DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYİNİN SIVILAŞMA ANALİZİNE ETKİSİ

EFFECT OF SEISMIC GROUND MOTION LEVELS ON LIQUEFACTION ASSESSMENT

Tansu ORHAN[1], Sami ARSOY[2]

ÖZET

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremleri, geniş bir bölgede önemli zemin davranışı problemlerine ve yer yer sıvılaşma oluşumuna neden olmuştur. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 kapsamında sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde, kısa periyot spektral ivme katsayısının belirlenmesi için deprem yer hareketi düzeyinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Kahramanmaraş ili için elde edilen üç adet SPT sondaj verisi kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, Kahramanmaraş (Pazarcık) depremi için deprem tekrarlanma olasılığının değerlendirilmesi ve TBDY 2018'de tanımlanan farklı deprem yer hareketi düzeylerinin sıvılaşma değerlendirmeleri üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Bu kapsamda farklı deprem yer hareketi düzeyleri için elde edilen tasarım spektral ivme değerleri kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Sahaya olan yakınlığı dikkate alınarak belirlenen 13 istasyona ait deprem kayıtları kullanılarak Pazarcık depremi etkisindeki sıvılaşma davranışı ayrıca değerlendirilmiştir. Farklı deprem yer hareketi düzeyleri kullanılarak gerçekleştirilen sıvılaşma analizleri ile Pazarcık depremine ait ivme kayıtlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, gerçek deprem kayıtlarından elde edilen sıvılaşma taleplerinin tek bir deprem yer hareketi düzeyi ile temsil edilmesinin sınırlı kalabileceğini ve deprem yer hareketi düzeyi seçiminin sıvılaşma değerlendirmelerini önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermektedir. Çalışma, sıvılaşma analizlerinde kullanılan spektral ivme değerinin ve buna bağlı deprem yer hareketi düzeyinin belirlenmesinin önemine işaret etmektedir.
Anahtar Kelimeler: *Sıvılaşma, Deprem Yer Hareketi Düzeyi, TBDY 2018, Kahramanmaraş*

ABSTRACT

The Kahramanmaraş earthquakes that occurred on 6 February 2023 caused significant geotechnical problems over a wide region and triggered liquefaction in several locations. Within the framework of the Turkish Building Earthquake Code 2018, the determination of the seismic ground motion level is required to define the short-period design spectral acceleration coefficient used in liquefaction potential assessments. In this study, liquefaction analyses were performed using three SPT borehole datasets obtained from Kahramanmaraş Province. The main objective of the study is to evaluate the earthquake recurrence probability for the Kahramanmaraş (Pazarcık) earthquake and to investigate the effects of different seismic ground motion levels defined in TBDY 2018 on liquefaction assessments. In this context, liquefaction analyses were carried out using the design spectral acceleration values obtained for different seismic ground motion levels. Additionally, earthquake records obtained from 13 stations selected based on their proximity to the study area were used to evaluate the liquefaction response under the Pazarcık earthquake. The results obtained from liquefaction analyses performed for different seismic ground motion levels were compared with those derived from the acceleration records of the Pazarcık earthquake. The results indicate that the liquefaction demands obtained from actual earthquake records may not be adequately represented by a single seismic ground motion level and that the selection of the seismic ground motion level can significantly influence liquefaction assessments. The study highlights the importance of determining the spectral acceleration value and the corresponding seismic ground motion level used in liquefaction analyses.
Keywords: *Liquefaction, Ground Motion Level, TBDY 2018, Kahramanmaraş*

[1] Araştırma Görevlisi, Kocaeli Üniversitesi, tansu.emiroglu@kocaeli.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Profesör, Kocaeli Üniversitesi, sarsoy@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan, sınırları içerisinde Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı ve Batı Anadolu Fayı başta olmak üzere birçok aktif tektonik yapıyı barındıran, deprem tehlikesi yüksek bir ülkedir. Ülke genelinde aletsel dönemde meydana gelen 1939 Erzincan (M_w=7.9), 1999 Kocaeli (M_w=7.4), 2011 Van (M_w=7.2), 2020 Elazığ (M_w=6.8) ve İzmir (M_w=6.6) depremleri, büyük yıkıma yol açan ve bölgenin karşı karşıya kaldığı sismik tehlikeyi ortaya koyan önemli depremlerdir (URL-1). 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen 11 ilde yapılan araştırmalar, mevcut bina stoğunun %49.8'inin hasar gördüğünü göstermektedir (Kahramanmaraş ve Hatay Deprem Raporu, 2023).

Depremler sonucunda meydana gelen can ve mal kayıplarında, yapı sistemlerinde oluşan hasarların yanı sıra zeminlerde gelişen çeşitli yenilme mekanizmaları da önemli bir rol oynamaktadır. Bazı durumlarda, yapı sistemlerinde belirgin bir yapısal hasar gözlenmemesine karşın, deprem etkisi altında gelişen sıvılaşma, aşırı oturma ve taşıma gücü kaybı gibi geoteknik yenilme mekanizmaları ciddi mühendislik problemlerine neden olabilmektedir. Zemin sıvılaşması, çevrimsel yüklemeye maruz kalan doygun, düşük kohezyonlu ve gevşek kum ve siltli zeminlerde gözlenen bir yenilme türüdür. Bu zemin türlerinde yükleme genellikle drenajsız koşullar altında gerçekleştiğinden, zemin bünyesinde oluşan artık boşluk suyu basıncı yeterince sönümlenememekte ve zamanla birikmektedir. Deprem süresince devam eden bu artış efektif gerilmenin azalmasına sebep olur. Zeminlerde efektif gerilmenin sıfıra yaklaşması zemin iskeletinin taşıyıcılığını kaybettiği kritik durumu ifade etmekte olup sıvılaşma olgusunun gerçekleştiğini ifade eder.

