiği Kahramanmaraş-Dulkadiroğlu ilçesinde ise, temellerde 40 dereceye varan dönmelere neden olduğu, diğer bölgelerde ise güzergah boyunca faylanma ve sismik nedenlerden dolayı meydana gelen zemin sıvılaşması olayı ile birlikte birçok yerde farklı farklı zemin yüzey kırığı deformasyonları gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Yüzeysel Oturma Gözlemleri

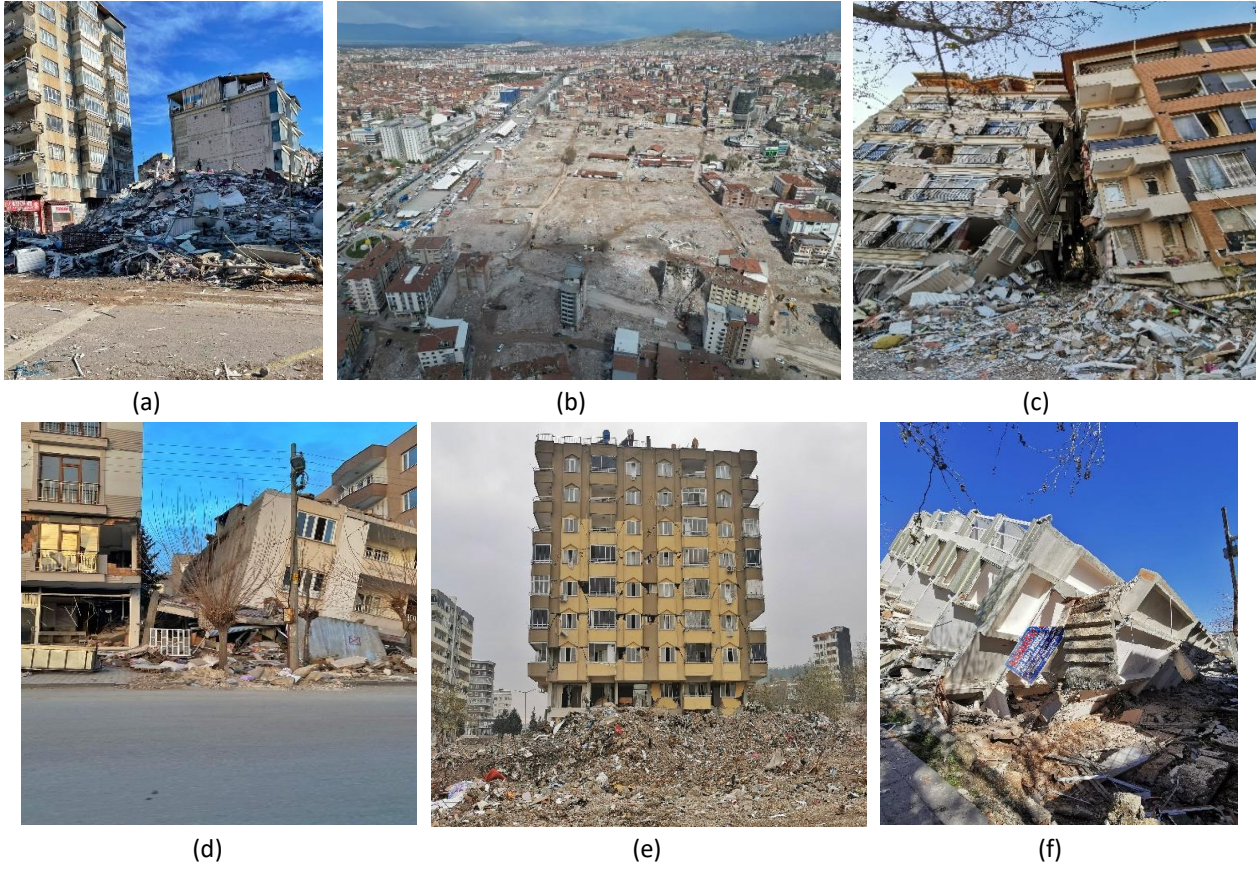


Şekil 4. Yüzeysel Kırık Gözlemleri

İnceleme yapılan bölgelerde zemin büyütme esaslı problemler birçok bölgede tespit edilmiştir. Zemin büyütme olayına bağlı yıkımlar yoğun olarak Hatay-Antakya, Adıyaman-Merkez ve Kahramanmaraş-Merkezde gözlemlenmiştir. Zemin tabakaları sismik dalgalar için bir süzgeç gibidir. Bazı frekanslardaki sismik dalgalar sönmüldürülürken bazıları da büyütülür. Zemin büyütmesi olayı yumuşak-gevşek zemin diye tabir ettiğimiz alüvyon zeminlerde görülmektedir. En çok hasarın olduğu bölgelerde alüvyon zemin tabakasının kalınlığı arttıkça bunun yanı sıra zemin tabakasındaki hız azaldıkça zemin hakim periyodunun büyüdüğü bilinmektedir. Bu sebepler özellikle, gevşek halde bulunan, yer altı su seviyesinin yüksek olduğu, kalın alüvyon çökellerinin bulunduğu arazilerde özellikle yapılacak

ve yapılmış olan yüksek katlı binaların risk altında olduğunu işaret etmektedir.

