

2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Gölbaşı (Adıyaman) İlçesinin Deprem Davranışının ve Zemin Sıvılaşmasının Değerlendirilmesi

Ahmet Burak Demirel ¹, Yetiş Bülent Sönmezer ^{1*}, Murat Çeliker ²

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 71451, Kırıkkale.

²DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, 23100, Elazığ.

Özet

Deprem dalgaları, yeryüzünde yayılırken geçtikleri zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişime uğramaktadır. Depreme dayanıklı yapıların tasarlanabilmesi için, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. 6 Şubat 2023 tarihinde Pazarcık (M_w :7.7) ve Elbistan (M_w :7.6) merkezli olarak meydana gelen iki büyük deprem, geniş bir bölgede ağır can kayıplarına ve yüz binlerce yapının kullanılamaz hâle gelmesine neden olmuştur. Bu depremlerden etkilenen yerleşim alanlarından biri olan Gölbaşı (Adıyaman) ilçesinde depremlerin yapılar üzerindeki yıkıcı etkileri belirgin biçimde gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Gölbaşı (Adıyaman) ilçe yerleşim alanına ait zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, arazi deneylerine dayalı yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Sıvılaşma analizlerinin gerçekleştirildiği lokasyonlarda eş zamanlı olarak zemin davranış analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda sıvılaşma potansiyeli ve zemin davranış haritaları oluşturulmuştur. Analiz sonuçları, 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Gölbaşı yerleşim alanında yapılan saha gözlemleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma bulguları, inceleme alanının kuzey kesiminde yer alan Gölbaşı Gölü'ne yakın, ince tane içeriği düşük alüvyon zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Zemin davranış analizleri ise özellikle yeraltı su seviyesi yüksek, gevşek ve düşük kohezyonlu bazı zeminlerde zemin büyütme katsayısının 4'ün üzerine çıktığını ortaya koymuştur. Elde edilen analiz sonuçlarının, Kahramanmaraş depremleri sonrasında bölgede gözlemlenen zemin davranış izleriyle büyük ölçüde örtüştüğü belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Sıvılaşma, Zemin Davranış Analizi, Zemin Büyütmesi, Gölbaşı, Deprem

Evaluation of Seismic Behavior and Soil Liquefaction in Gölbaşı (Adıyaman) District During the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes

Abstract

Earthquake waves undergo significant changes as they propagate through the earth's surface, depending on the physical and mechanical properties of the soil they pass through. Accurate determination of soil behavior under dynamic loads is crucial for designing earthquake-resistant structures. Two major earthquakes, centered in Pazarcık (M_w : 7.7) and Elbistan (M_w : 7.6), occurred on February 6, 2023, causing heavy loss of life and rendering hundreds of thousands of buildings unusable across a wide area. The devastating effects of these earthquakes on structures were clearly observed in Gölbaşı (Adıyaman) district, one of the affected settlements. This study evaluates the liquefaction potential of soils in the Gölbaşı (Adıyaman) district using methods based on field tests. Simultaneously, soil behavior analyses were conducted at the locations where liquefaction analyses were performed. Liquefaction potential and soil behavior maps were created based on the obtained data. The analysis results were evaluated together with field observations made in the Gölbaşı settlement area after the February 6, 2023 earthquakes. The study findings indicate that the liquefaction potential is high in alluvial soils with low fine grain content, located near Gölbaşı Lake in the northern part of the study area. Soil response analyses revealed that the soil amplification coefficient exceeded 4, particularly in some loose and low-cohesion soils with high groundwater levels. It was determined that the obtained analysis results largely coincided with the soil behavior patterns observed in the region after the Kahramanmaraş earthquakes.

Keywords

Liquefaction, Site response analysis, Soil amplification, Gölbaşı, Earthquake

1. Giriş

Altı Şubat 2023 tarihinde, Türkiye saati ile 04:17 ve 13:24'te merkez üsleri sırasıyla Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan M_w :7,7 ve M_w :7,6 büyüklüğünde iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Kahramanmaraş başta olmak üzere Hatay, Gaziantep, Malatya, Diyarbakır, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Osmaniye ve Adana illerinde olağanüstü hâl ilan edilmiş; daha sonra Elazığ, Bingöl, Kayseri, Mardin, Tunceli, Niğde ve Batman illeri de afet bölgesi

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (318) 3574242

E-posta: ahmetburakdemirel@gmail.com (Demirel A),

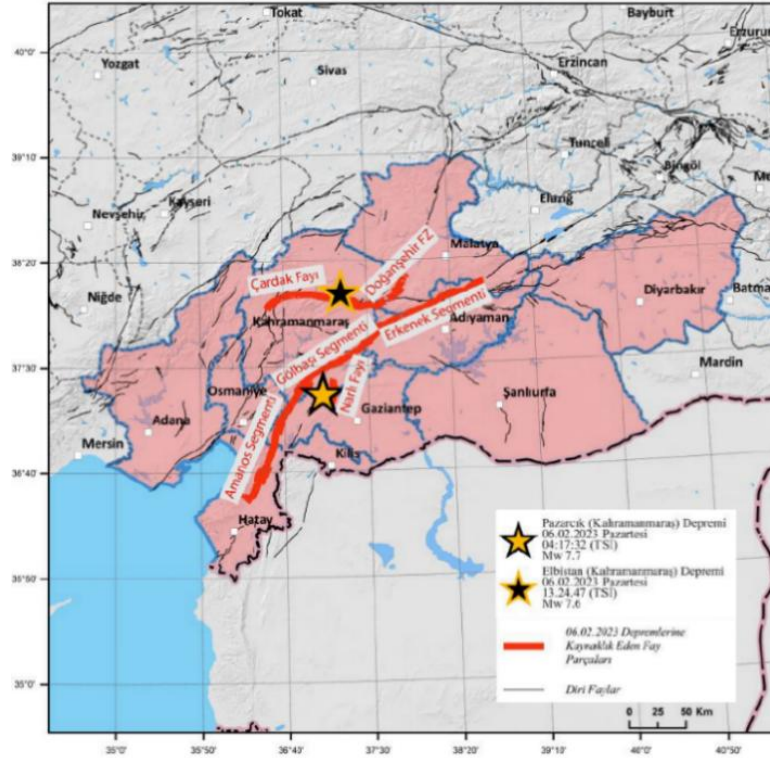
bsonmezer@kku.edu.tr (Sönmezer Y.B), mceliker23@gmail.com (Çeliker M)

Gönderim Tarihi / Received : 21/01/2026

Kabul Tarihi / Accepted : 20/04/2026

kapsamına alınmıştır. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonucunda, resmi verilere göre 53537 kişi hayatını kaybetmiş ve 107213 kişi yaralanmıştır. Depremler neticesinde bölge genelinde 38901 bina tamamen yıkılmıştır (AFAD, 2024).

Jeolojik veriler, Pazarcık merkezli ilk depremin Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan Erkenek (Çelikhán–Gölbaşı arası, 65 km), Gölbaşı (Gölbaşı–Türkoğlu arası, 90 km) ve Amanos (Türkoğlu–Kırıkhan arası, 110 km) segmentlerinin yanı sıra Ölüdeniz Fay Sistemi’nin kuzey ucundaki Narlı segmentini de kıldığını göstermektedir. Elbistan merkezli ikinci sarsıntının ise Çardak Fayı ve Doğanşehir Fay Zonu ile ilişkili olduğu rapor edilmiştir (AFAD, 2023). Her iki depreme kaynaklık eden bu fay segmentlerinin konumsal dağılımı Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerine kaynaklık eden fay segmentleri (AFAD, 2023)

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında gözlemlenen yaygın yapı hasarları, zemin özelliklerinin yapı performansı üzerindeki belirleyici etkisini bir kez daha açık biçimde ortaya koymuştur. Özellikle Hatay ve Gölbaşı (Adıyaman) bölgelerinde, deprem merkez üslerine (Pazarlık ve Elbistan) coğrafi olarak daha yakın konumda bulunan bazı yerleşim alanlarına kıyasla çok daha ağır yapısal hasarların meydana gelmesi dikkat çekicidir. Bu durum, hasar dağılımında sismik kaynağa olan mesafeden ziyade, yerel zemin karakteristiklerinin belirleyici bir rol oynadığını kanıtlamaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri, söz konusu bölgelerde yaygın olarak bulunan yumuşak ve alüvyon karakterli zemin koşullarıdır. Deprem dalgaları sert zeminlerde daha yüksek hızla ve düşük genlikte yayılırken, yumuşak zeminlerde daha düşük hızla ancak daha yüksek genliklerle ilerlemekte; bu durum zemin büyütmesi olarak tanımlanan ivme artışlarına yol açmaktadır. Kalın ve gevşek zemin tabakaları sismik dalgaların genliğini artırabilirken, yoğun ve konsolide zeminler ile kaya birimleri enerjiyi sönümleyerek dalga genliğini azaltabilmektedir. Ayrıca farklı zemin tabakaları arasındaki empedans farkları, enerji saçılması ve sönümleme mekanizmaları da zemin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir (Das & Chakraborty, 2020; Belvaux vd., 2018).

Zemin davranış analizi, deprem sırasında yerel zemin koşullarının yer hareketi üzerindeki etkisini ortaya koymak ve mühendislik tasarımı için zemin davranış spektrumlarını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Sönmezer 2016; Sönmezer vd., 2018; Sönmezer vd., 2019). Zemin davranış; sismik yer hareketinin genlik, frekans içeriği ve süresi gibi özelliklerinin yanı sıra, ana kaya üzerinde yer alan zemin tabakalarının kalınlığı, tabakalanma yapısı ve malzeme özelliklerine doğrudan bağlıdır (Sitharam & Anbazhagan, 2007; Kramer, 1996). Bu nedenle, zeminlerin drenajsız koşullarda tekrarlı yüklemeler altındaki davranışlarının hassas bir şekilde değerlendirilmesi önemlidir. Bu çerçevede, kohezyonsuz birimlerde sıvılaşma olgusunu kohezyonlu birimlerde ise çevrimsel yumuşama, rijitlik azalımı ve ilerleyici göçme mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenmesi yerel zemin koşullarının etkisini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır.

