

SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİNE AİT BİR VAKA ÖRNEĞİ

ANALYSIS OF SITE-SPECIFIC GROUND RESPONSE: A CASE STUDY

Olca POLAT¹

ÖZET

Bu çalışma, İzmir İli, Seferhisar İlçesi sınırları içerisinde, iki açıklıklı yenisı yapılacak 37.40 m uzunluğundaki bir dere köprü projesi için hazırlanan geoteknik rapor verilerinden derlenmiştir. Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı için Esaslar Yönetmeliği, Ekim 2020 tarihi itibari yürürlüğe girmiştir. Yönetmelikte belirtildiği üzere, sıvılaşma potansiyeli olan zeminler için sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması gerekmektedir. Bu amaç ile mevcut proje için öncelikle zemin özellikleri belirlenerek, sıvılaşma analizi yapılmıştır. Sıvılaşma potansiyelinin tespitinin ardından, yedi farklı deprem kaydı kullanılarak, sahaya özel yer tepki analizi yapılmıştır. Sıvılaşma unsurunun spektral ivmeye etkisi, aşırı boşluk suyu basıncının değişimi ile yanal yer değiştirme davranışı irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: sıvılaşma, sahaya özel yer tepki analizi, eşdeğer doğrusal davranış analizi, doğrusal olmayan davranış analizi, yanal yayılma.

ABSTRACT

This study was derived from the geotechnical report data prepared for a 37.40 m long stream bridge project with two spans to be constructed within the border of Seferhisar District, İzmir Province. The Code on Principles for the Design of Highway and Railway Bridges and Viaducts under the Impact of Earthquake entered into force as of October 2020. As stated in the code, site-specific ground response soil behavior analysis are required for liquefiable soils. For this purpose, in the beginning, soil properties were determined for the current project and liquefaction analysis was performed. After the determination of the liquefaction potential, site-specific ground response analyzes were made using seven strong ground motion records. Effect of the liquefaction phenomena on the spectral acceleration, the change of excess pore water pressure and the lateral spreading behavior were investigated.

Keywords: liquefaction, site-specific ground response analysis, equivalent linear response analysis, non linear response analysis, , lateral spreading.

¹ İnşaat Y. Müh., LİMİT Tek. Arş. Prj. Uyg. Müh. San. ve Tic. A. Ş., olcaypolat@yahoo.com.tr

1. GİRİŞ

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı, deprem kuşağındaki ülkemiz açısından oldukça önemlidir. Deprem neticesinde, ana kayadan yüzeye doğru yayılan dalgalar, zemin koşullarından etkilenerek değişim göstermektedir (Kramer, 1996). Deprem dalgalarının frekansı ve genliğinde değişimler, sönümlenmeye yahut büyümeye uğrayarak neticelenmektedir. Kuvvetli yer hareketi, zemin tabakalarında meydana getirdiği değişimler sonucunda; sıvılaşma, oturma ve şev stabilitesi gibi sorunların meydana gelebilmesi için özel zemin durumları gerekirken, zemin büyütmesi genelde meydana gelebilmektedir (İyisan ve Haşal, 2011).

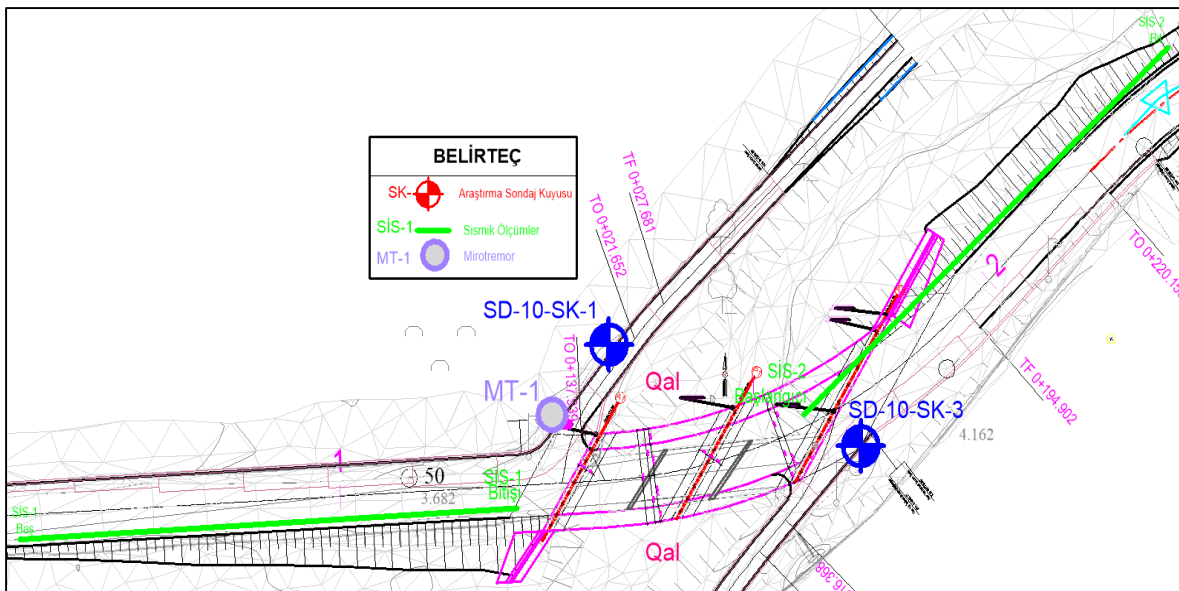
Yapıların tasarımında, ZF zemin sınıfındaki zeminler için sahaya özel zemin davranış analizi yapılarak, yapıların deprem anında tahmin edilen spektrum davranışı ve olası etkileri, güvenli yapıların tasarlanması açısından büyük öneme sahiptir. ZF zemin sınıfı, sahaya özel zemin davranış analizi gerektiren zeminler olarak tanımlanmıştır (TBDY, 2018).

Çalışmaya konu olan ve yapımı planlanan dere köprüsü, İzmir İli, Seferhisar İlçesi sınırları içerisinde, iki açıklıklı olup, 37.40 m uzunluğundadır. Projeye ait yerel zemin sınıfı ZF olarak tespit edilmiş olup, sahaya özel zemin davranış analizi sunulacaktır.