Deprem dalgaları aynı zamanda zemin içerisinde yayıldıkları ortam özelliklerine göre de şekillenmektedir. Eğer yumuşak zemin ortamında ilerlerse, farklı frekanslar için deprem dalgaları aynı şekilde tepki vermemektedir, bu durum büyütmenin frekansa bağımlı olduğunu göstermektedir. Yerel zemin koşullarına bağlı olarak farklı bölgelerde tespit edilen hasar ve yıkımlar Şekil 5’de sunulmuştur. 21. Yüzyılda gelişmiş ülkelerde bu tür hasar ve yıkımların olması mühendislik hizmetlerinin alımı ve kontrolü hakkında soru işaretleri doğurmuştur.



Şekil 5. Hasar ve Yıkım Gözlemleri

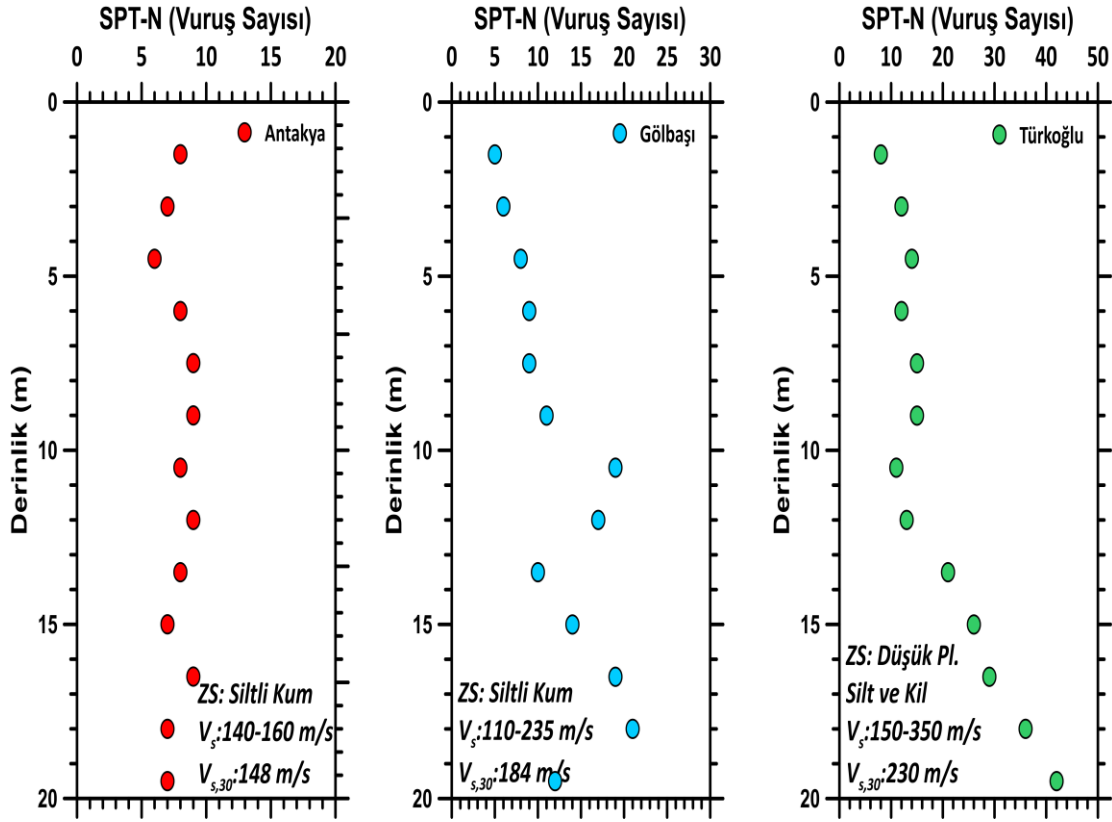
Hasar tespit tutanaklarına göre, Hatay, Kahramanmaraş, Gaziantep, Adıyaman ve Malatya illeri Doğu Anadolu Fay Zonuna yakınlıkları sebebiyle çok büyük hasarlar görülür iken Adana, Osmaniye, Kilis, Diyarbakır, Elazığ ve Şanlıurfa illerindeki yıkılan bina sayısı diğerlerine göre daha azdır. Deprem yer hareketinin büyüklüğü, şiddeti, tasarım ve yapım kalitesi, yapısal sistem yapıların performansında en önemli belirleyici unsurlar olduğu görülmektedir. Bölgeden elde etmiş olduğumuz veriler çerçevesinde bina hasar dağılımlarını 2000 yılı öncesi ve 2000 yılı sonrası olarak ikiye ayırabiliriz. Bu ayırımın sebebi ise deprem yönetmeliğinin yürürlüğe girmesi, 1999 depremlerinin olumsuz tecrübeleri, mikrobölgeleme ve zemin etütleri, hazır beton kullanımı şartı, nervürlü demir kullanımı, sıklaştırma bölgeleri ve yapı denetim kanunu gibi birçok etkeni sıralamak mümkündür.

#### 4. Seçilen Zemin Profilleri ve Özellikleri

Çalışma kapsamında 3 farklı şehirde farklı noktalar için analizler yapılmıştır. Bu bölgeler sırasıyla Antakya (Hatay), Gölbashi (Adıyaman) ve Türkoğlu

(Kahramanmaraş) olarak belirlenmiştir. Seçilen sondajlar noktasal olarak birbirlerinden uzak, profil olarak birbirlerinden farklı olmaları nedeniyle sonuçları da ayrı ayrı değerlendirilecektir. Yeraltı su seviyesi 4.5 mt. olarak tespit edilmiştir. Seçilen profillere ait bilgiler Şekil 6'da gösterilmektedir.