Yerel zemin koşullarının deprem etkisi altındaki davranışının yalnızca sıvılaşma potansiyeliyle değil, aynı zamanda yapı-zemin etkileşimi, doğrusal olmayan zemin büyütmesi ve kohezyonlu birimlerde çevrimsel yumuşama

mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Nitekim Özgan vd. (2016), yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımında periyot, taban kesme kuvveti ve iç kuvvet dağılımları üzerinde anlamlı değişimlere yol açtığını ortaya koyarken, Kılıçer ve Özgan (2018) deprem yükleri altında yapı-zemin etkileşiminin tasarım sonuçları üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamıştır. Ayrıca Özgan vd. (2013), değişken zemin derinliğinin elastik temel davranışı üzerindeki etkisini göstererek zemin profilinin mühendislik modellemesinde kritik bir parametre olduğunu belirtmiştir. Türkiye'den Akıl vd. (2008) Gölbaşı yerleşim alanının Doğu Anadolu Fay Zonu üzerindeki jeoteknik özelliklerini değerlendirerek bölgedeki zemin heterojenliğinin ve yerleşime uygunluk sorunlarının önemini ortaya koymuş, Sönmezer vd. (2018) ise doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizlerinin dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesinde ve sahaya özgü sismik tepkinin ortaya konulmasında önemli bir araç olduğunu göstermiştir. Uluslararası literatürde ise Kramer (1996), zemin davranışının deprem mühendisliği açısından temel kuramsal çerçevesini sunmuş; Hashash vd. (2010), doğrusal olmayan sahaya özgü zemin davranış analizlerinin yerel büyütme ve spektral taleplerin gerçekçi belirlenmesindeki önemini ortaya koymuş; Boulanger ve Idriss (2007) ise özellikle siltli ve killi zeminlerde çevrimsel yumuşamanın klasik kum sıvılaşmasından farklı fakat yapısal hasar açısından son derece kritik bir mekanizma olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, Gölbaşı gibi alüvyonal, yeraltı su seviyesi yüksek ve litolojik açıdan değişken alanlarda sıvılaşma, zemin büyütmesi ve çevrimsel yumuşama etkilerinin birlikte ele alınması, saha gözlemleri ile analitik bulgular arasındaki uyumun güçlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Gevşek, suya doygun ve kohezyonsuz zeminlerde, tekrarlı sismik yükler altında sıvılaşma olgusu meydana gelebilmektedir. Sıvılaşma; taşıma gücü kayıpları, aşırı oturmalar, yanal yayılmalar ve yapı devrilmeleri gibi ciddi hasar mekanizmalarına neden olabilmektedir (Youd vd., 2001; Idriss ve Boulanger, 2008). Seed ve Idriss (1967) tarafından yürütülen öncü çalışmalar, zemin sıvılaşması fenomeninin mekanik temellerinin anlaşılmasında dönüm noktası teşkil etmiştir. Bu araştırmalar çerçevesinde sıvılaşmayı tetikleyen yükleme koşulları devirsel kesme gerilmeleri olarak tanımlanmış ve sıvılaşma potansiyeli, deprem sarsıntısının büyüklüğü ile devir sayısına bağlı olarak geliştirilen modellerle ilişkilendirilmiştir. Günümüzde "Sadeleştirilmiş Yöntem" olarak kabul gören analiz süreci, sismik talebi ifade eden Devirsel Gerilme Oranı (DGO) ile zeminin bu talebe karşı koyma kapasitesini temsil eden Devirsel Direnç Oranı (DDO) arasındaki dengeye dayanmaktadır (Youd vd., 2001). Saha verilerine dayalı sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde, standart penetrasyon deneyi (SPT) literatürde en yaygın kabul gören parametrik yöntemdir (Seed vd., 1983; Stark ve Olson, 1995; Sönmezer vd., 2012). Killi zeminlerin sismik yükler altındaki davranışı, granüler zeminlerde gözlemlenen klasik sıvılaşma olgusundan yapısal olarak ayrılmaktadır. Tekrarlı yükleme maruz kalan killi zeminler, kumlu zeminlerdeki gibi ani bir direnç kaybı yaşayıp sıvılaşmak yerine, çevrimsel hareketlilik benzeri bir deformasyon biriktirme eğilimi gösterirler. Özellikle düşük plastisiteye sahip killi zeminler, deprem sırasında tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kaldıklarında, boşluk suyu basıncındaki artış ve zemin yapısındaki bozulmalar neticesinde kayma mukavemetlerinde ve rijitliklerinde kademeli bir azalma sergilerler (Boulanger ve Idriss, 2007). Ayrıca yüksek hassasiyete sahip killerde, sismik sarsıntı nedeniyle oluşan bu mukavemet kaybı, temel zeminindeki statik taşıma kapasitesinin altına düşülmesi durumunda yapıda ani oturmalar, devrilmelere veya yanal yayılmalara yol açabilmektedir.

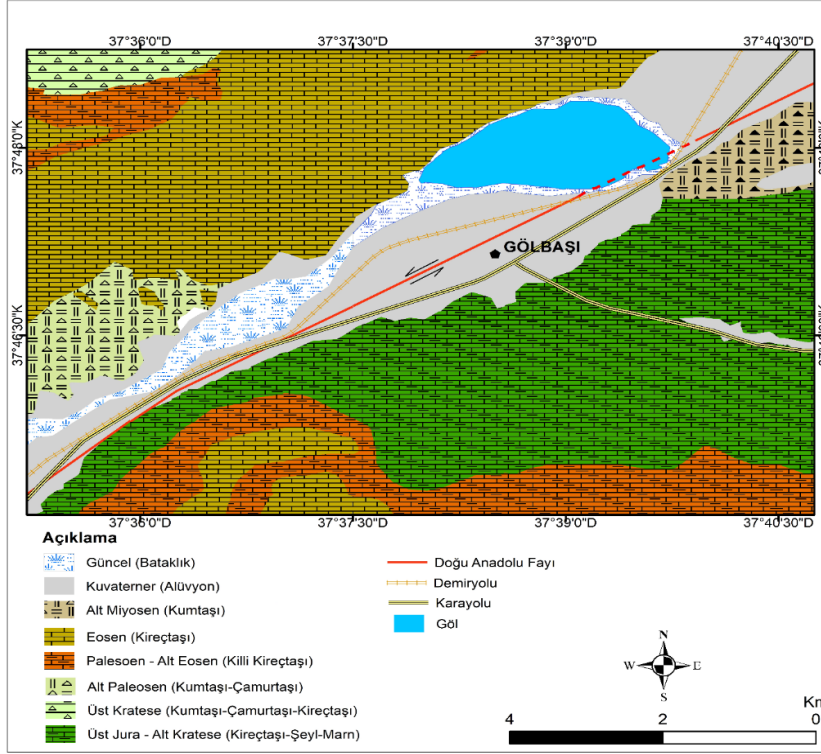
6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen yerleşim alanları arasında yer alan Adıyaman ili Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen zemin yüzeyi deformasyonları özellikle dikkat çekicidir. Bölgedeki saha incelemeleri; yapılaşmış alanlarda yaygın taşıma gücü yetersizlikleri, yapısal çökmeler, yanal yayılma, aşırı oturma ve yapı devrilmeleri gibi çok sayıda hasar türünü belgelemektedir (Aktaş vd., 2024). AFAD (2023) tarafından yayımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri raporuna göre, Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen zemin davranışlarının oluşmasında Kahramanmaraş-Pazarcık merkezli depremin baskın etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple Pazarcık merkezli depremde Gölbaşı ilçesinde oluşan en büyük yer ivmesi (PGA) değerinin belirlenmesi önemli olmaktadır. Ancak Kahramanmaraş depremlerinde Gölbaşı ilçesinde bulunan 0208 numaralı ivme istasyonundan, Bozbeş vd. (2024) tarafından da belirtildiği üzere, elektrik kesintileri ve cihaz arızaları nedeniyle güvenilir ivme kayıtları elde edilememiştir. Bundan dolayı Gölbaşı ilçesinde yapılan bazı çalışmalarda Pazarcık depreminde oluşan PGA değeri araştırılmıştır. Flora vd. (2024) çevredeki istasyonlardan elde edilen ivme kayıtlarını kullanarak Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) interpolasyon yöntemi ile Gölbaşı ilçesi için PGA değerini 0,13-0,25 g olarak tahmin etmişlerdir. IDW yöntemi, hedef noktadaki parametre değerini hesaplarken, komşu istasyon verilerini merkeze olan uzaklıklarının tersiyle oranlayarak dikkate almakta ve böylece PGA dağılımının yüksek hassasiyetle haritalandırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca Cetin vd. (2025), 6 Şubat depremlerinin Gölbaşı ilçesi üzerindeki sismik etkilerini inceledikleri çalışmalarında, ivme azalım ilişkilerine dayalı değerlendirmeler yapmış ve Pazarcık depremi için Gölbaşı ilçesinde ortalama en büyük yer ivmesi (PGA) değerini 0,5 g, Elbistan depremi için ise 0,3 g olarak raporlamışlardır. Dahası Zeybek vd. (2025), 6 Şubat depremleri sırasında Gölbaşı yerleşim alanında PGA belirsizliğini irdeledikleri çalışmalarında, farklı yöntemlerden elde edilen sonuçları dengelemek amacıyla 0,45 g değerini benimsemişlerdir. Bu değer, Gölbaşı ilçesinde sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesi açısından makul ve literatürle uyumlu bir temsil sunduğu ifade etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, Gölbaşı (Adıyaman) yerleşim alanına ait zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ve dinamik davranışı, arazi deneylerine dayalı analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiş; elde edilen sonuçlar 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan saha gözlemleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Deprem kaynaklı zemin deformasyonlarının doğru şekilde anlaşılmasının, gelecekte bölgede inşa edilecek yapıların güvenliğinin artırılması ve sismik risklerin azaltılması açısından önemli katkılar sunması hedeflenmektedir. Ayrıca elde edilen bulguların, benzer jeolojik ve sismotektonik koşullara sahip alanlar için literatüre referans niteliğinde katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1.1. Bölgenin Jeolojisi