2. TEMSİLİ ZEMİN PROFİLİ VE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

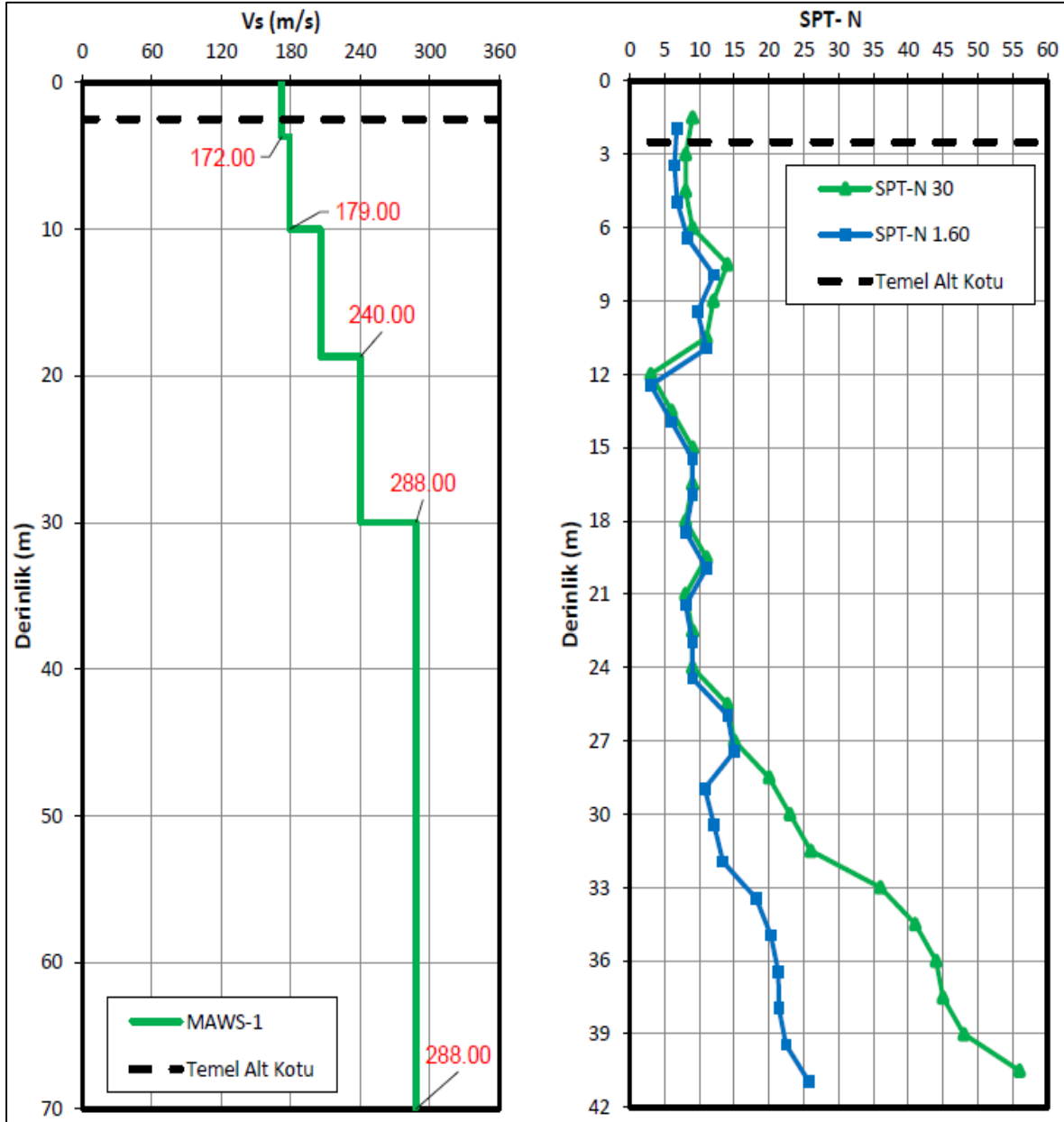
Proje kapsamında, zemin araştırma çalışmaları; iki adet sondaj kuyusu, iki adet MASW ve bir adet mikrotremör çalışmasından oluşmaktadır (Şekil 1). Kayma dalgası hızı ve SPT-N_{1.60} değerlerinin derinlik ile değişimi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.).

İki açıklık ve üç ayaklı olarak tasarımı planlanan köprü için orta ayakta dere akışından ötürü sondaj kuyusu açılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, yalnızca, köprü giriş kenar (A1) ayağında açılan SK-1 no'lu sondaj kuyusu verileri için değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 1. Köprü ve zemin araştırma çalışmalarına ait yerleşim planı.

Sondaj kuyusunda SPT ile ilerleme yapılmış, son üç SPT-N değerleri; 45, 48 ve 56 olarak tespit edilen çok sıkı özellikte, Siltli KUM birim ile anakayaya rastlanılmadan, 40.95 m derinlikte sondaj kuyusu sonlandırılmıştır. Yeraltı suyu ile Eylül 2021 tarihinde, 4.80 m seviyesinde karşılaşmıştır. Aşağıdaki şekillerde, sırası ile Vs, SPT-N, LL, PL ve İDO değerlerinin derinlikle değişimi gösterilmiştir.