Şekil 6'da görüldüğü üzere, Antakya'dan alınan sondajda çok yumuşak ve sıvılaşma potansiyeli olan siltli kum profili hakimdir ve ortalama kayma dalgası hızı ( $V_{s,30}$ ) 148 m/s olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfı ZE olarak ortaya çıkmıştır. Gölbashi'nden alınan sondaj da siltli kumdan oluşmakta, yumuşak bir 10 m sonrası daha büyük SPT-N ortalamaları olan bir zemin olarak ortaya çıkmıştır. Zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir ( $V_{s,30}=184$  m/s). Kayma dalgası hızı değerleri Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) ile belirlenmiştir. Türkoğlu zemin profili de benzer özellikleri göstermekte ve yaklaşık 14 m'den sonra zemin rijitleşmektedir. Diğer zemin profillerine nazaran Türkoğlu örnek zemin profili daha yüksek kayma dalga hızına sahip olması nedeniyle bu zemin de ZD olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 6. Analizlerde Kullanılan Zemin Profilleri

Kahramanmaraş-Pazarcık ve Kahramanmaraş-Elbistan depremleri büyüklük ve şiddeti ile birlikte son yüzyılda yaşanan en büyük depremi değilse bile en yıkıcı depremler şeklinde kayıtlara geçmiştir. Depremlerden kaynaklı meydana gelen hasarlar sadece tek bir şehirde değil eklemeli-tetiklenen diyebileceğimiz depremlerin etkisiyle çok geniş bir alana yayılmış olup birbirine komşu olan toplamda

on bir ili etkilemiştir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılan hasar tespit çalışmaları neticesinde 2.141.250 binada toplam 5.818.067 bağımsız bölüm için, 15 Mayıs 2023 tarihi itibarı ile tespiti yapılmış olan binaların genel hasar seviyeleri ve 2000 yılı sonrası yapılan binalardaki hasar seviyeleri Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. Genel Hasar Seviyeleri (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, 2023).

İLLER/HASAR DURUMU	BİNA SAYISI	HASARSIZ	AZ HASARLI	ORTA HASARLI	AĞIR HASARLI	ACİL YIKILACAK	YIKIK
HATAY	342531	140337	103549	12874	64283	8038	13450
KAHRAMANMARAŞ	225230	93168	79027	5987	35229	4423	7396
ADİYAMAN	110354	38666	38576	4629	20201	2329	5953
MALATYA	155204	60825	48690	2783	36046	1810	5050
GAZİANTEP	282693	188639	68429	5524	14047	1994	4060
ŞANLIURFA	321065	195565	112690	3192	7706	740	1172
OSMANİYE	133992	87674	35006	1094	9010	530	678
KİLİS	34346	20188	11191	486	1867	151	463
ELAZIĞ	27760	11767	7945	506	7441	48	53
ADANA	324345	276691	39541	5118	2923	37	35
DİYARBAKIR	183730	129986	45602	3355	4708	59	20
<b>GENEL</b>	<b>2.141.250</b>	<b>1.243.506</b>	<b>590.246</b>	<b>45.548</b>	<b>203.461</b>	<b>20.159</b>	<b>38.330</b>

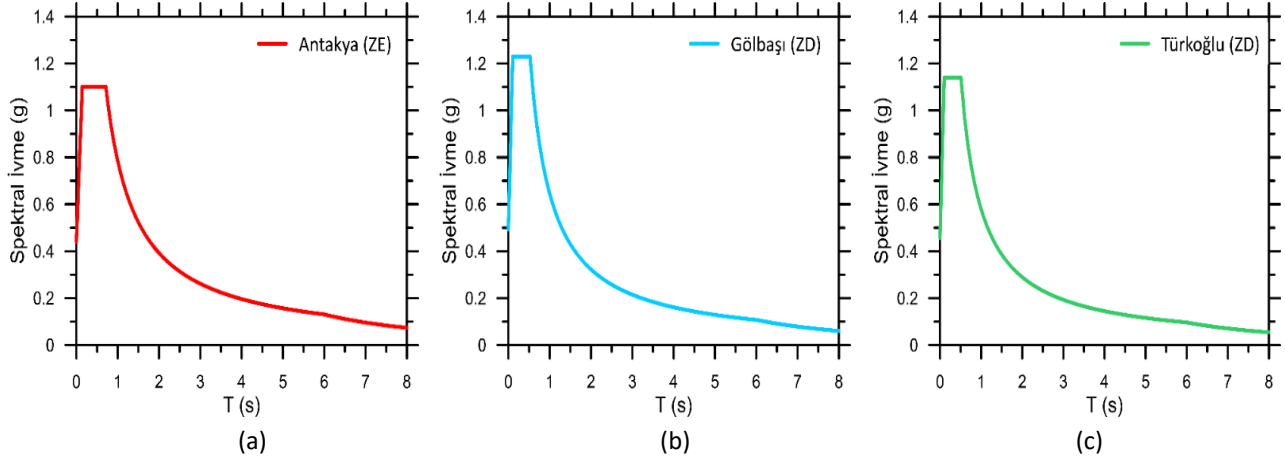
**Çizelge 2.** 2000 Yılından Sonra İnşa Edilen Yapılar İçin Hasar Seviyeleri (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, 2023).