Gölbaşı ilçesinin yerleşim alanı jeolojisi; Kuvaterner yaşlı alüvyon (Qal) birimleri, Erken Jura–Geç Kretase yaşlı Karadut Karmaşığı'na (Kkad) ait rezidüel birimler ile Karadut Karmaşığı'na ait ana kaya birimlerinden oluşmaktadır. İlçe nüfusunun yarısından fazlasının yaşadığı yerleşim merkezi, büyük ölçüde havza tabanında gelişmiş, suya doymun Kuvaterner yaşlı alüvyon yelpazesi çökelleri üzerinde yer almaktadır. Bu jeolojik ve hidrojeolojik koşullar nedeniyle, Gölbaşı yerleşim alanı 6 Şubat 2023 depremlerinden önemli ölçüde etkilenmiştir (Sandıkçıoğlu vd., 2023). Şekil 2'de bölgenin genel jeoloji haritası sunulmuştur. Karadut Karmaşığı, başlıca karbonatlı kayalardan, özellikle kireçtaşlarından oluşmakta olup bu litolojik özellikleriyle bölgedeki diğer jeolojik birimlerden ayrılmaktadır. Bölgesel jeoloji içerisinde önemli bir yere sahip olan Koçali Formasyonu ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde geniş yayılım göstermekte ve ağırlıklı olarak Paleosen–Eosen yaşlı (yaklaşık 66–34 milyon yıl) tortul kayalardan meydana gelmektedir. Bu formasyon, genellikle kumtaşı, şeyl ve kireçtaşı gibi litolojileri içermekte olup bölgenin stratigrafik ve tektonik evriminde önemli bir rol oynamaktadır (İmamoğlu ve Gökten, 1996; Akıl vd., 2008).

Gölbaşı Gölü'nü çevreleyen düz havza alanına doğru, güneyde yer alan yüksek plato alanlarından kademeli olarak azalan topografik eğim, alüvyal malzemelerin taşınmasını ve birikmesini kolaylaştırmış; buna bağlı olarak sığ yeraltı suyu seviyelerinin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Arazi gözlemleri ve jeoteknik incelemeler, bu alüvyal çökellerin tane boyutu dağılımı, doku, gözeneklilik ve yoğunluk açısından önemli değişkenlikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Söz konusu heterojenlik, akarsu ve göl ortamlarında gerçekleşen çoklu çökme evrelerinin bir sonucu olup, bölgenin jeoteknik özellikleri ile sismik davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu karmaşık ve tabakalı zemin profili, özellikle deprem sırasında sıvılaşma potansiyeli ve zemin büyütmesi gibi olumsuz zemin davranışlarının gelişmesine elverişli koşullar oluşturmaktadır (Zeybek vd., 2025).



Şekil 2: Gölbaşı (Adıyaman) İlçesi genel jeoloji haritası (MTA, 2024)

2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) tarafından Gölbaşı ilçesi için hazırlanan ve imar planına esas teşkil eden mikrobölgeleme etüt raporu çerçevesinde gerçekleştirilen saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Söz konusu veriler doğrultusunda, inceleme alanına ait zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ile dinamik zemin davranışı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, 52 sondaj lokasyonunda zaman tanım alanında doğrusal olmayan tek boyutlu zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizleri ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) (TBDY 2018) esasları doğrultusunda Youd vd. (2001) tarafından önerilen ampirik yöntemler kullanılarak aynı 52 lokasyon için yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı bir ortamda değerlendirilmek üzere ArcGIS yazılımına aktarılmış; böylece sıvılaşma potansiyeli ve dinamik zemin

davranışına ilişkin parametrelerin yerleşim alanı genelindeki mekânsal dağılımını gösteren tematik haritalar oluşturulmuştur.

2.1. Saha Deneyleri

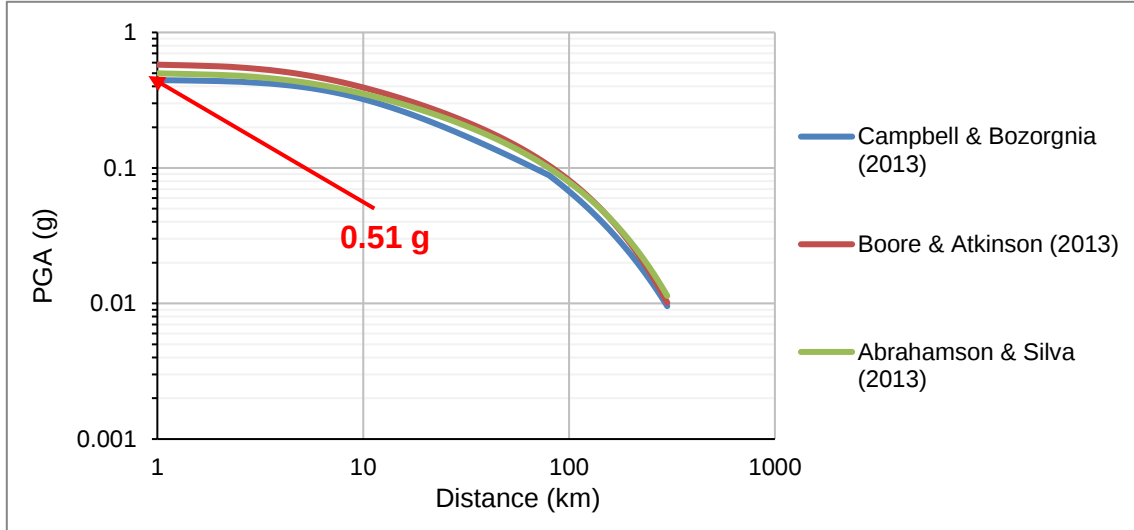
Çalışma kapsamında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının (ÇŞİDB) Gölbaşı ilçesinde yaptırmış olduğu saha ve laboratuvar verilerinden 52 adet sondaj ve 52 profil çok kanallı yüzey dalgası (MASW) test lokasyonları belirlenerek çalışma kapsamında kullanılmıştır. Sondaj lokasyonu ile sismik ölçüm lokasyonları belirlenirken özellikle birbirine yakın olanlar tercih edilmiştir. Sondaj sayısı belirlenirken, yerleşim alanına ait jeolojik özelliklerin, analizlere homojen bir şekilde yansıtılması hedeflenmiştir. Şekil 3’de analizlerde kullanılan sondaj ve MASW ölçüm lokasyonları gösterilmiştir.



Şekil 3: Analizlerde Kullanılan Sondaj ve MASW ölçüm lokasyonları

2.2. Analizlerde Kullanılacak Yer Hareketinin Tahmini

Gölbaşı ilçesinde bulunan 0208 numaralı ivme istasyonundan güvenilir ivme kayıtları elde edilememesi sebebiyle bu çalışmada, Pazarcık depremi neticesinde Gölbaşı ilçesinde meydana gelen PGA değerleri, ivme azalım ilişkileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Hesaplamalarda temel alınan parametrelerden biri olan inceleme alanına ait ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}), sahada yürütülen Çok Kanallı Yüzey Dalgası (MASW) sonuçlarına göre 280 m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Gölbaşı ilçesinin Doğu Anadolu Fay Zonu’na olan en kısa mesafesi yaklaşık 1 km olarak ölçülerek analizlere dâhil edilmiştir. Söz konusu parametreler esas alınarak; PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) tarafından aktif tektonik bölgeler için dünya genelinde kabul gören [Campbell ve Bozorgnia \(2013\)](#), [Boore ve Atkinson \(2013\)](#) ile [Abrahamson ve Silva \(2013\)](#) tarafından geliştirilen güncel azalım ilişkileri kullanılmıştır. Azalım ilişkilerinde üç farklı ampirik yöntemin tercih edilmesindeki temel amaç, hesaplamalardaki belirsizlikleri minimize etmek ve farklı yaklaşımların ortalamasını alarak elde edilen PGA değerlerinin güvenilirliğini artırmaktır. Bu kapsamda kullanılan modellerden [Campbell ve Bozorgnia \(2013\)](#); jeolojik yapıyı, havza etkisini ve depremin odak derinliğini dikkate alan orta düzeyde bir karmaşıklığa sahiptir. [Boore ve Atkinson \(2013\)](#) yöntemi, faya olan en kısa yatay mesafeye, zemin özelliklerine ve deprem büyüklüğüne odaklanarak diğer modellere oranla daha az parametreyle sonuç üretmektedir.