Deprem mühendisliği uygulamalarında, yapıların farklı büyüklükteki deprem etkileri altındaki performanslarının güvenilir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla farklı deprem düzeyleri tanımlanmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında deprem yer hareketi düzeyleri; aşılma olasılıkları ve dönüş periyotları esas alınarak DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 olmak üzere dört farklı seviyede tanımlanmıştır. Bu deprem düzeyleri, deprem tehlikesinin olasılıksal olarak temsil edilmesini sağlamakta ve yapıların hedef performans düzeylerinin belirlenmesinde esas alınmaktadır. Deprem düzeyinin seçimi yer hareketinin şiddeti ve buna bağlı olarak zeminlerde oluşan çevrimsel gerilmelerin büyüklüğünü belirlemektedir. Bu durum özellikle sıvılaşma, aşırı oturma ve taşıma gücü kaybı gibi geoteknik problemlerin meydana gelme olasılığını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle, deprem düzeyinin doğru şekilde belirlenmesi hem yapısal tasarım hem de geoteknik değerlendirmeler açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın temel amacı, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi için deprem tekrarlanma olasılığını değerlendirmek ve TBDY-2018'de tanımlanan farklı deprem yer hareketi düzeylerinin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine etkisini incelemektir. Bu kapsamda, Kahramanmaraş ilinden elde edilen üç adet SPT sondaj verisi kullanılarak TBDY-2018'de tanımlanan farklı deprem yer hareketi düzeylerine karşılık gelen tasarım spektral ivme değerleri belirlenmiş ve bu ivme düzeyleri esas alınarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sahaya yakın istasyonlardan seçilen Pazarcık depremine ait kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçları ile deprem yer hareketi düzeylerine bağlı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde, farklı deprem yer hareketi düzeyleri ile gerçek kuvvetli yer hareketi kayıtlarından elde edilen sıvılaşma talepleri arasındaki değişim incelenmiş ve deprem düzeyi seçiminin sıvılaşma değerlendirmeleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Sahası

Kahramanmaraş ili yaklaşık olarak 600 km uzunluğunda sol yönlü doğrultu atımlı bir fay olan Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde yer almaktadır (Biricik vd., 2001). Çalışma sahası olarak seçilen Dulkadiroğlu ilçesi, Pazarcık depremi merkezüssüne yaklaşık olarak 34 km mesafede bulunan bir yerleşim alanıdır. Bölgede yer altı suyu seviyesinin yüksek olması ve alüvyal zeminlerin geniş alanlara yayılması, çalışma sahasının sıvılaşma potansiyeli açısından elverişli koşullara sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma sahasında sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için 3 adet SPT sondaj logu seçilmiştir (Güler, 2024). Seçilen sondaj loglarının tamamında yer altı suyu seviyesi zemin yüzeyinde olup, sondajlar 20 m derinliğe kadar gerçekleştirilmiştir (Tablo 1). Bu çalışmada zemin tabakaları ince dane oranı (İDO) esas alınarak sınıflandırılmıştır. Bununla birlikte, İDO'nun tek başına sıvılaşma yatkınlığını belirlemek için yeterli olmadığı ve özellikle ince daneli zeminlerde likit limit ve plastisite indisi gibi kıvam özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği bilinmektedir (Bray ve Sancio, 2006; Boulanger ve Idriss, 2006). Mevcut sondaj verilerinde kıvam limitlerinin bulunmaması ve kullanılan Seed ve Idriss (1971) tabanlı yaklaşımın esas olarak kumlu zeminler için geliştirilmiş olması nedeniyle, sıvılaşma analizleri İDO <%50 olan tabakalarla sınırlandırılmıştır. Sıvılaşmaya yatkın tabakalar Lu (Liquefiable) olarak isimlendirilirken, sıvılaşma potansiyeli olmayan zemin tabakaları NLu (Non-Liquefiable) olarak isimlendirilmiştir. Sıvılaşma analizleri, her üç zemin profilinde de yalnızca Lu tabakalar için gerçekleştirilmiştir. BH-4, BH-5 ve BH-6 sondajlarında derinlik boyunca verilen SPT-N değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Söz konusu değerler veri kaynağından doğrudan alınmış olup, sondajlar arasındaki zemin özelliklerindeki farklılıklar ince dane oranı ve zemin sınıflarında gözlenmektedir (Güler, 2024).