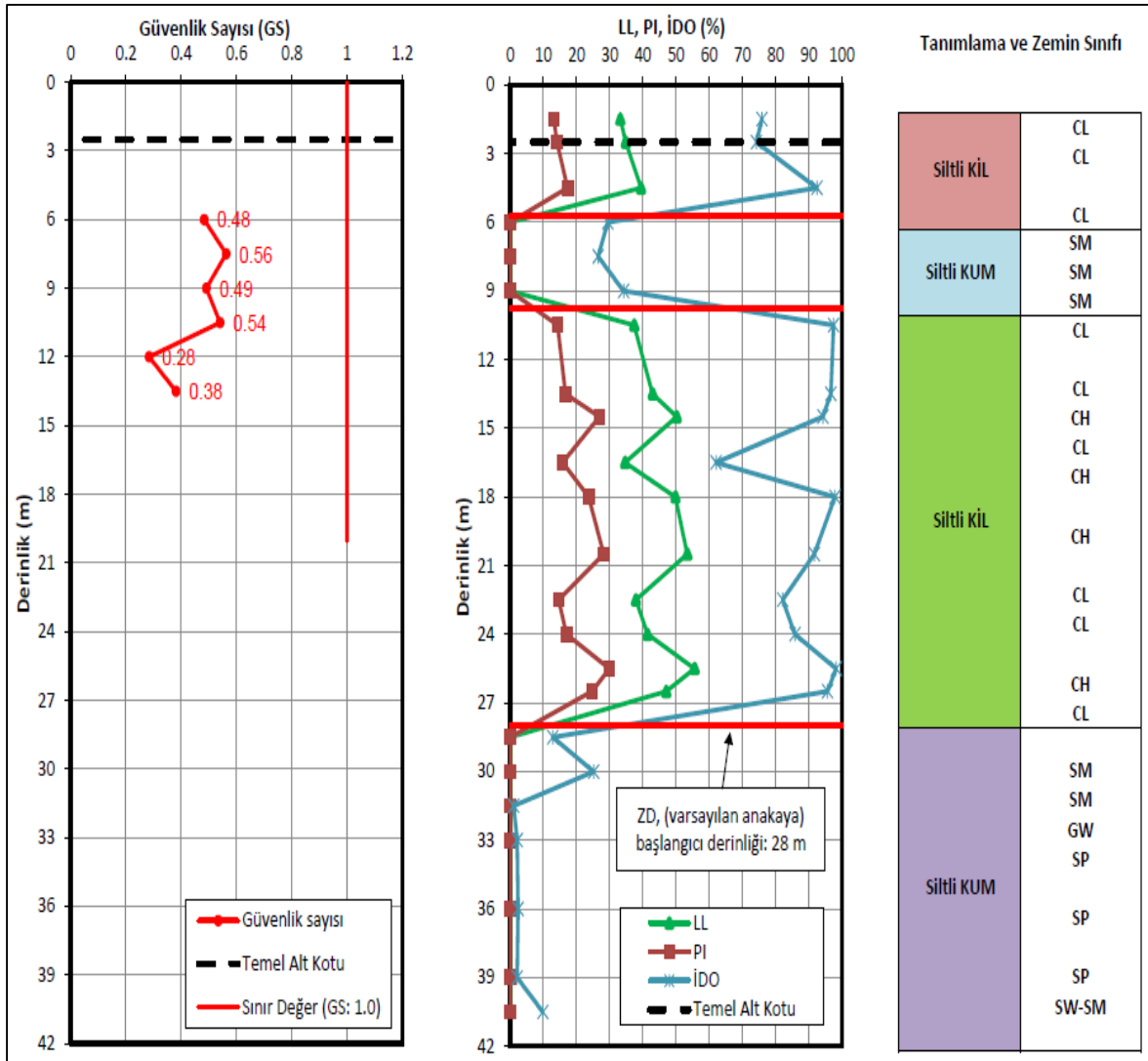


Şekil 2. Vs ve SPT-N değerlerinin derinlik ile değişimi.

Temel alt kotu seviyesi (2.30 m) altından itibaren, sırası ile V_{s30} , $(N_{60})_{30}$ ve $(c_u)_{30}$ değerleri; 214 m/s, 12 ve 13 kPa olarak tespit edilmiştir. TBDY 2018 Tablo 8.1.'e göre, kayma dalgası hızı değeri ZD zemin sınıfına, $(N_{60})_{30}$ değeri ile kohezyon değeri ise ZE zemin sınıfına işaret etmektedir.

İlgili tabloda, zemin özelliği tanımlamaları (yumuşak-orta katı özellikte kil ve gevşek özellikte kum geçişleri) de dikkate alınarak, yerel zemin sınıfı ZE olarak kabul edilmiştir. Buna göre, ilgili çalışma alanı için sırası ile T_A , T_B , T_L , S_{D5} ve S_{D1} ; 0.140 s, 0.701 s, 6 s, 1.122 ve 0.787 olarak belirlenmiştir (<https://tdth.afad.gov.tr/TDTH>).

Sıvılaşma analizinde belirtilen detaylar, ilgili yönetmelikte yer almaktadır. Analizde kullanılmak üzere, harita spektral ivme katsayısı, Deprem Düzeyi-2 (DD-2) için Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) kullanılarak, $0.4 \times S_{D5} = 0.4488$ olarak alınmıştır.



Şekil 3. Sıvılaşmada güvenlik sayısı, zemin özellikleri ve temsili zemin profilinin derinlik ile değişimi.

Aşağıdaki tabloda, SPT bazlı yapılan analizde; SPT-4 (6.00 m ile 6.45 m), SPT-5, SPT-6, SPT-7, SPT-8 ile SPT-9 (13.50 m ile 13.50 m) arasındaki geçişlerde sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler tespit edilmiştir. Buna göre, zemin sınıfının ZF olarak değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmakta ve yönetmelik gereği, sahaya özgü zemin davranış analizinin yapılarak, gerekli hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Tablo 1. Sıvılaşma analizinin SPT-N verileri için değerlendirilmesi.