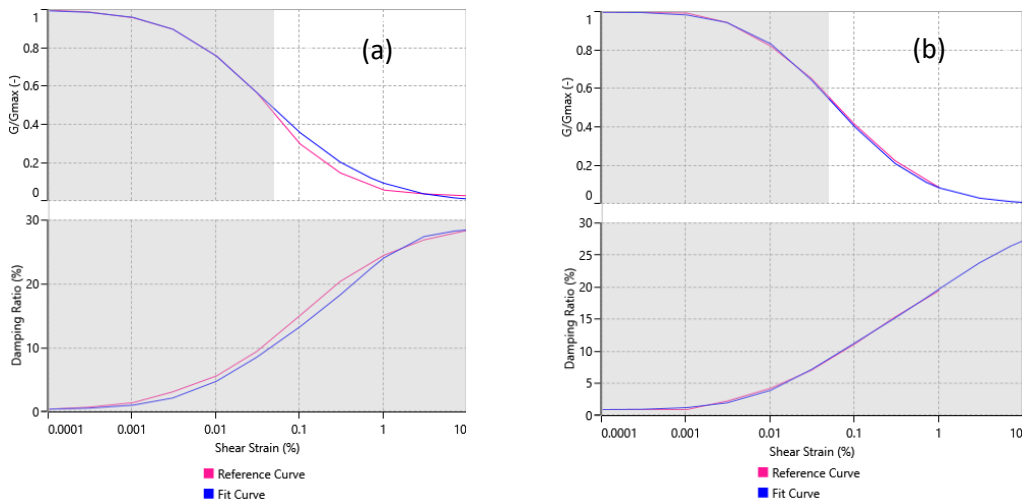


Şekil 4: Azalım ilişkilerine göre PGA-mesafe grafiği

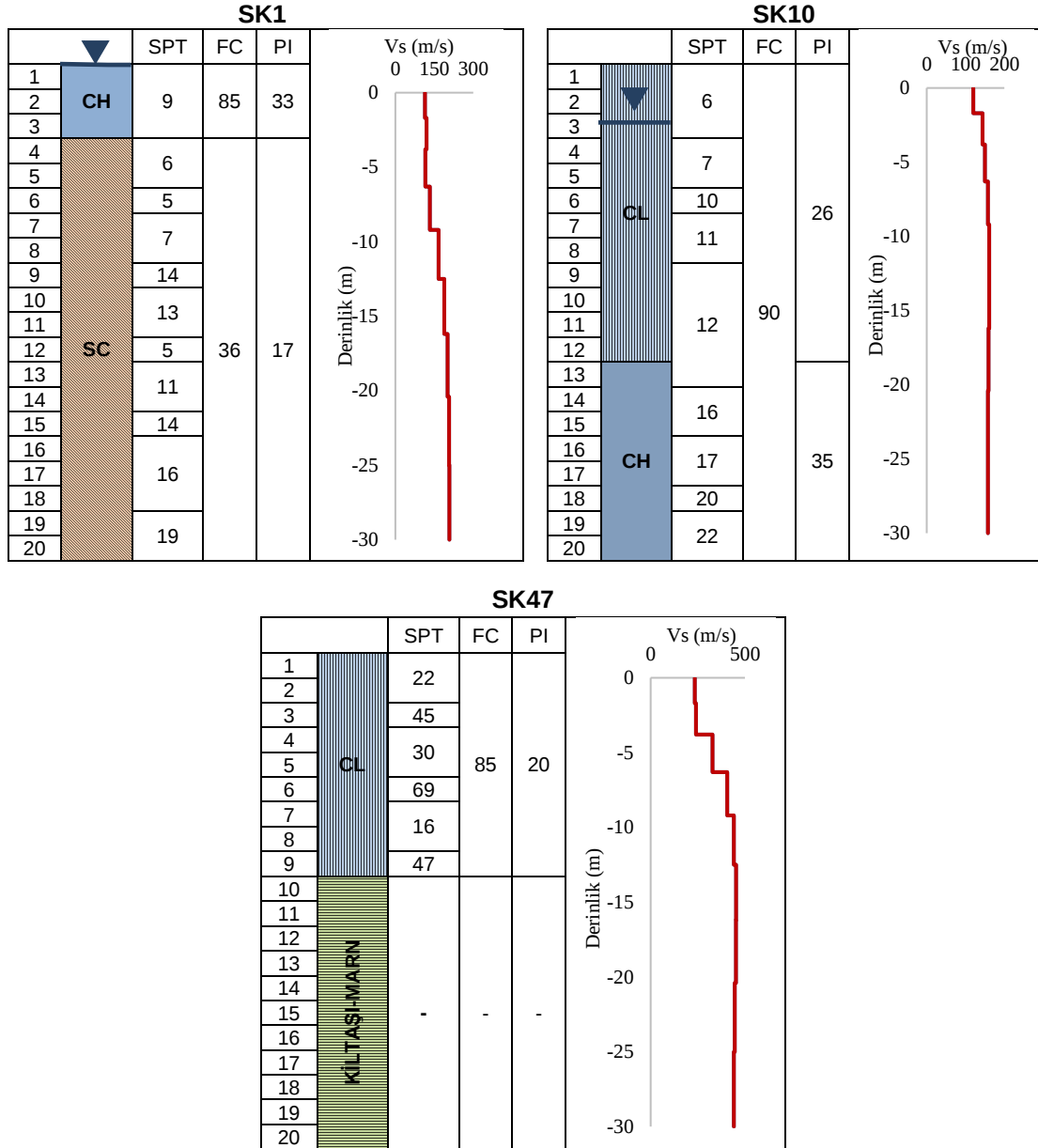
Abrahamson ve Silva (2013) ise, magnitüd doygunluğu ve büyük-küçük deprem hareketleri arasındaki farklar gibi çok sayıda karmaşık etkiyi bünyesinde barındırarak, zeminin dinamik davranışını en kapsamlı parametre setiyle yansıtmaktadır. Ele alınan ivme azalım ilişkileri kullanılarak $M_w = 7,7$ büyüklüğündeki Pazarcık depremi için Gölbaşı ilçesindeki PGA değerlerinin mesafeye bağlı değişimi Şekil 4’de verilmiştir. İlçeden geçen fay zonu dikkate alındığında; yaklaşık 1 km mesafe için Campbell ve Bozorgnia (2013), Boore ve Atkinson (2013) ile Abrahamson ve Silva (2013) yöntemlerinden sırasıyla 0,44 g, 0,58 g ve 0,50 g ivme değerleri elde edilmiştir. Bu üç farklı yaklaşımın ortalaması alınarak tasarım ivmesi (PGA) 0,51 g olarak belirlenmiştir.

2.3. Zemin Davranış Analizleri

Bu çalışmada 52 sondaj lokasyonunda zaman tanım alanında doğrusal olmayan tek boyutlu zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Kayma modülü azalımı (G/G_{max}) ve sönüm oranı (D) eğrileri zemin davranış analizlerinde kullanılan önemli parametrelerdir. Bu çalışmada kumlu zeminler için Seed ve Idriss (1970) ve killi zeminler için ise Vucetic ve Dobry (1988) eğrileri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan örnek kayma modülü azalımı (G/G_{max}) ve sönüm oranı (D) eğrileri Şekil 5’de verilmiştir. Çalışma kapsamında, Gölbaşı ilçesinde yapılan sondajlarda mühendislik ana kayasına ($V_s > 760$ m/s) genellikle rastlanmamıştır. Sadece güneydeki birkaç sondajda mühendislik ana kayasına ulaşılmıştır.



Şekil 5: Analizlerde kullanılan örnek kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri a) Kumlu zemin b) Killi zemin



Şekil 6: SK-1, SK-10 ve SK-47 Zemin Profili Özellikleri

Bu sondajlardaki lokasyonlarda $V_s=760$ m/s olan derinliğe kadar modellemeler yapılmıştır. Onun haricindeki tüm sondaj lokasyonlarında 30 m derinliğe kadar modellemeler yapılmıştır. Modellemelerde sondaj derinliği boyunca MASW testlerinden elde edilen kayma dalgası hızları (V_s) ve sondajlardan elde edilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Şekil 6'da analizlerde kullanılan Sk-1, Sk-10 ve Sk-47 lokasyonlarına ait örnek sondaj logları verilmiştir. Sk-1 lokasyonu göle yakın, az kum içeren alüvyon zeminleri; Sk-10 lokasyonu göle yakın, gevşek ve killi zeminleri; Sk-47 lokasyonu ise göle uzak kıltaşı karakterli birimlerin hâkim olduğu alanları temsil etmektedir. Sondajlara ait düzeltilmemiş darbe sayısı (SPT-N), ince tane içeriği (FC), zemin sınıfı, plastisite indisi (PI) değerleri ve kayma dalgası hızları (V_s) ilgili şekil üzerinde verilmiştir. Zemin davranış analizlerinde kullanılan deprem kayıtlarının seçiminde esas alınan moment büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi, fay mekanizması ve yerel zemin koşulları gibi temel kriterler sunulmuştur (Tablo 1). Bu kriterlerin değer aralıkları sahanın sismotektonik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kriterlerin yanı sıra [Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği \(TBDY 2018\)](#) standartları da gözetilerek; [PEER ve TADAS \(2024\)](#) veri tabanlarından toplam 11 adet ivme kaydı seçilmiştir. Seçilen yer hareketi kayıtlarının temel özellikleri özetlenmiştir (Tablo 2). Seçilen kayıtlar, Gölbaşı ilçesi için ivme azalım ilişkileri yardımıyla belirlenen 0,51 g pik yer ivmesi (PGA) değeri esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Bu yaklaşım, seçilen yer hareketlerinin hedef yer hareketi seviyesini temsil etmesini ve analiz sonuçlarının tasarım senaryosu ile uyumlu olmasını sağlamaktadır ([Kramer, 1996](#); [Hashash vd., 2010](#)). Ölçekleme işlemi ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri DEEPSOIL yazılımı ([Hashash vd., 2017](#)) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Zemin davranış analizlerinden elde edilen veriler, 52 sondaj lokasyonu için ArcGIS ortamına aktarılmış ve sonuçların Gölbaşı yerleşim alanı genelindeki mekânsal dağılımını gösteren tematik haritalar oluşturulmuştur.