İLLER/HASAR DURUMU	BİNA SAYISI	HASARSIZ	AZ HASARLI	ORTA HASARLI	AĞIR HASARLI	ACİL YIKILACAK	YIKIK
HATAY	174056	79384	61223	8675	19595	2697	2482
KAHRAMANMARAŞ	136213	65862	51405	4813	10994	1509	1630
ADİYAMAN	69562	29479	28250	3110	6582	714	1427
MALATYA	73695	37362	26247	1936	7080	298	772
GAZİANTEP	137906	94598	34059	2362	4916	671	1300
ŞANLIURFA	241333	150677	85526	1553	3133	262	182
OSMANİYE	67055	46994	17311	703	1853	125	69
KİLİS	17677	11190	5748	232	439	24	44
ELAZIĞ	12061	8355	2671	58	972	4	1
ADANA	130761	120212	9517	678	342	7	5
DIYARBAKIR	109868	81237	25874	1039	1688	15	15
<b>GENEL</b>	<b>1.170.187</b>	<b>725.350</b>	<b>347.831</b>	<b>25.159</b>	<b>57.594</b>	<b>6.326</b>	<b>7.927</b>

Yapılacak bir boyutlu (1-B) analizler için tabakaların sığ olması veya anakayanın çok derinlerde olması durumunda ZD ve ZE zeminler için kullanılacak deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde ZD zemin Özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (TBDY, 2018). Noktasal olarak sismik haritadan alınan parametreler ve oluşturulan spektrumlar Çizelge 3 ve Şekil 7a, 7b ve 7c'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.** Analizlerde Kullanılmak Üzere Yönetmelikten Alınan DD-2 Parametreleri

Parametre	Antakya (ZD)	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 7.** Seçilen Noktalar için Yönetmelik Tarafından Önerilen Spektrumlar

Plato spektral ivmeleri (SDS) birbirlerine yakın köşe periyotlarının zemin sınıfına göre farklılık gösterdiği Şekil 7'de görülmektedir. Analizlerde anakaya

ivmesi için kullanılacak deprem kayıtları bölgenin jeolojisine, fay uzaklığına, bölge için beklenen deprem büyüklüklerine göre seçilmiş ve Çizelge 4'de sunulmuştur.