Numune No	h (m)	σ_{0v} kN/m ²	σ_{0v}' kN/m ²	SPT-N (60/1,60)tk	r_d	τ_{DEPREM} kN/m ²	CRR _{7.5}	$\tau_{DİRENÇ}$ kN/m ²	GS $\tau_{DİRENÇ}/\tau_{DEPREM}$	Sıvılaşma
SPT- 1	1.73	31.05	31.05	13	0.99	8.92	0.14	4.39	0.49	Beklenmiyor $W_n \leq 0.85$ LL
SPT- 2	3.23	58.05	58.05	13	0.97	16.49	0.14	7.98	0.48	Beklenmiyor $W_n \leq 0.85$ LL
SPT- 3	4.73	84.90	85.64	13	0.96	23.83	0.14	12.16	0.51	Beklenmiyor $W_n \leq 0.85$ LL
SPT- 4	6.23	114.90	100.94	14	0.95	31.86	0.15	15.38	0.48	Bekleniyor
SPT- 5	7.73	144.90	116.24	18	0.94	39.70	0.19	22.34	0.56	Bekleniyor
SPT- 6	9.23	174.90	131.54	17	0.92	47.03	0.18	23.09	0.49	Bekleniyor
SPT- 7	10.73	204.90	146.84	18	0.88	52.70	0.19	28.49	0.54	Bekleniyor
SPT- 8	12.23	234.90	162.14	9	0.84	57.67	0.10	16.37	0.28	Bekleniyor
SPT- 9	13.73	264.90	177.44	12	0.80	61.94	0.13	23.60	0.38	Bekleniyor
SPT- 10	15.23	294.90	192.74	16	0.76	65.51	0.17	32.41	0.49	Beklenmiyor $W_n \leq 0.85$ LL
SPT- 11	16.73	324.90	208.04	16	0.72	68.38	0.17	34.98	0.51	Beklenmiyor $W_n \leq 0.85$ LL
SPT- 12	18.23	354.90	223.34	15	0.68	70.54	0.16	34.84	0.49	Beklenmiyor LL: 50, PI:24
SPT- 13	19.73	384.90	238.64	18	0.64	72.01	0.19	46.30	0.64	Beklenmiyor LL: 50, PI:24

3. DEPREM ETKİSİNDE SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

Köprünün hakim doğal titreşim periyodu (T_p), yaklaşık 1 s olarak alınmış olup, $0.2 T_p$ (0.2 s) ile $1.5 T_p$ (1.5 s) periyot aralığındaki, uygun 7 farklı deprem kaydı çifti, PEER veri tabanından indirilmiştir. Deprem büyüklüğü (M_w), fay tipi, fay uzaklığı (R_{rup}) ve benzer kayma dalgası hızı için seçilen deprem kayıtları aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 2. Bir boyutlu analizlerde kullanılan deprem kayıtları ve özellikleri.

PEER RSN kodu	Deprem adı	Yıl	M_w	Fay tipi	R_{rup} (km)	$(V_s)_{30}$ (m/s)	Ölçek faktörü	E-W (D-B)	N-S (K-G)
1101	Kobe, Japonya	1995	6.9	SS	11.34	256	1.7	Dep 1-1	Dep 1-2
1141	Dinar, Türkiye	1995	6.4	N	0	220	1.6	Dep 2-1	Dep 2-2
1158	Düzce, Türkiye	1999	7.51	SS	13.6	282	1.6	Dep 3-1	Dep 3-2
1752	Northwest, Çin	1997	6.1	N	9.98	240	2.0	Dep 4-1	Dep 4-2
4084	Parkfield, ABD	2000	6.0	SS	0.95	270	2.0	Dep 5-1	Dep 5-2
5985	El Mayor-Cucapah, Meksika	2010	7.2	SS	22.83	202	0.9	Dep 6-1	Dep 6-2
6952	Darfield, Yeni Zellanda	2010	7.0	SS	18.73	263	2.0	Dep 7-1	Dep 7-2

TKDY 2020, Bölüm 2.5.2.'de belirtildiği üzere, deprem kayıtları, basit ölçeklendirme yöntemi kullanılarak, tasarım spektrumuna uyum sağlayacak biçimde ölçeklendirilmiştir. Tanımlanan tasarım spektrumunun $0.2 T_p$ ile $1.5 T_p$ periyotları arasındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması esasına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri, aynı ölçek katsayısı kullanılarak yapılmıştır.

Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere, jeofizik ve sondaj kuyusunda, anakaya ortamına rastlanılmamıştır. Yönetmelik gereği, sahaya özel zemin davranış analizinde kullanılmak üzere, serbest zemin modeli oluşturulurken, taban kayasının yapı temelinden itibaren derinliği, en büyük yapı genişliğinin üç katından çok daha büyük olması halinde, tabakalı zemin modeli, yerel zemin sınıfı ZC veya ZD olan zemin tabakası ile sonlandırılabilir.

Buna göre, sondaj kuyusu logunda, 28.00 m'den sonra başlayan, orta sıkı özellikteki Siltli KUM biriminin zemin sınıfı, ZD (anakaya) olarak kabul edilmiş ve DEEPSOIL V 7.0 programı kullanılarak, bir boyutlu zemin davranış analizi yapılmıştır (Hashash ve diğ, 2017).

Programda, zaman tanım alanında yapılacak analizde, düşük kayma dalgası hızına sahip tabakaların iletebileceği en yüksek frekans değerini ($f_{maks} > 30$ Hz) tutmak amacı ile tabaka kalınlığı, $H = V_s / 4f_{maks} = 214 / (4 \times 30) = 1.78$ m olarak hesaplanmış ve zemin modeli 1.50 m kalınlığında, 18 tabakaya bölünmüştür.

Analizlerde, sıvılaşma potansiyeli belirlendiğinden, artık boşluk suyu basıncı etkisi dikkate alınmış olup, frekans tanım alanında-eşdeğer doğrusal (EL) ve zaman tanım alanında-doğrusal olmayan (NL) zemin davranış modelleriyle, sonuçları ayrı ayrı irdelenmiştir.

Sıvılaşma potansiyeline sahip zemin geçişleri içerisinde yer alan Kum geçişleri için MKZ (Matasovic, Kondner ve Zelasko) modeli, kil geçişleri için ise kuadratik/hiperbolik (GQ/H) modeli kullanılmıştır. Kayma modülü, sönüm oranı ve kayma şekil değiştirmesi ilişkisi, saha ve laboratuvar da yapılan mevcut çalışmalar ile belirlen(e)mediğinden, Darendeli (2001) tarafından önerilen kayma modülü azalım referans bağıntılarından yararlanılmıştır. Analizde kullanılan model parametreleri aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 3. Dinamik zemin analizi, MKZ zemin model parametreleri.

Zemin	Seviye (m)	h (m)	D_{min} (%)	γ_{ref} (%)	β	s	P_1	P_2
Kum 1	4.50 - 6.00	1.5	1.881	0.044	1.50	0.915	0.627	0.103
Kum 2	6.00 - 7.50	1.5	1.791	0.048	1.52	0.915	0.629	0.104
Kum 3	7.50 - 9.00	1.5	1.718	0.051	1.53	0.915	0.628	0.104

Tablo 4. Dinamik zemin analizi, GQ/H zemin model parametreleri.