Tablo 1: Deprem kayıtları seçim kriterleri

Parametre	Değer Aralığı
Mesafe (km)	0-30
Magnitüd	7-7,7
Fay Tipi	Doğrultu Atımlı
İstasyon $V_{s,30}$ (m/s)	340-810

Tablo 2: PEER ve TADAS veri tabanlarından elde edilen depremlerin özellikleri

Deprem İsmi	Yıl	Büyükölük (M_w)	Deprem Mekanizma	Rrup (km)	$V_{s,30}$ (m/sn)
Cape Mendocino	1992	7,01	Doğrultu Atımlı	6,96	568
Cape Mendocino	1992	7,01	Doğrultu Atımlı	8,18	422
Elbistan	2023	7,6	Doğrultu Atımlı	27,02	809
Elbistan	2023	7,6	Doğrultu Atımlı	20,34	345
Elbistan	2023	7,6	Doğrultu Atımlı	19,69	543
Landers	1992	7,28	Doğrultu Atımlı	19,74	352
Landers	1992	7,28	Doğrultu Atımlı	21,78	359
Landers	1992	7,28	Doğrultu Atımlı	23,62	353
Pazarcık	2023	7,7	Doğrultu Atımlı	2,10	572
Pazarcık	2023	7,7	Doğrultu Atımlı	8,25	541
Pazarcık	2023	7,7	Doğrultu Atımlı	7,47	653

2.4. Sıvılaşma Analizleri

Sıvılaşma analizleri, literatürde yaygın kabul gören ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) tarafından da referans gösterilen Youd vd. (2001) “Sadeleştirilmiş Yöntemi” esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Standart Penetrasyon Testi (SPT) verilerine dayanan bu yaklaşım kapsamında, çalışma alanındaki 52 farklı lokasyondan elde edilen güncel saha verileri kullanılmıştır. İlgili yöntemle göre, sismik sarsıntı sırasında zemin tabakalarında meydana gelen ortalama tekrarlı kayma gerilmesi (τ_{deprem}) hesaplamalarında kullanılan temel formülasyon sunulmuştur (Denklem 1).

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65 \sigma_{v0} / (0.4 S_{DS}) r_d \quad (1)$$

τ_{deprem} : Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesidir. σ_{v0} : Sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilme, S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı, r_d : İlgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısıdır. r_d 'nin derinliği bağlı değişimini veren bağıntılar verilmiştir (Denklem 2).

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z & 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008z & 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \\ r_d &= 0.50 & z > 30 \text{ m} \end{aligned} \quad (2)$$

Moment büyüklüğü $M_w = 7,5$ olan referans bir deprem için hesaplanan Devirsel Direnç Oranı ($CRR_{M7,5}$) hesap bağıntısı (Denklem 3) ile, zeminin bu sarsıntıya karşı koyma kapasitesini temsil eden nihai sıvılaşma direnci (τ_R) hesap bağıntısı (Denklem 4) verilmiştir.

$$CRR_{M7,5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(10N_{1,60f} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

$$\tau_R = CRR_{M7.5} C_M \sigma'_{v0} \quad (4)$$

τ_R : Sıvılaşma direnci, $CRR_{M7.5}$: Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı, C_M : Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı, σ'_{v0} : Efektif düşey gerilme, $N_{1,60f}$: İnce dane oranına göre düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı

Zeminin sismik yükler altındaki dayanım kapasitesini, deprem kaynaklı oluşan gerilmelere oranlayan sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS_L) ise hesaplanmıştır (Denklem 5). FS_L değerinin 1.1'den küçük olduğu durumlarda sıvılaşma potansiyelinin olduğu kabul edilmiştir.

$$FS_L: \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10 \quad (5)$$

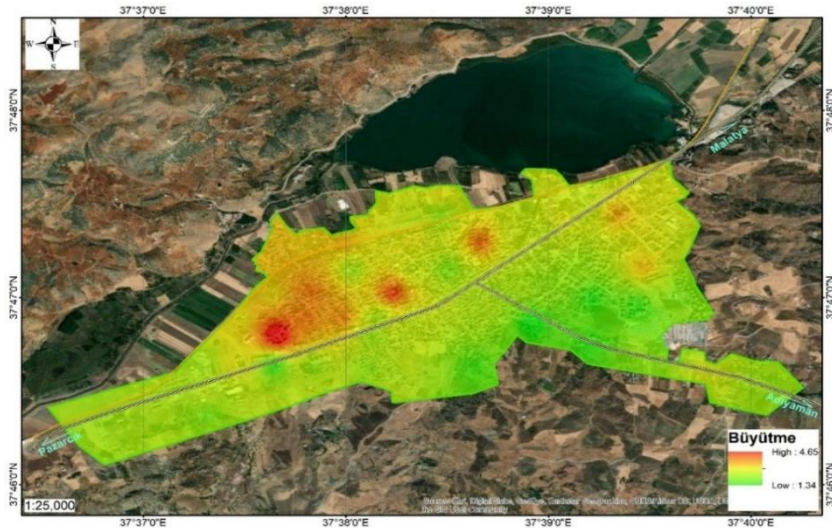
FS_L : Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

Sıvılaşma analizleri, 6 Şubat 2023 Pazarcık depremi için AFAD tarafından bildirilen $M_w = 7,7$ büyüklük değeri ve ivme azalım ilişkileriyle hesaplanan 0,51 g pik yer ivmesi (PGA) esas alınarak yürütülmüştür. Çalışma kapsamında 52 farklı lokasyonda gerçekleştirilen bu analizlerde; sahada elde edilen düzeltilmiş SPT-N darbe sayıları, ince tane içerikleri kullanılmıştır. Analizlerin güvenilirliğini artırmak adına “en olumsuz senaryo” yaklaşımı benimsenmiş; bu doğrultuda her bir zemin profili içerisindeki en düşük SPT-N değerine ve en düşük ince tane oranına sahip, sıvılaşma hassasiyeti en yüksek tabakalar “kritik derinlik” olarak sistematik bir biçimde seçilmiştir. Bu titiz seçim süreciyle, sahanın sismik sarsıntı altındaki en kırılğan tepkisi modellenerek sıvılaşma potansiyelinin muhafazakâr ve gerçekçi bir değerlendirmesi hedeflenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Zemin Davranış Analizi Değerlendirmeleri

Gölbaşı yerleşim alanı genelinde gerçekleştirilen dinamik analizler, zemin büyütme oranlarının salt yüzeyel jeolojiyle değil, tabakalı zemin yapısının dinamik tepkisiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada elde edilen en özgün bulgulardan biri, zemin büyütme katsayılarının güneyden kuzeye, yani göl kıyısındaki yumuşak alüvyon birimlere doğru gidildikçe 1,34'ten 4,65 seviyelerine dramatik bir artış sergilemesidir (Şekil 7). Bu mekânsal varyasyonun temel nedeni; havza tabanında sığ yeraltı su seviyesi ile birleşen, düşük kayma dalgası hızına ($V_{s30} < 180$ m/s) sahip Kuvaterner yaşlı gevşek alüvyon tabakalarının sismik dalga genliğini aşırı düzeyde artırmasıdır.

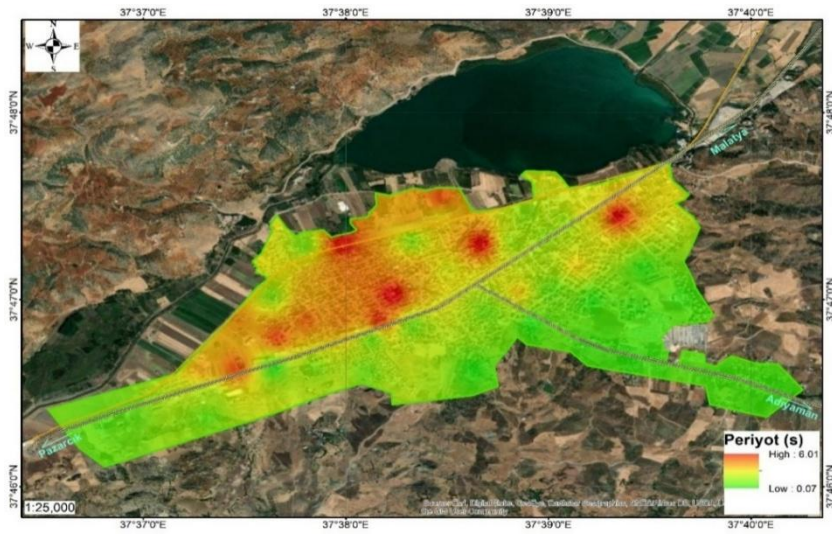


Şekil 7: Gölbaşı yerleşim alanı zemin büyütmesi haritası

Özellikle bölgenin kuzeyinde kalan düşük kohezyonlu ve gevşek kumlu tabakalar, yüksek empedans farkı yaratarak ana kayadan gelen enerjiyi sönmek yerine yüzeyde odaklamaktadır. Bu durum, bölgedeki hasarın sadece deprem büyüklüğüne değil, zemin katmanlarının sismik enerjiyi yaklaşık 4 kat büyütürken üst yapıya aktaran “filtreleme ve genlik artırma” karakteristiğine bağlı olduğunu kanıtlamaktadır. Yerleşim alanının kuzeybatı bölümünde gözlemlenen lokal

büyütme artışlarının ise, kumlu zeminlerde deprem sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basıncına bağlı rijitlik azalımı ve doğrusal olmayan davranışlarla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Literatürde, bu tür zemin koşullarının özellikle yüksek yeraltı su seviyesi varlığında zemin büyütmesini artırdığı yaygın olarak rapor edilmektedir (Kramer, 1996; Hashash vd., 2010).

Şekil 8’de verilen zemin hâkim periyodu haritası, inceleme alanının sismik tepki karakteristikleri açısından net bir kutuplaşma sergilediğini ortaya koymuştur. Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, yüzey zeminlerine ait hâkim periyot değerlerinin 0,07 s ile 6,01 s gibi oldukça geniş bir aralıkta değişim göstermesidir. Bu mekânsal dağılım, güneydeki rijit birimlerden kuzeydeki göl kıyısı alüvyonlarına doğru gidildikçe sistematik bir artış izlemektedir. D360 karayolunun kuzeyinde yer alan alüvyon sahalarında periyot değerlerinin ekstrem seviyelere ulaşmasının temel nedeni, bu birimlerin sahip olduğu düşük kayma direnci ve sığ yeraltı suyu varlığıdır. Özellikle düşük kayma dalgası hızlarına (V_s) sahip bu gevşek çökeller, deprem sarsıntısı sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıyla birlikte rijitliklerini kaybetmekte, bu da zemin sisteminin doğal periyodunun belirgin şekilde uzamasına yol açmaktadır. Buna karşın, güney kesimde yüzeylenen kıltaşı karakterli birimlerin yüksek V_s değerleri, sismik enerjinin daha kısa periyotlarda (düşük periyot) yoğunlaşmasına neden olarak bu bölgedeki zeminlerin daha rijit bir dinamik davranış sergilediğini kanıtlamaktadır. Bu veriler, Gölbaşı yerleşim alanında yapılacak yapı tasarımlarında, zemin periyodu ile yapı periyodunun çakışmasını önlemek adına sahaya özel dinamik parametrelerin kullanılmasının kritik önemini doğrulamaktadır.