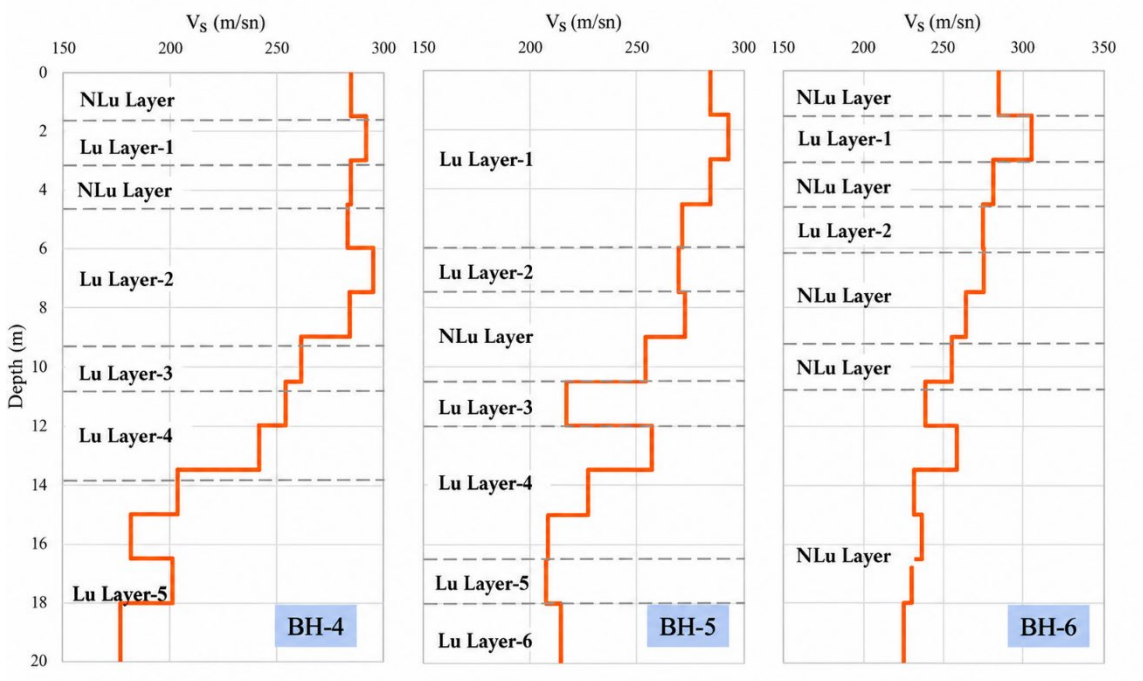
Tablo 1. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan sondaj logları

z	SPT-BH 4			SPT-BH 5			SPT-BH 6		
(m)	N	Durum	İDO (%)	N	Durum	İDO (%)	N	Durum	İDO (%)
1.5	11	NLu	97.10	11	NLu	56.26	11	NLu	75.60
3.0	13	Lu	24.56	13	Lu	25.50	13	Lu	49.50
4.5	11	NLu	58.98	11	NLu	68.90	11	NLu	80.75
6.0	12	Lu	25.40	12	Lu	30.30	12	Lu	31.80
7.5	13	NLu	61.00	13	Lu	31.90	13	NLu	63.14
9.0	13	NLu	81.90	13	NLu	51.59	13	NLu	63.04
10.5	13	Lu	28.28	13	NLu	60.10	13	NLu	64.60
12.0	12	NLu	57.89	12	Lu	19.22	12	NLu	69.40
13.5	14	Lu	20.67	14	Lu	37.03	14	NLu	62.14
15.0	11	Lu	15.45	11	Lu	32.11	11	NLu	83.55
16.5	12	Lu	7.45	12	Lu	15.78	12	NLu	71.02
18.0	13	Lu	13.29	13	Lu	17.08	13	NLu	89.62
20.0	13	Lu	7.7	13	Lu	23.59	13	NLu	87.77

Bu çalışmada, zemin tepki analizlerinde kullanılmak üzere zemin profillerine ait kayma dalgası hızları, İyisan (1996) tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak derinlik boyunca tahmin edilmiştir (Şekil 1). Söz konusu bağıntı, Kahramanmaraş iline yakın konumda bulunan Erzincan ilinden elde edilen SPT verileri üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizine dayanmakta olup, bölgenin jeolojik özellikleri ile uyumlu olması

nedeniyle tercih edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında, Tablo 2'de sunulan SPT darbe sayılarına gerekli düzeltmeler uygulanarak düzeltilmiş darbe sayıları elde edilmiş ($N_{1,60}$), ardından bu değerler kullanılarak üç zemin profili için derinlik boyunca kayma dalgası hızları tahmin edilmiştir.

$$V_S = 51.5\ N_{1,60}^{0.516}\ (m/s) \quad (1)$$



Şekil 1. SPT logları kullanılarak tahmin edilen kayma dalgası hızı profilleri

2.2. Kuvvetli Yer Hareketlerinin Seçimi

Sismik yüklemenin genlik, süre ve frekans içeriği gibi karakteristik özellikleri sıvılaşma olgusunun gerçekleşmesinde belirleyicidir. Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremine ait ivme kayıtları kullanılmıştır. İlk deprem, Pazarcık'ta merkezüssü, 7.7 moment büyüklüğü ve 8.6 km hiposantral derinliği ile 04:17'de meydana gelmiştir. Yaklaşık dokuz saat sonra, 13:24'te, Elbistan'da merkez üssü, 7.6 moment büyüklüğü ve 7 km hiposantral derinliği ile ikinci büyük bir olay meydana gelmiştir. Deprem sırasında zemin profillerine etki eden ivmenin gerçekçi bir simülasyonunu elde etmek için, çalışma alanına yakın konumdaki istasyonlardan alınan kayıtlar seçilmiştir. Sıvılaşma analizlerinde kullanılmak üzere seçilen sondaj logları ve deprem istasyonlarının konumları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışma sahası ve istasyonların konumları