Zemin	Seviye (m)	h (m)	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	A	P ₁	P ₂
Kil 1	0.00 - 1.50	1.5	-3.3	-1.95	0.01	1	0.99	1	0.865	0.15
Kil 2	1.50 - 3.00	1.5	-2.70	-1.72	0.12	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 3	3.00 - 4.50	1.5	-2.49	-1.35	0.162	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 4	9.00 - 10.50	1.5	-4.25	2.55	15.49	1	0.99	1	0.865	0.15
Kil 5	10.50 - 12.00	1.5	-3.50	1.25	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 6	12.00 - 13.50	1.5	-3.42	1.45	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 7	13.50 - 15.00	1.5	-2.70	0.8	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 8	15.00 - 16.50	1.5	-3.29	1.8	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 9	16.50 - 18.00	1.5	-3.93	2.86	15.49	1	0.99	1	0.865	0.15
Kil 10	18.00 - 19.50	1.5	-2.49	0.45	15.49	1	0.99	1	0.865	0.2
Kil 11	19.50 - 21.00	1.5	-2.30	0.39	15.49	1	0.99	1	0.865	0.2
Kil 12	21.00 - 22.50	1.5	-3.42	2	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 13	22.50 - 24.00	1.5	-3.30	2	15.36	1	0.99	1	0.82	0.15
Kil 14	24.00 - 25.50	1.5	-2.37	0.93	15.49	1	0.99	1	0.865	0.2
Kil 15	25.50 - 27.00	1.5	-2.77	1.6	15.49	1	0.99	1	0.82	0.15

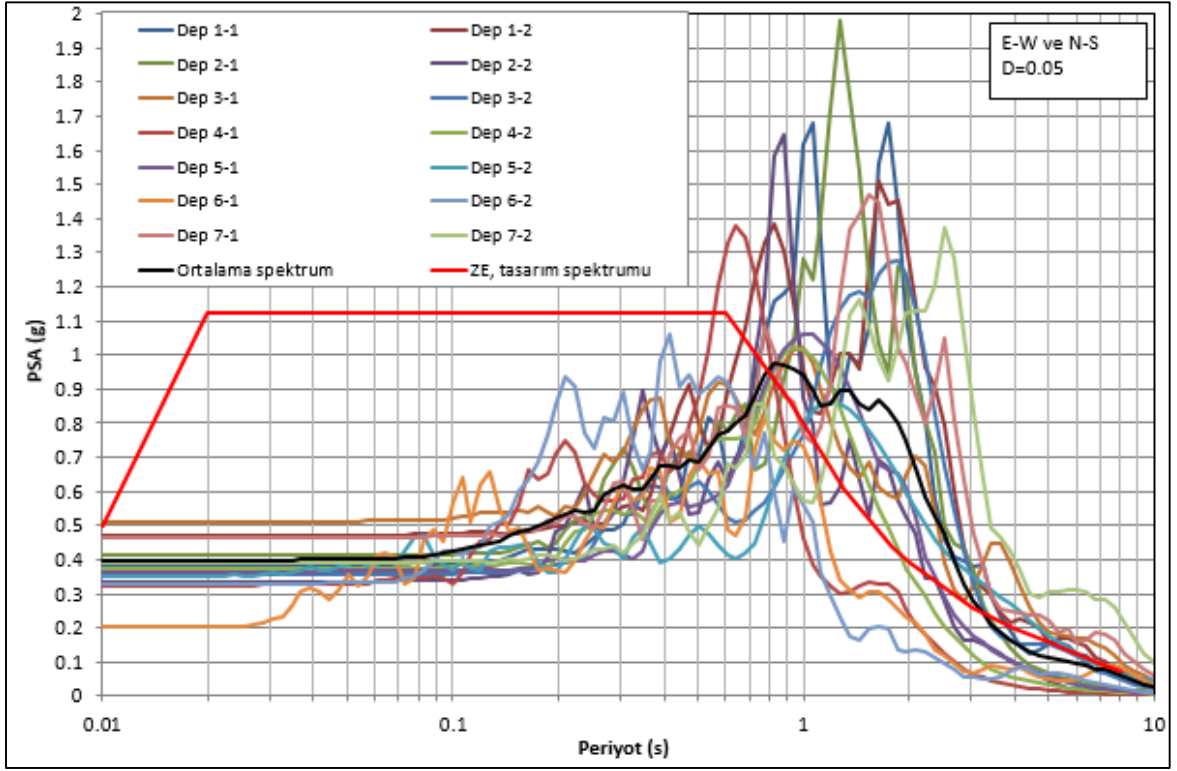
4. DEĞERLENDİRMELER

Serbest saha analizi sonucunda yüzeyde elde edilen ivme kayıtlarının tepki spektrumları Şekil 4-5.'de yer almaktadır. Analiz sonuçlarına göre, boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen, eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analizin pik ivmeyi (PGA), izolatör gibi davranarak düşürdüğü tespit edilmiştir.