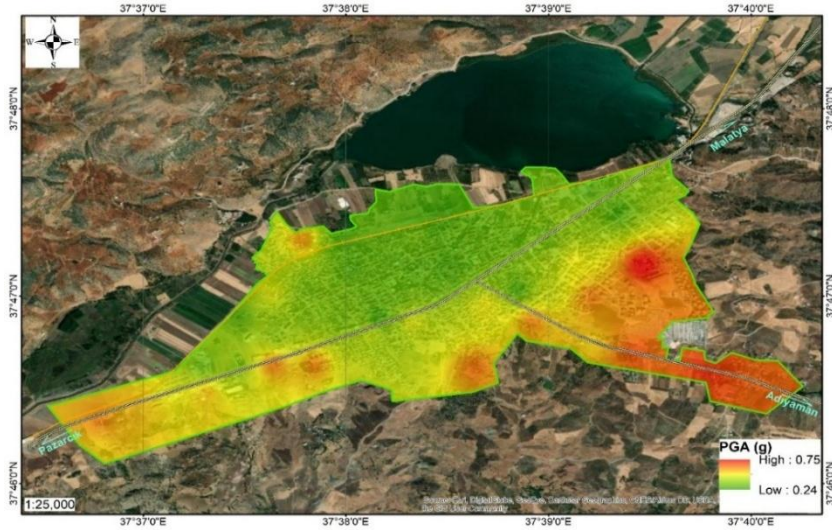


Şekil 8: Gölbaşı yerleşim alanı zeminlerin hâkim periyot dağılım haritası

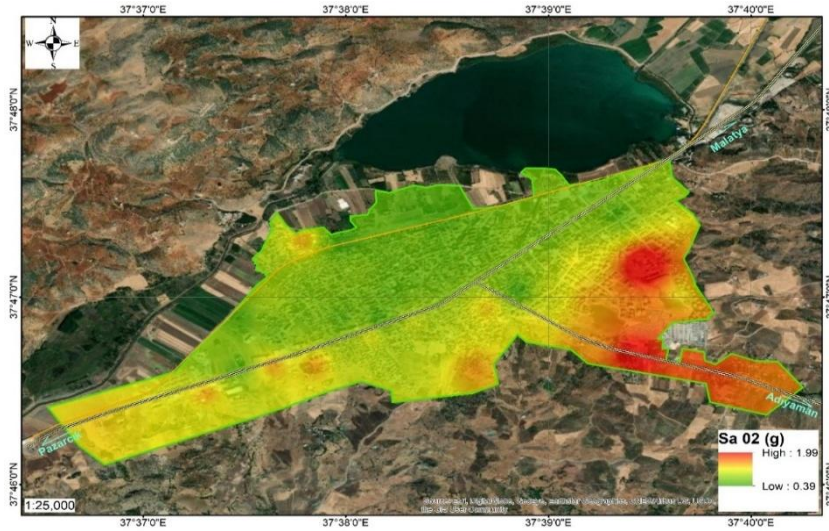
Çalışmada elde edilen PGA dağılım haritası ise Şekil 9’da sunulmuştur. İnceleme alanı genelinde PGA değerlerinin 0,24 g ile 0,75 g arasında değiştiği görülmektedir. Harita incelendiğinde, bölgenin kuzeyinde, göle yakın kesimlerde PGA değerlerinin görece düşük olduğu; buna karşılık güneyinde ise göle daha uzak ve nispeten daha rijit zemin koşullarına sahip alanlarda PGA değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer durum Fercan vd. (2024), tarafından yapılan çalışmada da ortaya konulmuştur. Araştırmacılar gerçekleştirdikleri parametrik analizler sonucunda, düşük rijitliğe sahip zemin koşullarında ($V_{s,30} < 180$ m/s) yüzeyde ölçülen pik ivmelerin belirgin şekilde sönümlendiğini; buna karşın doğrusal olmayan davranışın daha erken geliştiğini ortaya koymuşlardır. Söz konusu çalışmada, zayıf rijitliğe sahip zeminlerin daha hızlı ve daha büyük oranlarda kayma modülü azalımı yaşadığı, bunun da belirgin elastik olmayan şekil değiştirmelere yol açtığı ifade edilmektedir. Bu bağlamda, PGA haritasının kuzey kesimlerinde, özellikle göle yakın bölgelerde 0,24 g’ye kadar düşen PGA değerlerinin, ilgili lokasyonlardaki zeminlerin düşük rijitlik ve yüksek deformasyon kapasitesine sahip olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Deprem sırasında gelişen büyük elastik olmayan şekil değiştirmeler ve buna bağlı enerji sönümleme mekanizmaları, yüzeyde gözlenen pik yer ivmelerinin azalmasına neden olmuş ve sönümleme davranışını ön plana çıkarmıştır. Elde edilen sonuçlar, zayıf ve suya doygun alüvyon zeminlerde doğrusal olmayan zemin davranışının PGA dağılımı üzerindeki belirleyici etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Literatürde, zemin davranış analizlerinden elde edilen maksimum yüzey spektral ivme değerlerinin tek başına haritalanması, ivmelerin baskın olduğu periyot aralıklarını tanımlayamadığı için sınırlı bir bilgi sunmaktadır. Buna karşın, 0,2 s (kısa periyot) ve 1,0 s (uzun periyot) spektral değerleri üzerinden yapılan değerlendirmeler, spektral karakteristiklerin ve olası rezonans risklerinin tanımlanmasında çok daha açıklayıcı bir yaklaşım sergilemektedir (Sönmezer vd. 2018). Analizler neticesinde elde edilen 0,2 saniye periyoduna ait spektral ivme dağılımı haritası Şekil 10’da sunulmuştur. 0,2 s periyodundaki ivme değerlerinin 0,39 g ile 1,99 g arasında geniş bir spektrumda değişim gösterdiği görülmektedir. Özellikle kuzey kesimindeki alüvyon birimlerde kısa periyot ivme değerleri nispeten düşük gözlemlenirken, güney ve güneydoğudaki kıltaşı formasyonlarında spektral ivme değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği

görülmektedir. Bu bulgu, ilgili bölgedeki düşük periyotlu (az katlı ve rijit) yapıların daha yüksek dinamik yüklere maruz kalabileceğine; buna mukabil, periyodu yüksek olan çok katlı yapıların ise zemin-yapı periyot ayrışması nedeniyle daha düşük ivme etkisinde kalacağına işaret etmektedir.

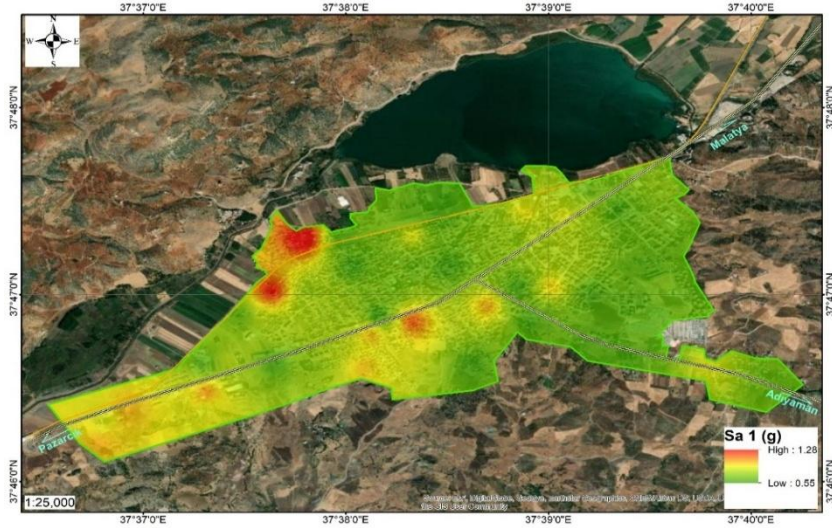


Şekil 9: Gölbaşı yerleşim alanı pik yer ivmesi (PGA) haritası



Şekil 10: Gölbaşı yerleşim alanı 0,2 s periyotlu spektral ivme (Sa02) haritası

1,0 saniye periyoduna ait spektral ivme haritası ise Şekil 11’de verilmiştir. İlgili harita detaylı olarak incelendiğinde; uzun periyot ivme değerlerinin 0,55 g ile 1,28 g arasında bir dağılım sergilediği saptanmıştır. Özellikle kuzeybatı kesimindeki sınırlı bir bölgede ve güney hattının karayoluna komşu bölümlerinde ivme değerlerinin tepe noktasına ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu bulgular, söz konusu bölgelerde yer alan ve dinamik karakteristiği 1,0 s civarında olan yüksek katlı yapıların, zemin büyütmesi ve olası rezonans etkisi nedeniyle şiddetli ivmelere maruz kalacağını göstermektedir. Sismik tasarım ilkeleri ve yapısal güvenlik perspektifinden bakıldığında; yeni planlanacak yerleşimlerde sismik yükleri minimize etmek adına, yapı periyodu ile zemin hâkim periyodunun ayrıştırılması elzemdir. Bu bağlamda, 1,0 s spektral ivmelerinin yüksek olduğu bu bölgelerde, yüksek katlı yapılar yerine düşük periyotlu (yaklaşık 0,2 s) ve az katlı rijit yapıların tercih edilmesi, yapıya etki edecek dinamik kuvvetlerin sınırlandırılmasında etkin bir strateji olacaktır. Sunulan spektral ivme dağılımları (Şekil 10 ve Şekil 11) birlikte değerlendirildiğinde, çalışma alanının sismik mikro bölgeleme açısından heterojen bir karakter sergilediği görülmektedir. 0,2 s (kısa periyot) ve 1,0 s (uzun periyot) spektral ivme değerleri arasındaki bu mekânsal değişim, zemin birimlerinin dinamik karakteristiklerinin yapısal performans üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.