Analizlerde kullanılmak üzere seçilen 13 istasyondan alınan Kahramanmaraş-Pazarcık depremine ait ivme-zaman kayıtlarına ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan ivme kayıtları

İstasyon	R_{epi} (km)	PGA (cm/sn^2)		
		N-S	E-W	U-D
4625	28.40	448.82	486.75	367.89
4624	29.73	362.64	320.69	164.59
4620	35.48	300.40	320.93	185.34
4621	35.42	359.65	276.85	202.95
4617	38.04	145.33	115.16	110.59
4618	37.84	125.66	159.42	134.42
4619	36.73	302.03	194.74	175.51
4616	20.54	654.08	506.17	396.96
2714	55.92	150.264	109.31	88.183
4615	13.83	582.31	583.70	663.60
4629	22.50	349.34	268.00	133.21
4630	21.89	201.92	137.73	193.86
NAR	15.35	784.57	619.71	477.94

2.3. Deprem Tekrarlanma Olasılığının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Gutenberg–Richter bağıntısı ve Poisson modeli kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirme, $M_w \geq 7.7$ büyüklüğündeki depremlerin tekrarlanma olasılığının belirlenmesine yönelik olup, belirli bir sahadaki yer hareketi parametrelerinin aşılma olasılığını hesaplayan kapsamlı bir olasılıksal sismik tehlike analizi (PSHA) niteliğinde değildir. Benzer şekilde, TBDY-2018'de tanımlanan deprem yer hareketi düzeylerinin dönüş periyotları deprem büyüklüğüne değil, belirli bir sahadaki yer hareketinin aşılma olasılığına karşılık gelmektedir.

Yapıların sismik tasarımında dikkate alınması gereken deprem yer hareketi seviyelerinin tanımları TBDY-2018'de belirtilmiştir. Dört farklı deprem yer hareketi seviyesine karşılık gelen deprem yer hareketi parametreleri, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu tanımlar, 50 yıllık bir süre içinde spektral niceliklerin aşılma olasılığına dayanmaktadır. TBDY-2018'de tanımlanan deprem yer hareketi seviyelerinin özellikleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. TBDY-2018'de tanımlanan Deprem Yer Hareketi Düzeyleri

Deprem Düzeyi	Tanım	Periyot (t, yıl)	Poisson Aşılma Olasılığı (%)	Dönüş Periyodu (T_R, yıl)
DD-1	Çok seyrek	50	2	2475
DD-2	Seyrek	50	10	475
DD-3	Sık	50	50	72
DD-4	Çok sık	50	68	43

Bu çalışmada, Kahramanmaraş-Pazarcık depremini temsil eden güçlü bir yer hareketinin yıllık ortalama aşılma oranı, standart Gutenberg-Richter tekrarlama yasası kullanılarak tahmin edilmiştir (Bayrak vd., 2009). Kahramanmaraş ili ve çevresi için özel olarak yapılan sismik tehlike analizinde, a ve b parametreleri sırasıyla 4.06 ve 0.96 olarak belirlenmiştir . Depremlerin zamansal oluşumunu tanımlamak için en yaygın olarak benimsenen modellerden biri Poisson modelidir. Bu model, belirli bir zaman aralığında belirli bir olayın meydana gelme sayısının olasılık dağılımını bir Poisson süreci aracılığıyla tanımlayarak sismik olayların olasılıksal değerlendirmesine olanak tanır. Standart Gutenberg-Richter tekrarlama yasası kullanılarak hesaplanan yıllık aşılma oranı Poisson modeliyle birleştirilerek, t zaman aralığında 7.7 büyüklüğünde bir depremin aşılma olasılığı hesaplanmıştır (Gutenberg vd., 1944).

$$\log\lambda_M = a - bM \tag{2}$$

$$P[N\geq 1] = 1 - e^{-(\lambda t)} \tag{3}$$

Bu değerlendirme ile Mw≥7.7 büyüklüğündeki depremlerin tekrarlanma olasılığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, elde edilen tekrarlanma olasılığı TBDY-2018'de tanımlanan deprem yer hareketi düzeyleriyle doğrudan ilişkilendirilmemiş; farklı deprem yer hareketi düzeylerinin sıvılaşma değerlendirmelerine etkisi ayrı olarak incelenmiştir. Bu nedenle, seçilen şiddetli yer hareketini sismik yönetmelik çerçevesinde temsil etmek amacıyla, her iki deprem yer hareketi seviyesi için analitik çözümler gerçekleştirilmiştir. Farklı deprem yer hareketi düzeyleri esas alınarak gerçekleştirilen sıvılaşma analizleri ile gerçek deprem kayıtları kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve deprem düzeyi seçiminin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Zemin profillerine ait ortalama kayma dalgası hızları ($V_{S,ort}$), TBDY-2018'de belirtilen esaslar doğrultusunda hesaplanmıştır. BH-4, BH-5 ve BH-6 zemin profilleri için elde edilen ($V_{S,ort}$) değerleri sırasıyla 239.24 m/s, 246.17 m/s ve 255.55 m/s olup, bu değerlere göre her üç zemin profili de ZD yerel zemin sınıfında değerlendirilmiştir. Çalışma sahasına ait koordinatlar kullanılarak TBDY-2018 Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinden yerel zemin sınıfı ZD için kısa periyot tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS}) belirlenmiştir. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan deprem yer hareketi düzeylerine ait S_{DS} değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çalışma sahasına ait tasarım deprem parametreleri