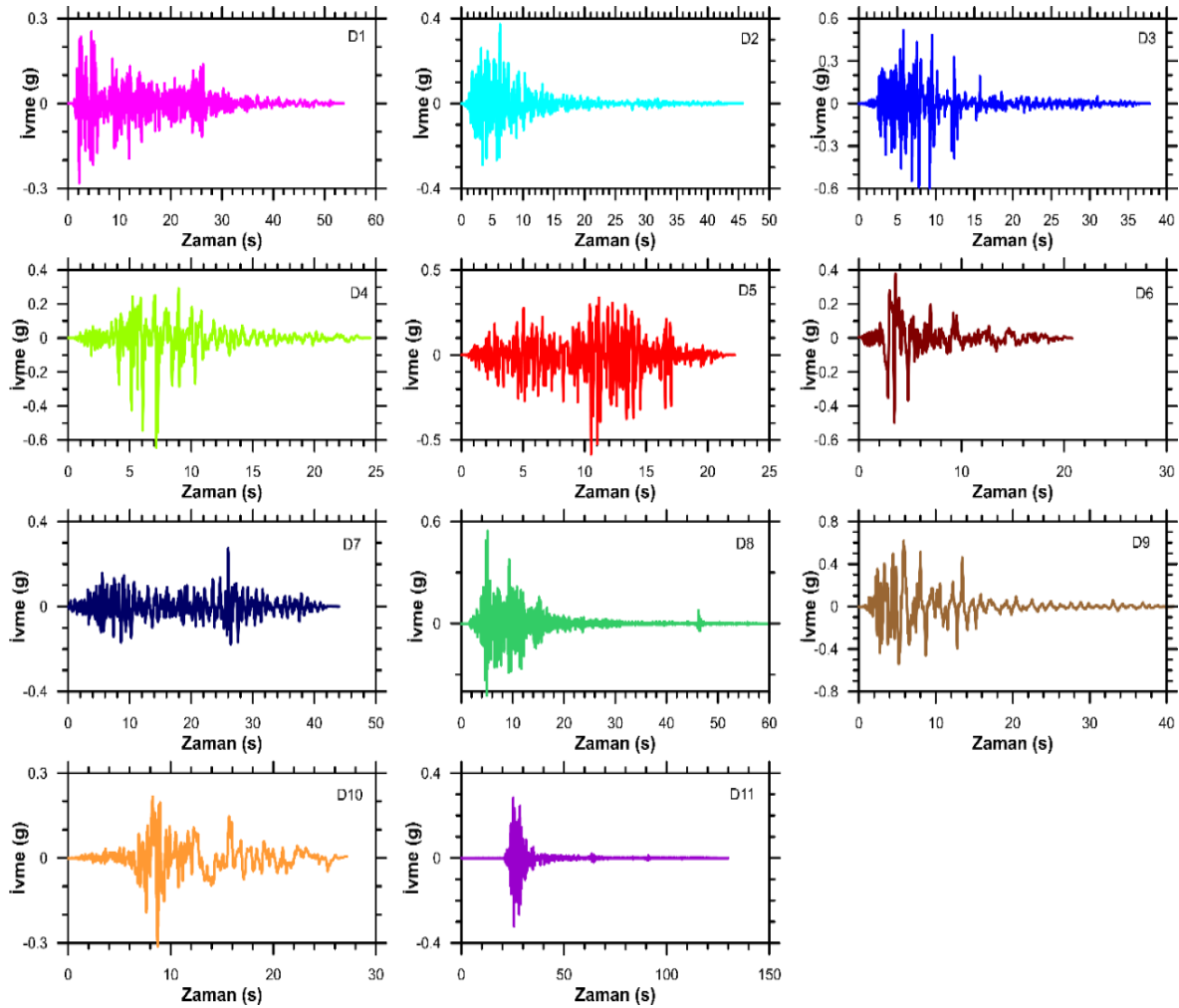


Çizelge 4. Seçilen Deprem Kayıtları ve Özellikleri

Sıra	Sayı	Deprem	Yıl	İstasyon	M <sub>w</sub>	R <sub>jb</sub> (km)	R <sub>rup</sub> (km)	PGA(g)
1	6	İmperial Valley-02	1940	El Centro Array	6.95	6.09	6.09	0.281
2	95	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	6.24	3.51	4.06	0.372
3	160	İmperial Valley-06	1979	Bonds Corner	6.53	0.44	2.66	0.598
4	265	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	13.8	14.37	0.645
5	727	Superstition Hills-02	1987	Superstition Mtn Camera	6.54	5.61	5.61	0.583
6	821	Erzincan-Türkiye	1992	Erzincan	6.69	0	4.38	0.496
7	864	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	11.03	11.03	0.274
8	901	Big Bear-01	1992	Big Bear Lake-Civic	6.46	7.31	8.3	0.545
9	1120	Kobe-Japan	1995	Takatori	6.9	1.46	1.47	0.618
10	1158	Kocaeli-Türkiye	1999	Düzce	7.51	13.6	15.37	0.312
11	2734	Chi-Chi Taiwan-04	1999	CHY074	6.2	6.02	6.2	0.323

Seçilen kayıtların ivme zaman grafikleri ise Şekil 8'de sunulmuştur. Seçilen kayıtlar, en büyük ivme, süre, frekans içeriği bakımından farklılıklar göstermektedir. Seçilen kayıtlar 3 farklı nokta için

ayrı ayrı ölçeklendirilmiş ve taban ivmesi olarak kullanılmıştır. Bir sonraki bölümde ise analiz sonuçları sunulacak ve elde edilen değerlendirmeler detaylı olarak tartışılacaktır.



Şekil 8. Seçilen Kayıtların İvme Zaman Grafikleri

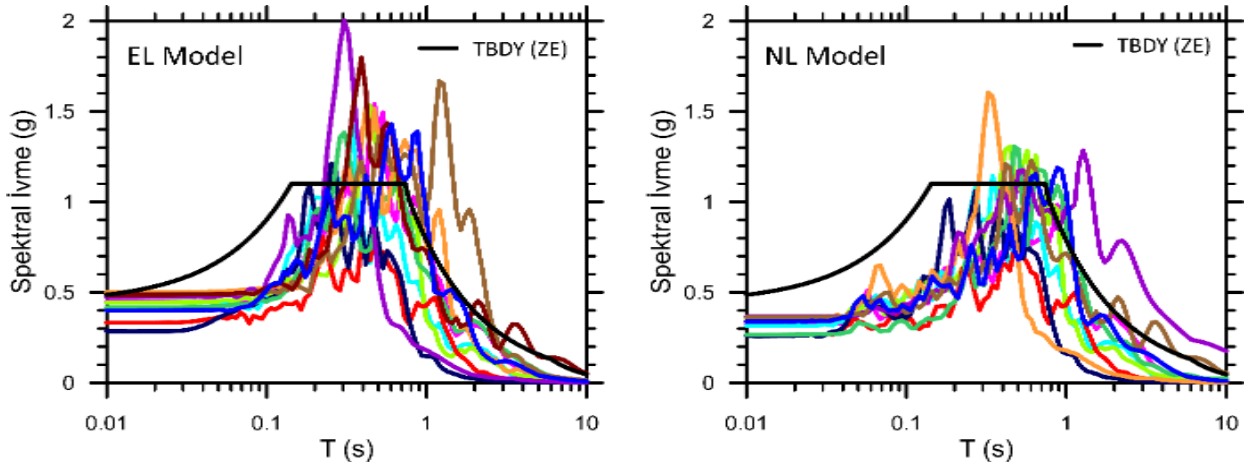
## 5. Sahaya Özel Sıvılaşma ve Zemin Büyütme Sonuçları

Sahaya özel bir boyutlu analizler eşdeğer doğrusal ve lineer olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Son zamanlarda bu konuda ülkemizde de birçok çalışma yayınlanmıştır. Bu çalışmalar; Eşdeğer Analiz Yöntemi İle Zeminin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Örneği (Civelekler vd., 2018), Bir Boyutlu Analiz Yöntemiyle Sahaya Özel Sıvılaşma Risk Haritalarının Oluşturulması: Afyonkarahisar Örneği (Gücek ve Zorluer,2021), Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Yaklaşımlara Göre Sismik Yük Etkisindeki Zeminlerde Davranış Analizi (Civelekler vd.,2021), Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Belirlenen Sıvılaşma

Riskinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Haritalanması: Kütahya Örneği (Zorluer vd.,2022) olarak literatürlerde yer almaktadır. Bu çalışmada da sonuçlar 2 farklı analiz kapsamında değerlendirilecektir. Zeminlerin dinamik davranışı modellenirken Darendeli (2001) yöntemi kullanılmıştır.