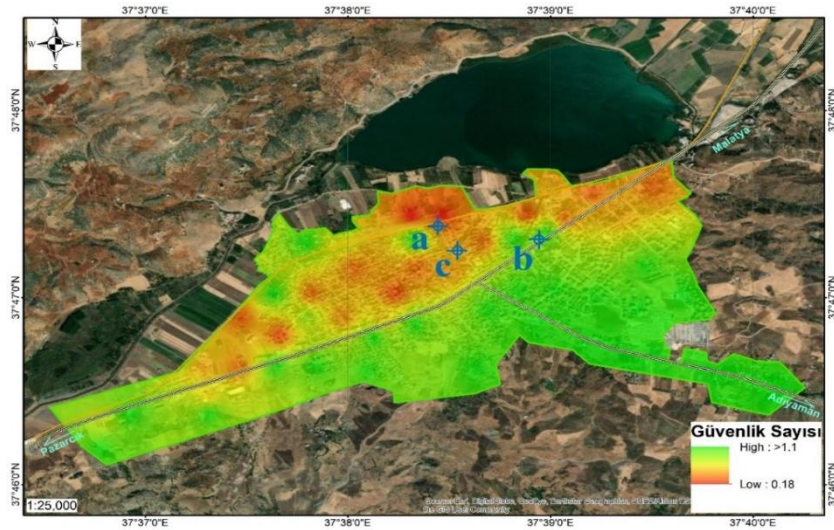
Şekil 11: Gölbaşı yerleşim alanı 1 s periyotlu spektral ivme ($S_a,1$) haritası

Altı Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Gölbaşı ilçesinde gözlemlenen ağır yapısal hasarların mekânsal dağılımı, gerçekleştirilen zemin davranış analizleri ve spektral ivme haritalarıyla yüksek bir korelasyon sergilemektedir. Bölgedeki zemin büyütme oranlarının göl çevresindeki gevşek alüvyon birimlerde 4,65 seviyelerine ulaşması ve zemin hakim periyodunun 6,01 saniye gibi ekstrem değerlere çıkması; sismik enerjinin bu bölgelerde genliğinin artarak üst yapıya aktarıldığını kanıtlamaktadır. Elde edilen bulgular, güney kesimde yüzeylenen rijit birimlerin kısa periyotlu (0,2 s) ivmeleri büyüterek özellikle düşük katlı yapılar için yüksek sismik risk oluşturduğuna işaret etmektedir. Buna karşın, kuzeydeki gevşek alüvyon sahaların uzun periyotlu (1,0 s) ivmeleri artırdığı, bu durumun ise bölgedeki yüksek katlı yapılar üzerinde rezonans etkisi yaratma potansiyeline sahip olduğu saptanmıştır. Bu mekânsal ayrışma, yerel zemin özelliklerinin yapı periyodu ile etkileşime girerek hasar mekanizmalarını nasıl doğrudan şekillendirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.2. Sıvılaşma Analizi Değerlendirmeleri

Sıvılaşma analizleri neticesinde üretilen duyarlılık haritası (Şekil 12) incelendiğinde, sismik riskin mekânsal dağılımının yerel zemin koşulları ve hidrojeolojik parametrelerle doğrudan ilişkili olduğu saptanmıştır. Sıvılaşma potansiyelinin özellikle göl çevresindeki genç alüvyon birimlerde ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu kesimlerde kritik seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Yerleşim biriminin kuzeyinde kalan düşük kotlu arazilerde sıvılaşma riski oldukça yüksek seyrederken; güney kesimlerde, jeolojik formasyonun değişimi ve yeraltı su tablasının derinleşmesine bağlı olarak bazı münferit lokasyonlar haricinde zeminin daha stabil bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan SPT tabanlı sıvılaşma analizleri sonucunda göl kıyısında belirlenen güvenlik sayılarının 0,18 seviyelerine kadar düşmesi, bölgede gözlemlenen kum kaynamaları ve yanal yayılma gibi zemin deformasyonlarının temel nedenini oluşturmaktadır. Elde edilen veriler, [Youd vd. \(2001\)](#) tarafından önerilen “sadeleştirilmiş yöntem” ile ulaşılan sonuçların saha gözlemleriyle büyük ölçüde örtüştüğünü kanıtlamaktadır. Bu korelasyonu somutlaştırmak amacıyla, Şekil 12’deki sıvılaşma duyarlılık haritası üzerinde; kum kaynaması, yapısal devrilme ve oturma gibi sıvılaşma kaynaklı deformasyonların gözlemlendiği noktalar işaretlenmiştir (a, b, c). Bu lokasyonlarda kaydedilen saha gözlemleri ise Şekil 13a, 13b ve 13c kapsamında sunulmuştur. Şekil 13’de verilen saha fotoğraflarının harita üzerindeki konumları tetkik edildiğinde; (a) ve (c) noktalarındaki deformasyonların (kum kaynamaları ve oturmalar), analizlerin öngördüğü yüksek riskli bölgelerle tam uyum sağladığı görülmektedir. Ancak (b) lokasyonu (Kayı Apartmanı), haritada sıvılaşma beklenmeyen bir bölgede yer almasına rağmen deprem sonrası ciddi bir yapısal devrilme sergilemiştir. Analiz sonuçları ile saha verileri arasındaki bu tutarsızlık incelendiğinde; klasik yöntemlere göre sıvılaşma potansiyeli saptanmamasına rağmen ağır hasar alan (b) lokasyonundaki Kayı Apartmanı’nın, killi tabakalarda gelişen çevrimsel yumuşama davranışı nedeniyle deformasyona uğradığı değerlendirilmektedir. Nitekim [Tonyalı vd. \(2024\)](#) tarafından Kayı Apartmanı ve çevresinde yürütülen vaka analizleri, bu öngörüye destekleyen detaylı bilimsel kanıtlar sunmaktadır. Araştırmacıların bölge genelindeki üç farklı lokasyondan topladığı 174 adet zemin örneği ve SPT verileri üzerinde yaptıkları kapsamlı incelemeler, gözlemlenen hasarın klasik bir sıvılaşma olayı olmadığını kesin olarak ortaya koymuştur. Yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda, yapıda meydana gelen devrilmenin killi zeminlerde görülen çevrimsel yumuşama mekanizması neticesinde oluşan mukavemet kaybından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde sıvılaşma beklenmeyen kuzey kesimdeki killi birimlerde yer alan Kayı Apartmanı gibi yapılarda meydana gelen devrilme ve oturmalar, klasik sıvılaşma kriterlerinin kohezyonlu zeminlerdeki kısıtlılığını ortaya koymuştur. Sismik yükler altında “çevrimsel yumuşama” yaşayan killerin kayma mukavemetindeki ani düşüş,

taşıma gücü kaybına yol açarak yapısal stabiliteyi bozmaktadır. Bu bulgu, bölgedeki benzer nitelikteki kohezyonlu zeminlerin, sıvılaşma potansiyeli olmasa dahi sismik sarsıntı sırasında büyük plastik deformasyonlar üretebileceğini ve bu durumun mikro bölgeleme çalışmalarında mutlaka dikkate alınması gerektiğini kanıtlamaktadır. Bu durum, kohezyonlu zeminlerin hâkim olduğu bölgelerde sismik güvenlik değerlendirmesi yapılırken sadece klasik sıvılaşma kriterlerinin değil, çevrimsel yumuşama potansiyelinin de mutlaka analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 12: Gölbaşı yerleşim alanı için zemin sıvılaşma potansiyeli haritası

Zemin davranış analizlerinden elde edilen sonuçlar ile sıvılaşma potansiyeli haritası birlikte değerlendirildiğinde inceleme alanında özellikle kuzey kesimde yer alan alüvyon birimlerde, sismik aktivite sırasında zemin davranışının doğrusal olmayan bir karakter sergilediği ve sıvılaşma ihtimalinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum mikro bölgeleme kriterleri çerçevesinde değerlendirildiğinde; depreme dayanıklı planlama sürecinde “tek tip” bir yaklaşım yerine, zemin periyodu ile yapı periyodunun çakışmasını önleyen bölgeye özel tasarım stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Elde edilen tüm bu veriler, Gölbaşı özelindeki yıkıcı etkinin sadece depremin büyüklüğü ile değil, zemin-yapı etkileşimindeki bu karmaşık dinamik süreçlerle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 13: Gölbaşı ilçesinde; a) Sıvılaşma nedeniyle oluşan kum kaynamaları ($37^{\circ}.47'.23.29''K$ / $37^{\circ}.38'.27.30''D$), b) Çevrimsel yumuşama sonucunda taşıma gücü kaybı sebebiyle yapıda (Kayı Apt.) oluşan devrilme ($37^{\circ}.47'.17.57''K$ - $37^{\circ}.38'.55''D$) c) Sıvılaşma nedeniyle yapıda meydana gelen oturma ($37^{\circ}.47'.15.20''K$ - $37^{\circ}.38'.31.73''D$)

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden (M_w : 7.7 ve M_w : 7.6) en ağır etkilenen bölgelerden biri olan Gölbaşı (Adıyaman) ilçesinin dinamik zemin davranışı ve sıvılaşma potansiyeli, saha verilerine dayalı analizler ve yerinde gözlemlerle bütüncül bir şekilde değerlendirilmiştir. SPT tabanlı analizler sonucunda üretilen sıvılaşma

duyarlılık haritası, sismik riskin özellikle Gölbaşı Gölü çevresindeki Kuvaterner yaşlı, gevşek ve suya doygun alüvyon birimlerde yoğunlaştığını açıkça ortaya koymuştur. İnceleme alanındaki güvenlik sayılarının (FS_1) 0,18 seviyelerine kadar düşmesi, deprem sonrası sahada gözlemlenen yaygın kum kaynakmaları ve yanal yayılma deformasyonlarının temel mühendislik gerekçesini oluşturmaktadır. Çalışma alanının kuzey kesimi yüksek riskli alanları temsil ederken, güney kesimlerin jeolojik formasyonun değişimi ve yeraltı su tablasının derinleşmesine bağlı olarak bazı münferit lokasyonlar haricinde daha stabil bir karakter sergilediği saptanmıştır.