Genel Bilgiler	Enlem: 37.575555º Boylam: 36.93051º Yerel Zemin Sınıfı: ZD
Deprem Tasarım Düzeyi	**Kısa Periyot Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})**
DD-1	1.733
DD-2	1.035
DD-3	0.499
DD-4	0.354

2.4. Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde Standard Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerine dayalı basitleştirilmiş bir analiz yöntemini esas almaktadır. Basitleştirilmiş yöntem 3 aşamadan oluşmaktadır: (i) çevrimsel kayma dayanımının (CRR) hesaplanması, (ii) maksimum çevrimsel kayma gerilmesinin (CSR) hesaplanması, (iii) sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (FS) tahmin edilmesi (Seed vd., 1971).

Çevrimsel kayma dayanımının hesaplanmasında kullanılan ham SPT darbe sayıları, TBDY-2018'de önerilen prosedür doğrultusunda enerji (C_E), kuyu çapı (C_B), tij uzunluğu (C_R), numune alıcı tipi (C_S) ve jeolojik gerilme (C_N) düzeltmeleri uygulanarak normalize edilmiştir. Ardından ince dane içeriği dikkate alınarak eşdeğer temiz kum darbe sayısı ($N_{1,60f}$) elde edilmiş ve çevrimsel kayma dayanımı (CRR), TBDY 2018'de verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Düzeltme katsayılarının hesaplanmasına ilişkin ayrıntılara burada yer verilmemiş olup ilgili prosedür için TBDY 2018'e başvurulabilir. Normalize edilmiş eşdeğer temiz kum darbe sayısı kullanılarak, 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için çevrimsel kayma dayanımı Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan $CRR_{M=7.5}$ değeri, deprem büyüklüğünü dikkate alan büyüklük düzeltme katsayısı (C_M) kullanılarak çalışma depremine uyarlanmıştır.

$$CRR_{M=7.5}=\frac{1}{34-N_{1,60f}}+\frac{N_{1,60f}}{135}+\frac{50}{[10N_{1,60f}+45]^2}-\frac{1}{200}$$

$$CRR=CRR_{M=7.5}C_M \quad (4)$$

$$C_M=10^{2.24}/M_w^{2.56}$$

Basitleştirilmiş yöntemin ikinci aşamasında, deprem sırasında zemin içerisinde oluşan maksimum çevrimsel gerilme oranı (CSR) hesaplanmaktadır. CSR, deprem yer hareketi düzeyi, zeminin toplam ve efektif düşey gerilmeleri ile gerilme azaltma katsayısı dikkate alınarak belirlenmektedir. TBDY-2018 kapsamında CSR hesabında kullanılan deprem yükü, seçilen deprem yer hareketi düzeyine karşılık gelen kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ile tanımlanmaktadır. Bu nedenle deprem yer hareketi düzeyinin seçimi, CSR değerini ve dolayısıyla sıvılaşma analizinin sonucunu doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada CSR değerleri, sıvılaşmaya yatkın (Lu) olarak sınıflandırılan zemin tabakaları için Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada r_d, deprem etkisiyle oluşan kayma gerilmelerinin derinlikle azalmasını temsil eden gerilme azaltma katsayısıdır. r_d'nin hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar TBDY-2018'de sunulmaktadır.

$$CSR=0.65\left(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0}\right)(0.4\,S_{DS})\,r_d \quad (5)$$

Basitleştirilmiş yöntemin son aşamasında sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı, her tabaka için ($FS_{Liq}=CRR/CSR$) hesaplanmıştır. TBDY-2018'e göre güvenlik sayısının 1.10'un altında olması, ilgili tabakanın sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

2.5. Dinamik Analizler

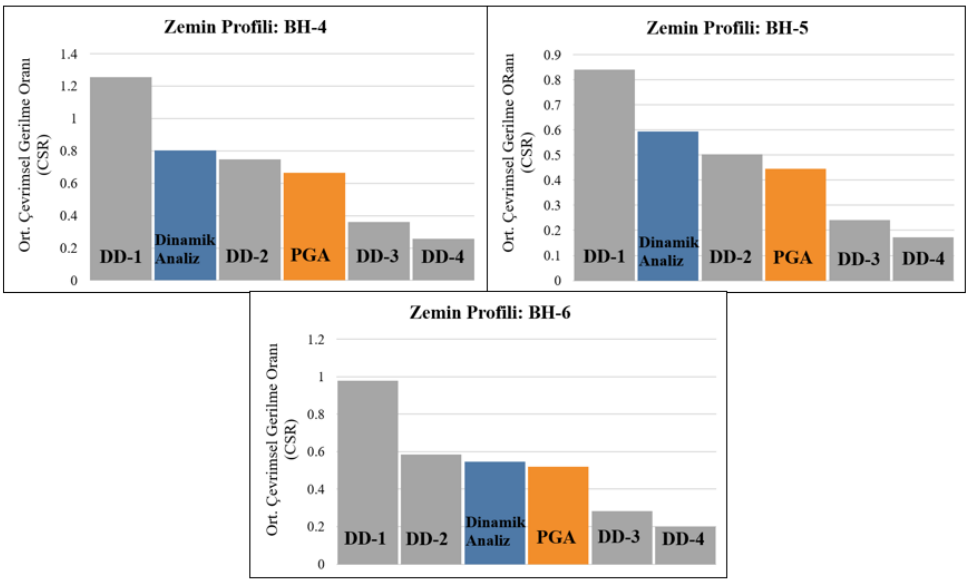
Zemin profillerinin deprem davranışının belirlenmesi amacıyla tek boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizleri RSSeismic yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zeminin davranışını temsil etmek amacıyla General/Quadratic Hyperbolic Soil Model tercih edilmiştir (URL-2). Bu model, zeminin çevrimsel yükler altındaki doğrusal olmayan rijitlik azalımı ve sönüm davranışını gerçeğe yakın bir şekilde temsil edebilmesi nedeniyle kullanılmıştır.