### Antakya Örneği:

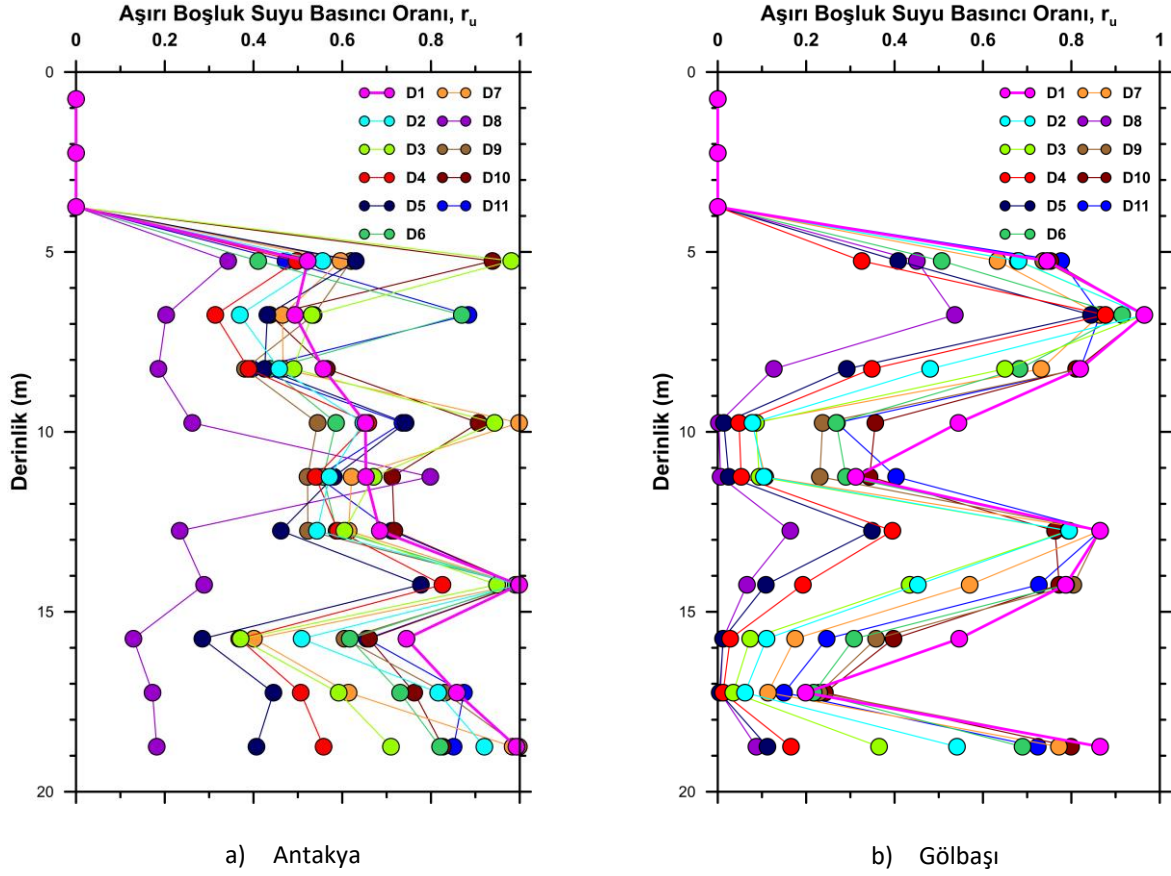
Çalışma kapsamında sıvılaşmanın beklendiği siltli kum içeriği olması nedeniyle zemin büyütmesinin yanında lineer olmayan sıvılaşma analizi de yapılmıştır. Tabandan verilen kayıtlar sonucu yüzeyde kayıt edilen spektral davranış yönetmeliğin önerdiği tasarım spektrumuyla beraber Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Antakya Örneği için Farklı Analizlerle Elde Edilen Yüzey Spektral İvmeleri

Yönetmeliğin verdiği spektral değerler kullanılarak ölçeklendirilen kayıtların yüzeydeki yansımaları düşünüldüğünde aslında yönetmeliğin iyi bir iş çıkardığı söylenebilir. Plato değerlerini aşan birkaç model olsa da ortalama olarak düşünüldüğünde hem eşdeğer lineer hem de lineer olmayan sonuçlara göre noktasal olarak güvenli tasarım önerdiği görülmüştür. Peki yıkımın bu kadar büyük olmasının temel sebebi nedir? Sorunun cevabı tabii ki sıvılaşmadan başka bir şey değildir. Aşırı boşluk suyu basıncı oranı sıvılaşma göstergesi olarak kullanılır ve bu değer 1'e yakın olması o tabakada sıvılaşma olacağına habercisidir. İlgili profil için derinlik boyunca aşırı boşluk suyu basıncı oranı değişimi Şekil 10-a'da gösterilmektedir.

Aşırı boşluk suyu basıncı oranı farklı deprem senaryoları için farklı derinliklerde 1 değerine ulaşmış ve tabaka sıvılaşmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere su seviyesine 4.5 mt.'de rastlanmıştır. Bölgedeki hasarın büyük olmasının temel sebebi tabii ki tahminlerin üzerinde bir sismik yükün ortaya çıkmasıdır fakat yönetmeliğe göre ölçeklendirilmiş taban ivmeleri kullanılarak bile birçok tabakada sıvılaşma gerçekleşmiştir. Bu da yıkıcılığın en önemli etkenlerinden biridir. Sıvılaşma olmayan tabakalarda bile dayanım kaybı olduğu da bir gerçektir. Zemin iyileştirmesi yapılmadan yapılmış yapıların yıkılması/yan dönmesi/oturması da sürpriz olmamıştır.