Gerçekleştirilen dinamik analizler, zemin büyütme oranlarının yalnızca yüzeysel jeolojiyle değil tabakalı zemin yapısının dinamik tepkisiyle doğrudan ilişkili olduğunu kanıtlamıştır. Zemin büyütme katsayılarının güneyden kuzeye doğru 1,34'ten 4,65 seviyelerine kadar yükselmesi ve gevşek alüvyon sahalarda zemin hâkim periyodunun 6,01 saniye gibi ekstrem değerlere ulaşması, sismik enerjinin bu bölgelerde genliğinin artarak üst yapıya aktarıldığını doğrulamaktadır. Ayrıca, göle yakın kesimlerde saptanan görece düşük PGA (0,24 g) değerlerinin, bu lokasyonlardaki zayıf rijitliğe sahip zeminlerin deprem sırasında sergilediği şiddetli doğrusal olmayan davranıştan ve enerji sönümleme mekanizmalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, klasik sıvılaşma analizlerine göre güvenli bölgede yer almasına rağmen ağır hasar alan lokasyonlarda (örn. Kayı Apartmanı), killi zeminlerin sismik yükler altında “çevrimsel yumuşama” mekanizması ile mukavemet kaybı yaşadığının saptanmasıdır. Bu durum, kohezyonlu zeminlerin bulunduğu alanlarda sismik güvenlik değerlendirmesi yapılırken standart sıvılaşma kriterlerinin ötesine geçilerek çevrimsel yumuşama potansiyelinin de mutlaka analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak elde edilen tüm veriler, Gölbaşı’ndaki yıkıcı etkinin sadece depremin büyüklüğüyle değil, yerel zemin koşullarının sismik dalgaları büyütme ve karakter değiştirme özelliğiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, gelecekteki imar planlamalarında “tek tip” tasarım yaklaşımları yerine; zemin periyodu ile yapı periyodunun çakışmasını önleyen, sahaya özel dinamik parametreleri esas alan mikro bölgeleme stratejilerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1002-C Doğal Afetler Odaklı Saha Çalışması Acil Destek Programı tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 123D029).

Kaynaklar

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2013). Update of the AS08 ground-motion prediction equations based on the NGA-West2 data set. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- AFAD, (2023). 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7–Mw: 7.6) depremleri raporu. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaraş_Depremi_Raporu_02.06.2023.pdf
- AFAD, (2024). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr>
- Akıl, B., Akpınar, K., Üçkardeşler, C., Araz, H., Sağlam, M., & 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), 43-57.
- Aktaş, Y. D., So, E., Johnson, C., Dönmez, K., Özden, A. T., Vatteri, A. P., O’Kane, A., Kalkan, A., Andonov, A., Verrucci, E., Çabuk, E., Opabola, E., Malcıoğlu, F. S., Marko, H. P., Giardina, G., Madabhushi, G., Triantafyllou, I., Byun, J. E., Jones, J. N., Asinari, M., Free, M., Bashein, M., Bektaş, N., Adamidis, O., Gözenoğlu, Ö., Milillo, P., Dede, Ş., Boulton, S. J., Açıkgoz, S., Gökçe, T., Efeoglu, T., Tetik, T., Novelli, V., Gonnuru, P., Voelker, B., Tavakkoli, A., Macchiarulo, V., Gutierrez-Urzu, F., Freddi, F. & Rossetto, T. (2024). The Türkiye Earthquake Sequence of February 2023: A Longitudinal Study Report by EEFIT. Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT), Institution of Structural Engineers (IStructE). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15906.40641>
- Belvaux, M., Meza-Fajardo, K., Abad, J., Bertil, D., Roullé, A., Muñoz, S., & Prépetit, C. (2018). Combined geophysical and geotechnical approaches for microzonation studies in Hispaniola Island. *Geosciences*, 8(9), 336. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090336>
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2007). Evaluation of cyclic softening in silts and clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 641-652. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(641\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(641))
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2013). NGA-West2 equations for predicting response spectral accelerations for shallow crustal earthquakes. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley.
- Bozbey, İ., Keleşoğlu, M. K., Öztoprak, S., Altınok, E., Sarğın, S., Öser, C., & Tütüncü, Y. E. (2024). Adıyaman Gölbaşı Alüvyon Havzasındaki Yüzeysel Temelli Binalarda 6 Şubat 2023 Depremlerinde Oluşan Deformasyonların İncelenmesi. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı, Ankara, Türkiye, 16 - 18 Ekim 2024
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2013). NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Cetin, K.O., Moug, D., Soylemez, B., Ayhan, B.U., Zarzour, M., Suhaily, A.A., Akil, B., Unutmaz, B., Firat, S., Tekin, E., Cakir, E., Frost, D., Macedo, J., Bray, J., Moss, R., Bassal, P., Gurbuz, A., Işık, N.S., Akin, M., Sahin, A. and Duman, E. (2025), Ground failures and foundation performances in Adıyaman–Gölbaşı following the 6 February 2023 Kahramanmaraş–Türkiye Earthquake Sequence. *Earthquake Spectra*, 41, 249-289. <https://doi.org/10.1177/87552930241270581>
- Das, A., & Chakraborty, P. (2020). Influence of motion energy and soil characteristics on seismic ground response of layered soil. *International Journal of Civil Engineering*, 18(7), 763-782. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00496-6>

- Fercan, N. Ö., Şafak, E., & Ansal, A. (2024). Characterization of Site Amplification by a Parametric Study. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(8), 2134-2157. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2277833>
- Flora, A., Bilotta, E., Valtucci, F., Fierro, T., Perez, R., de Magistris, F. S., Modoni, G., Spacagna, R., Kelesoglu, M. K., Sargin, S., Altinok, E., Oztoprak, S., Bozbey, I., Aysal, N. (2024). Liquefaction effects in the city of Gölbaşı: from the analysis of predisposing factors to damage survey. *Engineering Geology*, 338, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107633>
- Hashash Y.M.A., Musgrove M.I., Harmon J.A., Ilhan O., Groholski D.R., Phillips C.A., Park D. (2017). DEEPSOIL 7.0, User Manual.
- Hashash, Y. M. A., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2010). Recent advances in nonlinear site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(4), 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.11.007>
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
- İmamoğlu, M. Ş., & Gökten, E. (1996). Doğu Anadolu fay zoneu Gölbaşı kesimi neotektonik özellikleri ve Gölbaşı-Saray fay kaması havzası. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 11, 176-184.
- Kılıçer, S., & Özgan, K. (2018). Deprem yükü etkisindeki betonarme yapıların tasarımında yapı-zemin etkileşiminin incelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.21324/dacd.342462>
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.
- MTA, 2024. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Özgan, K., Daloğlu, A. T., & Karakaş, A. İ. (2013). A parametric study for thick plates resting on elastic foundation with variable soil depth. *Archive of Applied Mechanics*, 83(4), 549–558. <https://doi.org/10.1007/s00419-012-0703-8>
- Özgan, K., Kılıçer, S., Daloğlu, A. T., & Karakaş, A. İ. (2016). Yapı zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(53), 139–152.
- PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), <https://peer.berkeley.edu/>
- Sandıkçıoğlu, M., Uzun, A., Sol, B., & Sabancı, S. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Gölbaşı Havzası'nda Sebep Olduğu Yüzey Deformasyonları ve Yerleşmeler Üzerindeki Etkileri, Adıyaman/Türkiye. *Türk Coğrafya Dergisi*, 83, 87-99. <https://doi.org/10.17211/tcd.1342050>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1967). Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(3), 83-108.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. Technical Report EERRC-70-10, Berkeley, CA: University of California.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of geotechnical engineering*, 109(3), 458-482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(458))
- Sitharam, T. G., & Anbazhagan, P. (2007). Seismic hazard analysis for the Bangalore region. *Natural Hazards*, 40(2), 261-278. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0012-z>
- Sönmezer, Y. B. (2016). *Kırıkkale Şehir Merkezinin Deprem Risk Analizi ve Sismik Mikrobölgelemesi*. [Doktora Tezi. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>.
- Sönmezer, Y.B., Çeliker, M., Kılınc, M. Y., (2012). Kırıkkale İli Bahçelievler ve Fabrikalar Mahallelerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(1), 33-40.
- Sonmezer, Y. B., Bas, S., Isik, N. S., & Akbas, S. O. (2018). Linear and nonlinear site response analyses to determine dynamic soil properties of Kırıkkale. *Geomechanics and Engineering*, 16(4), 435-448. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.4.435>
- Sonmezer Y.B., Celiker M., Bas S., (2019). An investigation on the evaluation of dynamic soil characteristics of the Elazığ City through the 1-D equivalent linear site-response analysis. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 78(7), 4689-4712. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-01450-6>
- Stark, T. D., & Olson, S. M. (1995). Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of geotechnical engineering*, 121(12), 856-869. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:12\(856\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(856))
- TADAS, 2024. Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. <https://tadas.afad.gov.tr>
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-bina-deprem-yonetmeliği>
- Tonyalı, İ., Akbas, S. O., Beyaz, T., Kayabalı, K., & Gokceoglu, C. (2024). Case study of a foundation failure induced by cyclic softening of clay during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. *Engineering Geology*, 332, 107477. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107477>
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1988). Degradation of marine clays under cyclic loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(2), 133-149. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:2\(133\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(133))
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, K. H. (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(10), 817–833. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))
- Zeybek, A., Yıldız, Ö. & Sönmezer, Y. B. (2025). Post-earthquake assessment of liquefaction in Gölbaşı-Adıyaman following the 6 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes: field observations, SPT-based analysis, and laboratory testing of soil ejecta. *Nat Hazards*, 121, 24157–24206. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07715-0>