Analizlerde boşluk suyu basıncı oluşumu Green–Mitchell–Polito (GMP) modeli kullanılarak dikkate alınmıştır (Green vd., 2000). Tüm zemin profillerinde yeraltı suyu seviyesi zemin yüzeyinde kabul edilmiş ve deprem yüklemesi olarak seçilen deprem kayıtlarının çalışma sahasında meydana geldiği varsayılmıştır. Zemin profilleri, mevcut sondaj verileri doğrultusunda 20 m derinliğe kadar modellenmiş ve ortalama kayma dalgası hızları bu derinlik aralığı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Dinamik analizlerde model tabanında rijit yarı-uzay sınır koşulu tanımlanmış ve kuvvetli yer hareketi kayıtları 20 m derinliğindeki model tabanından uygulanmıştır. Farklı istasyonlardan elde edilen bu kayıtların kaynak-saha mesafesi, yayılım yolu ve istasyonlara özgü yerel zemin koşullarının etkilerini içerdiği bilinmektedir. Bu nedenle kayıtların çalışma sahasında gerçekleştiğinin kabul edilerek zemin profillerine uygulanması, farklı yer hareketlerinin zemin davranışı üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla kullanılan bir sadeleştirme olup, çalışmanın sınırlılıklarından birini oluşturmaktadır. Analizler sonucunda derinlik boyunca oluşan çevrimsel gerilme oranları (CSR) elde edilerek, basitleştirilmiş yöntemden hesaplanan CSR değerleri ile karşılaştırılmıştır. Analizlerden elde edilen CSR değerleri, farklı deprem yer hareketi düzeyleri (DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4) ve maksimum yer ivmesi (PGA) kullanılarak basitleştirilmiş yöntemle hesaplanan CSR değerleri ile karşılaştırılarak, deprem yer hareketi düzeyi seçiminin sıvılaşma değerlendirmelerine etkisi araştırılmıştır.

3. ANALİZ SONUÇLARI

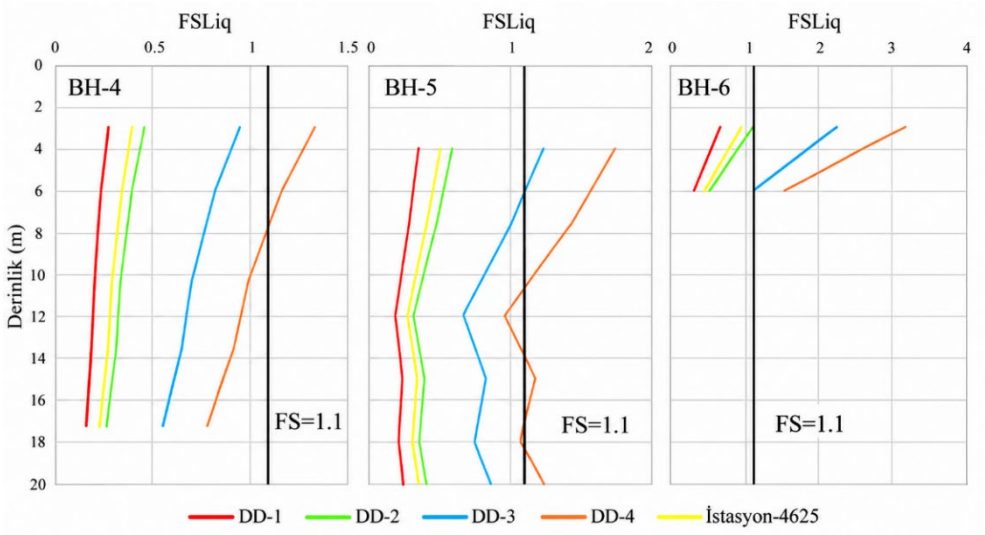
Çalışma kapsamında, üç farklı zemin profili için hem TBDY-2018'de önerilen SPT tabanlı basitleştirilmiş yöntem hem de doğrusal olmayan dinamik analizler kullanılarak sıvılaşma değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Basitleştirilmiş yöntemde, yönetmelikte tanımlanan DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketi düzeylerine karşılık gelen kısa periyot tasarım spektral ivme katsayıları kullanılarak dört ayrı analiz yapılmıştır. Buna ek olarak, seçilen deprem kayıtlarının maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri esas alınarak bir analiz daha gerçekleştirilmiş ve böylece basitleştirilmiş yöntem kapsamında her bir zemin profili için toplam beş farklı deprem yükleme durumu değerlendirilmiştir. Elde edilen çevrimsel gerilme oranı (CSR) değerleri, aynı deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen ortalama CSR değerleri ile karşılaştırılmıştır. Dinamik analizlerde, her bir tabaka için elde edilen CSR–zaman geçmişinden maksimum CSR değeri belirlenmiştir. Şekil 3'te sunulan ortalama CSR değerleri ise her bir zemin profilinde sıvılaşma analizine dahil edilen tabakalardan elde edilen maksimum CSR

değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu yaklaşım ile farklı deprem yer hareketi düzeyleri ve dinamik analizlerden elde edilen çevrimsel gerilme taleplerinin profil bazında karşılaştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 3. Farklı deprem yer hareketi düzeyleri ve PGA tabanlı basitleştirilmiş yöntem ve NL dinamik analizlerden elde edilen ortalama çevrimsel gerilme oranlarının (CSR) karşılaştırılması

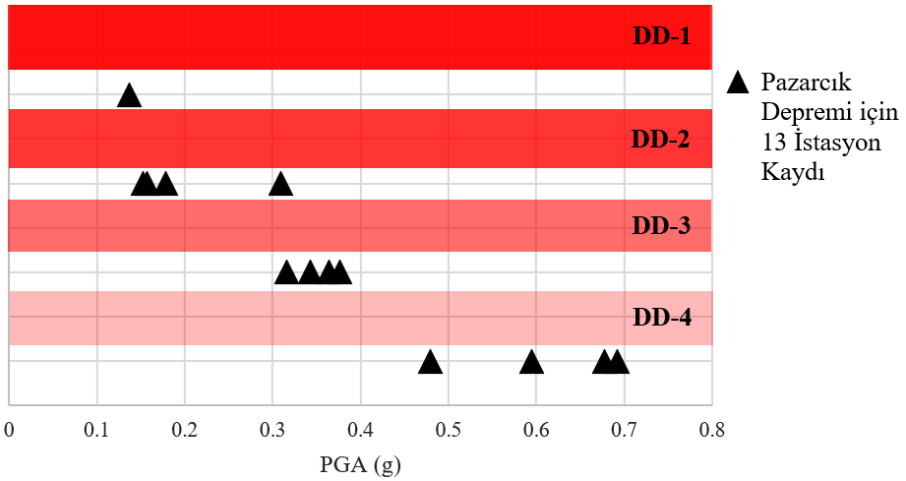
Deprem yer hareketi düzeyindeki değişimin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisinin daha açık biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla İDO<%50 olan tabakalar için sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının derinlik ile değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Bu kapsamda, sıvılaşma analizine dahil edilen tabakalar için dört deprem yer hareketi düzeyi ile 4625 numaralı istasyona ait Pazarcık deprem kaydının PGA değeri esas alınarak basitleştirilmiş yöntemle FS değerleri hesaplanmıştır. TBDY-2018 esas alınarak FS=1.1 sınır değer olarak kabul edilerek grafik üzerinde gösterilmiş ve farklı deprem yer hareketi düzeylerinin tabakaların sıvılaşma durumu üzerindeki etkisi bu sınır değer esas alınarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. Farklı deprem yer hareketi düzeyleri için FS değerlerinin derinlikle değişimi

Şekil 4 incelendiğinde, deprem yer hareketi düzeyinin azalmasına bağlı olarak FS değerlerinin arttığı ve sıvılaşma değerlendirmesinin bazı tabakalarda değiştiği görülmektedir. BH-4 ve BH-5 profillerinde özellikle yüksek deprem yer hareketi düzeylerinde tabakaların büyük bölümünde FS<1.1 ile sıvılaşma durumuna işaret edilirken, daha düşük yer hareketi düzeylerinde bazı tabakaların sıvılaşma sınırının üzerine çıktığı belirlenmiştir. BH-6 profilinde ise DD-1 ve DD-2 düzeylerinde FS<1.1 elde edilirken, DD-3 ve DD-4 düzeylerinde güvenlik sayısı 1.1'in üzerine çıkmaktadır. Ayrıca, basitleştirilmiş yaklaşım ile elde edilen sonuçlarda incelenen tabakalarda FS<1.1 olarak tahmin edildiği görülmektedir.

Analizlerde, 13 adet kuvvetli yer hareketi kaydının önemli bir bölümünün DD-2 ve DD-3 deprem düzeylerine karşılık gelen PGA aralığında yer aldığı, yalnızca bir kaydın DD-1 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Buna karşın bazı kayıtlar DD-4 deprem düzeyine karşılık gelen daha düşük PGA değerleri üretmiştir. Bu durum, aynı deprem sırasında farklı istasyonlarda kaydedilen yer hareketlerinin yerel zemin koşulları, kaynak etkileri ve yayılım özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir (Şekil 5). Bu nedenle, geçmiş bir depremin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde tek bir kayıt yerine birden fazla kuvvetli yer hareketi kaydının birlikte değerlendirilmesi tercih edilmiştir.