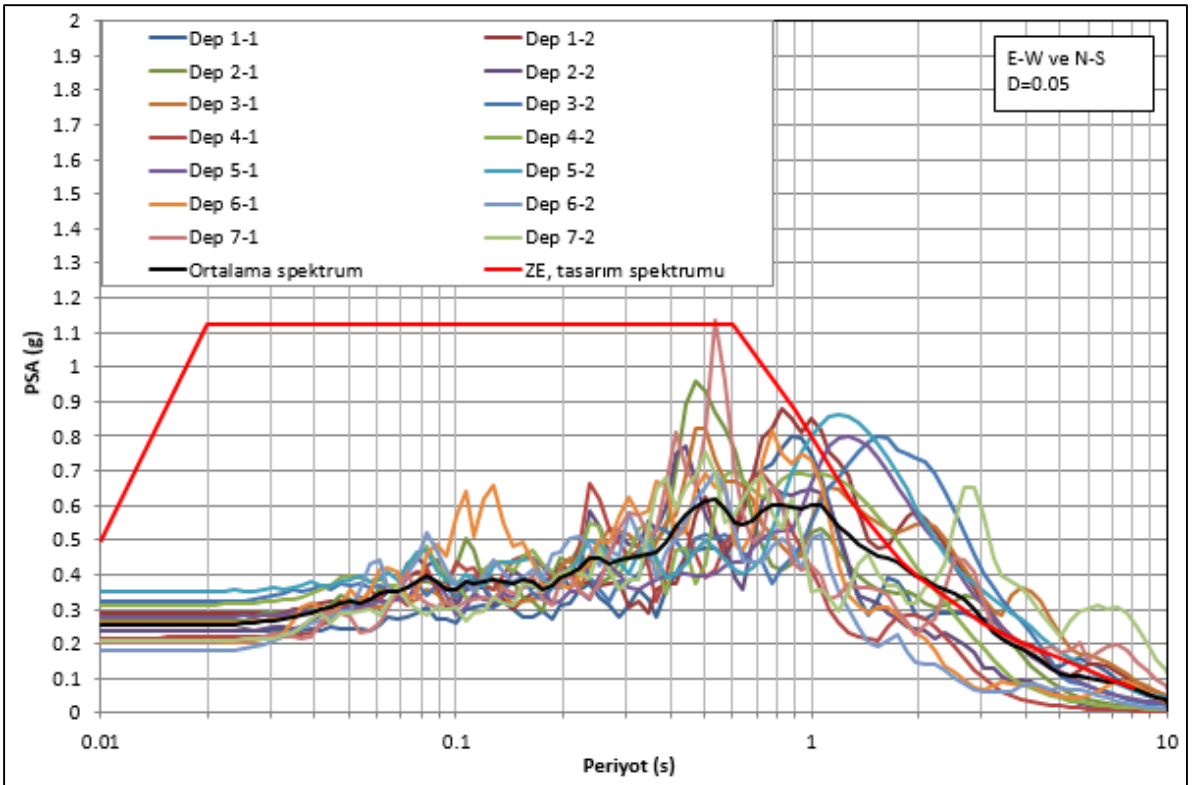
EL analizde, pik spektral ivmeler, 0.7 sn ile 1 sn aralığında belirlenmiş olup, %13 oranında düşmüştür. NL analizde ise pik spektral ivmeler, 0.4 sn ile 1 sn aralığında belirlenmiş olup, %45 oranında düşmüştür. Genel olarak, sahaya özel zemin davranış analizinden elde edilen ortalama spektrum eğrisinde, periyot uzaması tespit edilmiştir. Benzer bulgular; Afacan (2019), Eseller-Bayat ve Deniz (2022) tarafından da görülmüştür.

Bu durum, boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen, özellikle de doğrusal olmayan analizin pik ivmeyi (PGA) izolatör gibi davranıp düşürerek, spektral ivmeleri kayda değer oranda sönümlediğine işaret etmektedir. Sıvılaşmaya bağlı olarak, yapılarda yumuşak kat etkisinde, düşük kesme kuvveti almasından ötürü, yapı hasarlarının çarpıcı düzeyde azaldığı vakalar, Kocaeli (1999) depreminde gözlenmiştir (Yoshida ve diğ. 2001).

Ölçeklendirilen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ordinatlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından küçük olmamalıdır. Buna göre, zemin iyileştirmesi uygulanmadığı durum için ZE tasarım spektrumunun kullanılması uygun olacaktır. Zira, tasarım depremi meydana gelmesine rağmen, sahada hesaplamalara göre beklenen sıvılaşma vuku bulmayabilmektedir. Kaldı ki, sıvılaşmanın izolatör etkisi kapsamında, bir tasarım yöntemi de bulunmamaktadır.



Şekil 4. Yüzeyde elde edilen tepki spektrumu (EL için).



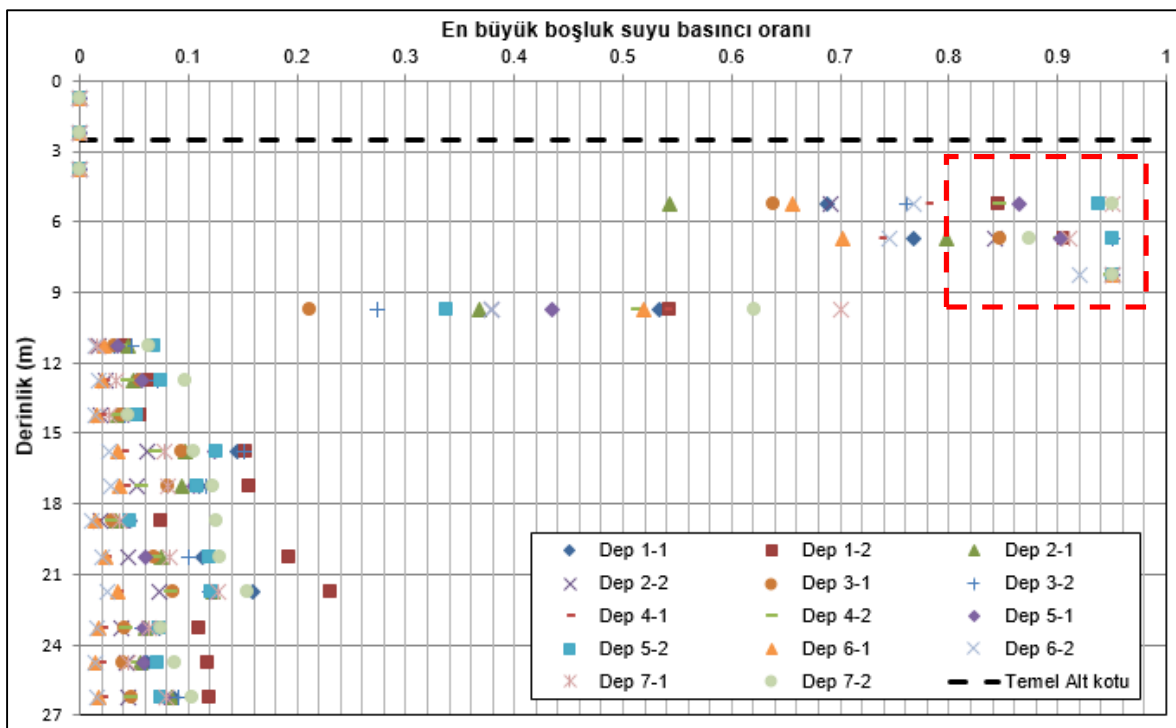
Şekil 5. Yüzeyde elde edilen tepki spektrumu (NL için).