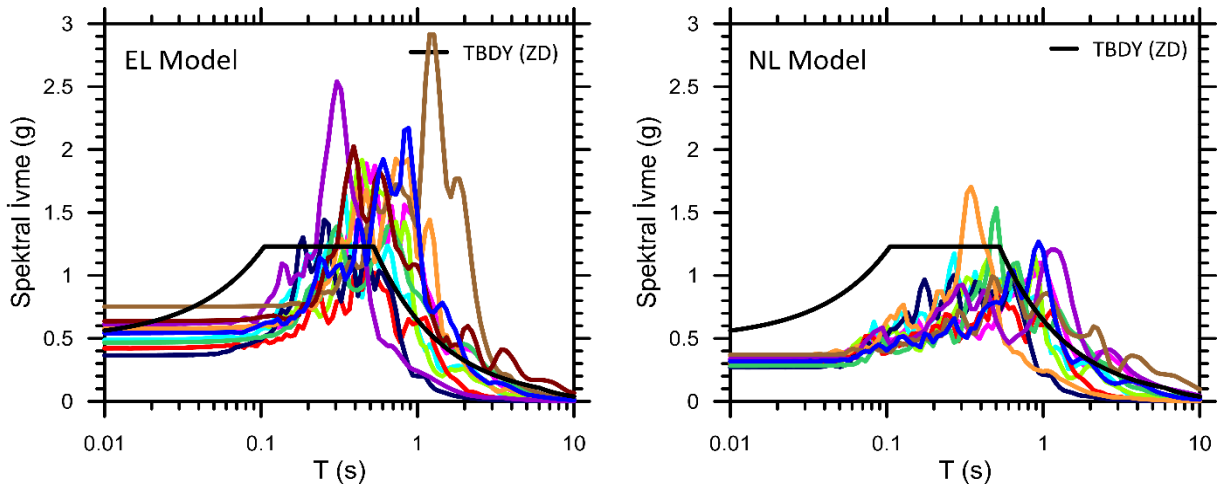


Şekil 10. Derinlik Boyunca Aşırı Boşluk Suyu Basıncı Oranı Değişimi

### Gölbaşı Örneği:

Çalışma kapsamında Antakya zeminine benzer şekilde sıvılaşmanın beklendiği siltli kum içeriği nedeniyle Gölbaşı örneği için de zemin büyütmesinin yanında lineer olmayan sıvılaşma analizi de yapılmıştır. Şekil 10-b’de görüldüğü üzere en az bir tabakada sıvılaşma gerçekleşmiş birkaç

tabaka da ise sıvılaşma tamamen olmasa bile büyük derecede taşıma gücü kaybı olmuştur. Şekil 11 de ise yüzeydeki spektral davranış sunulmaktadır. Düşük periyotlarda yönetmelik her iki yöntemde de güvenli tarafta kalmıştır. Lineer olmayan yöntem düşünüldüğünde uzun periyotlarda birkaç kayıt yönetmeliğin üzerinde kalsa da yönetmelik pozitif bir tasarım spektrumu önermiştir.



Şekil 11. Gölbaşı Örneği için Farklı Analizlerle Elde Edilen Yüzey Spektral İvmeleri

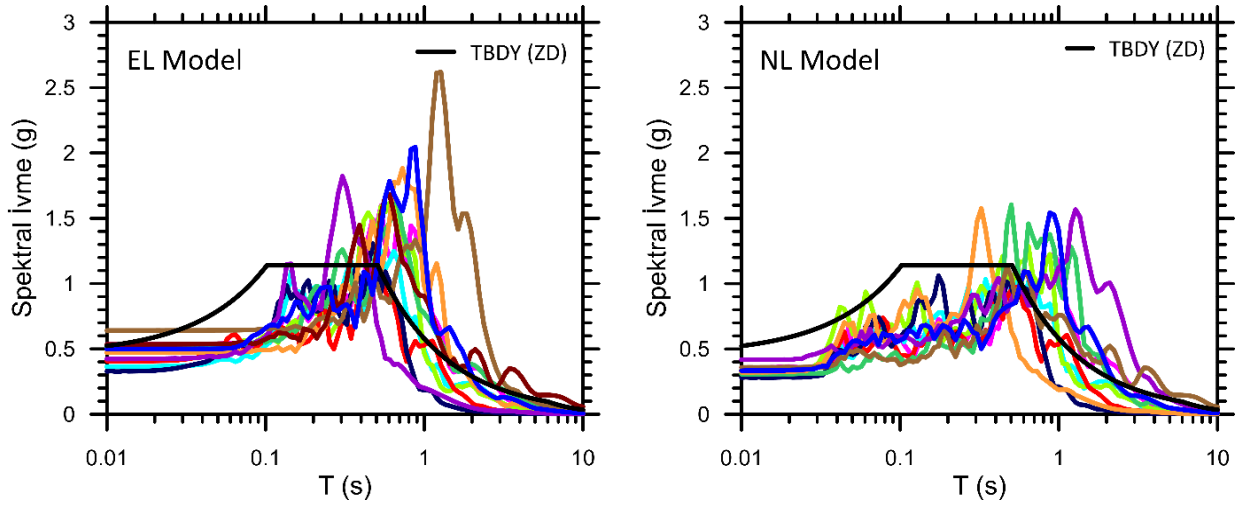
Fakat eşdeğer lineer yöntem seçildiğinde hem plato spektral ivmesi (kısa periyot spektral ivmesi) düşük kalmış hem de orta-uzun periyot davranışı değerinin altında hesaplanmıştır.