Şekil 5. Çalışma sahası için elde edilen 13 adet kuvvetli yer hareketi kaydının PGA değerlerinin deprem yer hareketi düzeyleri ile karşılaştırılması.

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Kahramanmaraş ilinde bulunan üç farklı zemin profili (BH-4, BH-5 ve BH-6) için TBDY-2018'de tanımlanan DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketi düzeyleri kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 6 Şubat 2023 Pazarcık depremine ait 13 adet kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmış ve elde edilen çevrimsel gerilme oranları yönetmelik kapsamında hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Deprem kayıtlarına ait PGA değerleri kullanılarak gerçekleştirilen basitleştirilmiş sıvılaşma analizlerinin, tüm zemin profillerinde NL dinamik analizlere kıyasla daha düşük ortalama CSR değerleri ürettiği belirlenmiştir. Basitleştirilmiş yöntemde çevrimsel gerilme oranı deprem yer hareketi parametreleri ve zemin gerilme koşulları üzerinden

hesaplanırken, dinamik analizlerde tabakalar arası dalga yayılımı, doğrusal olmayan zemin davranışı ve GMP modeli aracılığıyla deprem süresince gelişen artık boşluk suyu basıncı birlikte dikkate alınmaktadır. Bu nedenle iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların değerlendirilmesinde, boşluk suyu basıncı gelişiminin dinamik zemin davranışı üzerindeki etkisinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Analizler sonuçları, tüm zemin profillerinde DD-1 deprem düzeyinin en yüksek çevrimsel gerilme taleplerini oluşturduğunu, DD-3 ve DD-4 deprem düzeylerinin ise belirgin şekilde daha düşük CSR değerleri ürettiğini göstermektedir. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum CSR değerlerinin ortalaması, BH-4 ve BH-5 zemin profillerinde DD-2 deprem yer hareketi düzeyinden elde edilen ortalama CSR değerlerinin üzerinde gerçekleşmiştir. BH-6 profilinde ise dinamik analizlerden elde edilen ortalama CSR değeri DD-2'nin hemen altında kalmış ve DD-2 ile DD-3 deprem yer hareketi düzeylerinden elde edilen değerler arasında yer almıştır.

Elde edilen sonuçlar, Pazarcık depremine ait farklı istasyon kayıtlarının oluşturduğu çevrimsel gerilme taleplerinin tek bir deprem yer hareketi düzeyi ile temsil edilmesinin sınırlı kalabileceğini göstermektedir. Kayıtlar arasında gözlenen PGA farklılıklarının yanı sıra, zemin profillerinin dinamik davranışındaki değişimler de elde edilen CSR ve sıvılaşma güvenlik sayılarının farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle geçmiş bir depremin sıvılaşma etkilerinin değerlendirilmesinde, tek bir deprem yer hareketi düzeyinin doğrudan temsil edici kabul edilmesi yerine, gerçek kuvvetli yer hareketi kayıtları ile farklı deprem yer hareketi düzeylerinden elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

Genel olarak elde edilen bulgular, deprem yer hareketi düzeyi seçiminin sıvılaşma değerlendirmelerinden elde edilen sonuçlar üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Farklı deprem yer hareketi düzeylerine bağlı olarak çevrimsel gerilme oranları ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları önemli ölçüde değişmektedir. Bununla birlikte, gerçek deprem kayıtlarının farklı istasyonlarda değişken yer hareketi özellikleri sergilemesi, geçmiş depremlerin etkilerinin tek bir deprem yer hareketi düzeyi üzerinden temsil edilmesinde dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu açıdan, sıvılaşma değerlendirmelerinde deprem yer hareketinin uygun şekilde tanımlanması, elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, https://www.afad.gov.tr (10 Ocak 2026).

TC. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Kahramanmaraş ve Hatay Deprem Raporu, 2023.

TBDY-2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Biricik, A.S.; Korkmaz, H. The seismicity of Kahramanmaraş, Marmara Coğrafya Dergisi 2001, 3(1), 53-82.

İyisan, R. Correlation between shear wave velocity and in-situ penetration test results. Turkish Journal of Civil Engineering 1996, 7(2), 1187-1199.

Bayrak, Y., Öztürk, S., Çınar, H., Koravos, G. C., & Tsapanos, T. M. (2009). Earthquake hazard assessment for different regions in and around Turkey based on Gutenberg-Richter parameters by the least square method. Journal of Applied Functional Analysis, 4(2), 286–299.

Boulanger, R. W. ve Idriss, I. M. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11), 1413–1426. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1413).

Bray, J. D. ve Sancio, R. B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9), 1165–1177. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1165).

Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185–188.

Güler, E. Non-linear site response and liquefaction analysis of soil site in Kahramanmaras during the Mw 7.7 and Mw 7.6 Turkey earthquakes, Engineering Science and Technology, an International Journal, 2024, 57, 101751.

Seed, H.B.; Idriss, I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions 1971, 107(9), 1249-1274.

URL-2, ROCSCIENCE. https://www.rocscience.com/help/rsseismic/documentation (1 Mayıs 2026).

Green, R.A.; Mitchell, J.K.; Polito, C.P. An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils. Pro-ceedings of the John Booker Memorial Symposium, Sydney, New South Wales, Australia, 16-17 November 2000.