Birim deformasyon düzeylerinin düşük tutulduğu problemlerde (sert zemin ve/veya zayıf girdi hareketi), iki analiz türü (EL, NL) de yer tepkisi için kabul edilebilir sonuçlar verirken, birim deformasyon değerinin yüksek olduğu durumlarda, doğrusal olmayan (NL) yer tepki analizi daha kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. (Akdoğan ve Özden, 2019), (Pruiksma, 2016), (Carlton ve Tokimatsu, 2016).

r_u parametresinin 1'e yaklaşması, zeminin mukavemetini kaybetmeye başlayarak, sıvılaşmanın gerçekleşmesi ile sonuçlanacağını ifade etmektedir (Afacan, 2019).

Aşağıdaki NL analizde, derinlik ile artık boşluk suyu basıncı oranının değişimi gösterilmiş olup, 252 nokta içerisinde 4.50 m ile 9.00 m arasında, kırmızı kesikli çizgi ile işaretlenen, 29 noktada r_u değeri >0.8 olarak tespit edilmiştir.

Bu aralıktaki r_u değeri ve sayısı, ilgili Siltli KUM ve Siltli KİL geçişleri için sıvılaşma gerçekleşebileceğine ve zemin direncinin ortadan kalkacağına dikkati çekmektedir. Diğer yandan, ilgili derinlikte sıvılaşma potansiyeline sahip derinliklerin, SPT bazlı hesaplanan sonuçlar (Tablo 1) ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

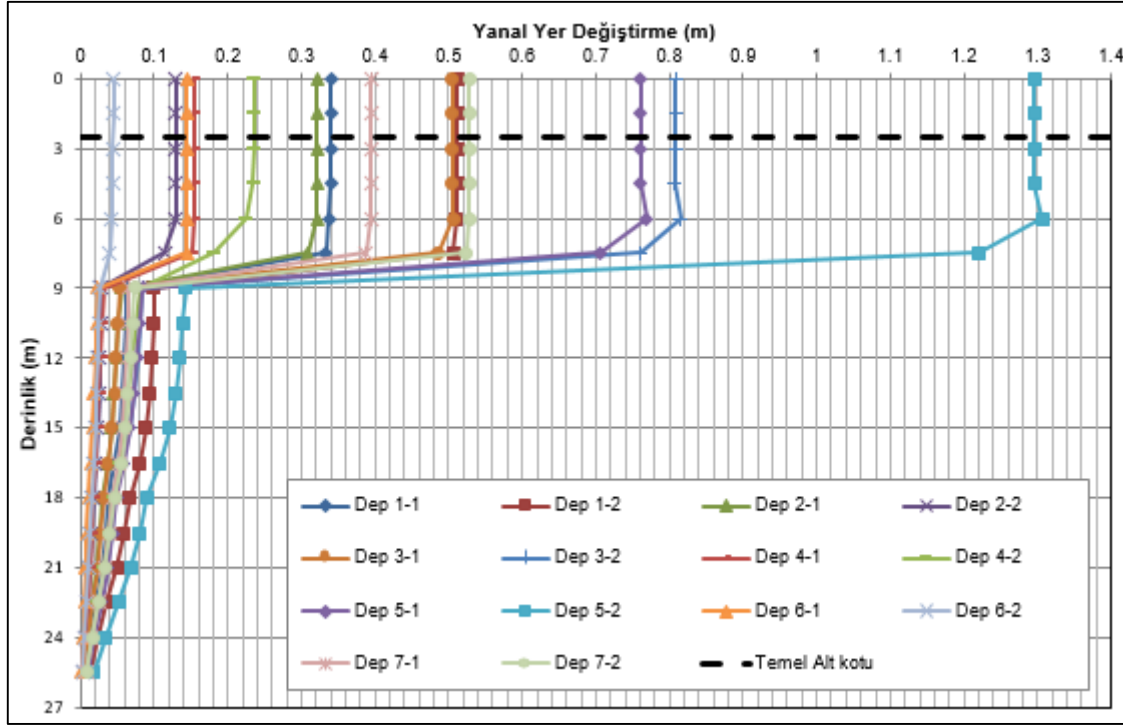


Şekil 6. Derinlik ile artık boşluk suyu basıncı oranının değişimi (NL için).

Birçok büyük depremde, sıvılaşma kaynaklı yanal yer değiştirmeden ötürü, nadir can kayıpları olmasına rağmen, büyük yapısal hasarlar olduğu bilinmektedir (Hakuno, 2004). İlgili köprü giriş yaklaşım dolgusunda, sıvılaşma neticesinde, yanal yayılma olması halinde kenar ayağa ilave yanal yükler gelecek olup, bu unsurun dikkate alınması önem arz etmektedir (TKDY, 2020).

Aşağıdaki NL analizde, derinlik ile yüzeydeki yatay yer değiştirmenin değişimi aşağıda gösterilmiş olup, en büyük 1.3 m mertebesinde belirlenmiştir. Sırası ile en büyük yatay yer değiştirmeler; Dep 5-2, Dep 3-2 ve Dep 5-1 no'lu kayıtlarda belirlenmiştir. Bu kayıtların, Şekil 5.'de yer alan tepki spektrumlarına bakıldığında, hem periyotlarının hem de spektral ivmelerinin birlikte sağlandığı en büyük kayıtlar olduğu dikkati çekmektedir.

Buradan, periyot uzaması gösteren yüksek spektral ivmeye sahip kayıtların, büyük yanal yer değiştirmeye de sebep olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7. Derinlik ile yanal yer değiştirme miktarının değişimi (NL için).