Başka bir ifadeyle, bu saha için SDS değeri 1.2'ler yerine 1.5-1.6 seviyesinde, TB periyodu da 1.0-1.2 s'lerde önerilebilir ki bu değerler yönetmeliğin üzerinde kalmıştır. Ayrıca 2 farklı senaryo için farklı periyotlarda spektral ivme 2.5g ve 2.9g seviyelerindedir bu da bu periyotlara yakın hakim periyotlardaki binaların 0.45g'lik bir ivmeyi nedenli büyük hissedeceklerinin göstergesidir. Yüksek periyotların sismik davranışının eksik hesaplanması çok katlı yapılara gelecek dinamik yüklerin yetersiz

modellenmesi sonucunu doğurması nedeniyle, yapısal kusurlardan bağımsız olarak yıkıcılığın büyük olmasının ana etkenlerinden biri olarak görülmektedir. Parametrik çalışmaların çıktıları belli oranda sahaya özel davranışlarla doğrulanarak standart haline getirilmelidir.

#### **Türkoğlu Örneği:**

Son olarak da içeriğinde hiç kum barındırmayan düşük plastisiteli silt ve kil baskın bir zemin için yapılan analiz sonuçları aşağıda Şekil 12'de sunulmuştur. Buradaki temel hedef kum baskın ve kil baskın davranışların ne kadar değiştiğinin altının çizilmesidir.



**Şekil 12.** Türkoğlu Örneği için Farklı Analizlerle Elde Edilen Yüzeysel Spektral İvmeleri

Diğer profillere göre daha yüksek kayma dalga hızına ve rijitliğe sahip bir zemin için bile orta-yüksek periyotlarda yönetmelikten büyük değerler elde edilmiştir. Lineer olmayan analizler plato spektral ivmesi bakımından güvenli tarafta olmakla beraber yine yüksek periyotlar 4-5 tane senaryo yönetmelikten yüksek değerlerle tasarım spektrasını güvensiz hale getirmişlerdir. Eşdeğer lineer analiz sonuçları düşünüldüğünde ise yönetmelik tarafından önerilen kısa periyot spektral ivmesi de analiz sonuçlarının altında kalmıştır. Yine hakim periyodu yüksek binanlar için eksik sismik tasarım olarak değerlendirmek mümkün olacaktır. 3 farklı nokta için yapılan analizlerin sonuçları sadece ilgili noktaların yansıtmakta olup

genelleştirilemez. Bunun yanında arazi gözlemleriyle analiz sonuçlarının örtüştüğü de yadsınamaz bir gerçek olarak ortaya çıkmıştır.

## 6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında 6 Şubat depremleri sonrasında sahaya özel analizlerle hasarın ve yıkımın ne kadar büyük olduğunu tahmin edebilme kapasitesi araştırılmıştır. Her türlü statik-sismik tasarım için yönetmelik genel bir standart sunmaktadır. Depremlerin yıkıcılığının azaltılmasına bir katkı sağlamak amacıyla depremden etkilenen 3 farklı bölgeden alınan sondaj-sismik ölçüm bilgilerine dayanarak sahaya özel analizler yapılmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, sahaya özel analizlerin önemli olduğu ve zemin iyileştirmesi yapılmadan bu sahalarda yapılaşmanın olmasının deprem hasarı ve yıkıcılığı bakımından büyük olacağı beklenmelidir. Doygun gevşek kumlu veya siltli kumlu zeminlerde özellikle sıvılaşma potansiyeli araştırılmalıdır.
- Tasarımın spektrumunu oluşturan ana parametreler ( $S_{DS}$ ,  $T_A$  ve  $T_B$ ) hesaplanırken parametrik/istatistiksel yaklaşımların yanında sahaya özel analizlerle doğrulanmalıdır.

- Hasarın büyümesi ve yıkıcı hale gelmesinin temel unsurlarından biri yerel zemin özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan zemin büyütmesi kavramıdır. Analiz sonuçlarına göre 2 farklı zeminde de tasarımın spektrumunun önerdiği kısa periyot spektral ivmesi eksik kalmıştır.
- Zemin büyütmesi sonucu ortaya çıkan diğer bir önemli sonuç da tasarım sağ uç köşe periyodunun sahaya ait sonuçlara göre düşük kalması ve orta-yüksek hakim periyoda sahip binaların sismik tasarımlarının eksik hesaplanması sonucunu doğurmaktadır.

Son olarak zeminin dinamik davranışı ve sahaya özel davranış analizi sismik tasarımda önemlidir ve ilgili bilim dallarının disiplinler arası çalışarak deprem dirençli yapılar/kentler kurulma çalışmalarının yapılması elzemdir.

## 7. 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 İle Zeminin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Örneği, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler, Eskişehir.
- Civelekler, E., Afacan, K.B., Okur, D.V., 2021. Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yaklaşımlara Göre Sismik Yük Etkisindeki Zeminlerde Davranış Analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Eskişehir.
- Çetin, K.Ö., İlgaç, M., Can, G., Çakır, E., 2023. Ön Değerlendirme Raporu 6 Şubat 2023, Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) Depremleri, ODTÜ – Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara.

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.

İyisan 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.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, 30364.

Türkiye Cumhuriyeti Devleti, 2023. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

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.