Buna göre, köprü temel sisteminin sıvılaşma potansiyeline karşı iyileştirilmesi gerekli görülmüştür. Zemin iyileştirmesinin, verimliliğinin kalite kontrol deneyleri ile teyidi oldukça mühim olup, başlangıçta ZE olarak kabul edilen zemin sınıfının yükselmesi, üstyapı tasarımı açısından farklı bir çözüm sunacağı bilinmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu tespit edilen, ZF zemin yerel sınıfına sahip bir köprü projelendirilmesinde, sahaya özel zemin davranış analizi sunulmuştur. Sahaya özel yedi farklı deprem kaydı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Sıvılaşma analizi, hem SPT bazlı hem de DEEPSOIL yazılımı ile kullanılarak yapılmış olup, benzer seviyelerde sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Buradan, yapılan analizlerin kendi içinde uyumlu olduğu kanaatine varılmış olup, sonraki çalışmalarda, sıvılaşma analizlerinin her iki yöntem için de yapılmasının anlamlı olacağı düşünülmektedir.

Boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen, eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analizin pik ivmeyi (PGA), izolatör gibi davranarak düşürdüğü tespit edilmiştir. EL analizde, pik spektral ivmeler, 0.7 sn ile 1 sn aralığında belirlenmiş olup, %13 oranında düşmüştür. NL analizde ise pik spektral ivmeler, 0.4 sn ile 1 sn aralığında belirlenmiş olup, %45 oranında düşmüştür.

Genel olarak, sahaya özel zemin davranış analizinden elde edilen ortalama spektrum eğrisinde, periyot uzaması tespit edilmiştir. Bu durum, boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen, özellikle de doğrusal olmayan analizin pik ivmeyi (PGA) izolatör gibi davranıp düşürerek, spektral ivmeleri kayda değer oranda sönümlendiğine işaret etmektedir.

NL analizde, derinlik ile yüzeydeki yatay yer değiştirmenin değişimi ortaya konmuş olup, en büyük 1.3 m mertebesinde belirlenmiştir. En büyük yatay yer değiştirmelerin, hem periyotlarının hem de spektral ivmelerinin birlikte sağlandığı kayıtlar olduğu dikkati çekmektedir. Periyot uzaması gösteren yüksek spektral ivmeye sahip kayıtların, büyük yanal yer değiştirmeye de sebep olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma ile ülkemizde yeni uygulanmaya başlayan, sahaya özel zemin davranış analizi için örnek bir vaka üzerinden, sonraki çalışmalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yapılan analizlerdeki yardımlarından ötürü, Ogan KARTAL'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Afacan KB. (2019), "Estimation of Excess Pore Pressure Generation and Nonlinear Site Response of Liquefied Areas" Geotechnical Engineering, DOI: 10.5772/intechopen.88682.
- Akdoğan P. ve Özden G. (2019), "Suya Doygun Zemin Profillerinde Doğrusal Olmayan Efektif Gerilme Analizleri Yoluyla Dinamik Zemin Büyütmesi", ZMGM, Uluslararası 8. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 182-195.
- Darendeli MB. (2001) "Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves", Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Texas, ABD.
- Eseller-Bayat EE. ve Deniz O. (2022), "Deprem Bölgesinde Bulunan Mevcut Bir Tank Yapısının Geoteknik Değerlendirmesi", İMO Teknik Dergi, 11921-11954.
- Hakuno M. (2004), "Ground Liquefaction is Not Dangerous for Human Lives" 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, No. 3225.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., DEEPSOIL 7.0, User Manual, 2017.
- İyisan R ve Haşal M. E. (2011), "Zemin Büyütmesi ve Yerel Koşulların Spektral İvmeye Etkisi", itüdergisi, Cilt 10, Sayı:4, 47-56.

Konder R. L. ve Zelasko J. S. (1963), "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation of Sands", Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, Brasil, 289-324.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

Matasovic N., and Vucetic, M. (1993), "Cyclic Characterization of Liquefiable Sands", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 119, No. 11, pp 1805-1822.

PEER "Pacific Earthquake Engineering Research Center", <https://ngawest2.berkeley.edu/>

Pruksma, J. P. (2016). Nonlinear and Equivalent Linear Site Response Analysis for the Groningen Area. TNO report.

TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, 2018.

TKDY, Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı İçin Esaslar, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020.

Yoshida N., Tokimatsu K., Yasuda S., Kokusho T., ve Okimura T. (2001), "Geotechnical Aspects of Damage in Adapazari City During 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake", Soil and Foundation, Vol. 41, No. 4, 25-45.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	
A	DEEPSOIL programında kullanılan model parametresi (boyutsuz)	
D_{min}	DEEPSOIL programında kullanılan model parametresi (%)	D-B Doğu-Batı
$(c_u)_{30}$	İlk 30 m'deki kohezyon değeri (kPa)	K-G Kuzey-Güney
EL	Eşdeğer doğrusal	
İDO	İnce dane malzeme oranı (%)	
LL	Likit limit (%)	
MASW	Çok kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi	M_w Deprem büyüklüğü
NL	Doğrusal olmayan	N Normal
PGA	En büyük yer ivmesi değeri	
PL	Plastik limit (%)	
SK	Sondaj kuyusu	
SPT-N	Standart Penetrasyon Deneyi darbe sayısı	
$(N_{60})_{30}$	İlk 30 m'deki arazide 30 cm ilerleme için darbe sayısı	
r_u	Artık boşluk suyu basıncı oranı	
$P_{1,2}$	DEEPSOIL programında kullanılan model parametreleri (boyutsuz)	
$\theta_{1,2,3,4,5}$	DEEPSOIL programında kullanılan model parametreleri (boyutsuz)	
s	DEEPSOIL programında kullanılan model parametresi (boyutsuz)	
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)	
S_{D1}	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)	
T_A	Yatay spektrum köşe periyodu (sn)	
T_B	Yatay spektrum köşe periyodu (sn)	
T_L	Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu (sn)	R_{rup} Fay uzaklığı
V_s	Kayma dalgası hızı (m/s)	SS Strike Slıpe
$(V_s)_{30}$	İlk 30 m'deki kayma dalgası hızı (m/sn)	
W_n	Doğal su muhtevası (%)	
β	DEEPSOIL programında kullanılan model parametresi (boyutsuz)	
γ_{ref}	DEEPSOIL programında kullanılan referans şekil değiştirme değeri (%)	