Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SIVILAŞABİLİR ZEMİNLERDE RADYE TEMELLERİN DEPREM SONRASI OTURMA DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF POST-EARTHQUAKE SETTLEMENT BEHAVIOR OF RAFT FOUNDATIONS IN LIQUEFIABLE SOILS

S. Tuğba İLERİ [1], Berna UNUTMAZ [2]

ÖZET

Deprem sırasında gevşek kum zeminlerde meydana gelen sıvılaşma, boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak efektif gerilmelerin azalmasına ve zemin mukavemetinde önemli ölçüde düşüşe neden olmaktadır. Bu durum, zemin rijitliğinde meydana gelen ani azalma ile birlikte temel sistemlerinde önemli oturma ve deformasyonların oluşmasına yol açabilmektedir. Özellikle yüzeysel temellerde, deprem sırasında gelişen bu davranış yapı performansını doğrudan etkileyebilecek önemli bir mühendislik problemi oluşturmaktadır. Bu çalışmada sıvılaşmanın radye temellerin oturma davranışı üzerindeki etkisi sayısal analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı sıvılaşabilir zemin profilleri için üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuştur. Analizlerde zemin–yapı etkileşiminin temel davranışı üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek amacıyla öncelikle radye temelin statik yükler altındaki oturma davranışı değerlendirilmiştir. Daha sonra aynı model deprem etkisi altında incelenmiş ve deprem nedeniyle gelişen sıvılaşma davranışı dikkate alınarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda radye temel altında meydana gelen toplam oturma miktarları ve boşluk suyu basıncı gelişimi karşılaştırmalı olarak her iki durum için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deprem etkisi altında gelişen sıvılaşma ile birlikte zemin rijitliğinde meydana gelen azalma ve boşluk suyu basıncındaki artışın radye temellerde oluşan oturma miktarını statik duruma kıyasla önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Çalışma sonuçları, sıvılaşabilir zeminlerde radye temellerin deprem performansının değerlendirilmesinde zemin–yapı etkileşiminin ve sıvılaşma etkisinin birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sıvılaşma, radye temel, zemin–yapı etkileşimi, zemin oturması*

ABSTRACT

Liquefaction in loose sandy soils during earthquakes reduces effective stresses as pore water pressure increases. This process leads to a significant loss of soil strength and stiffness. This phenomenon, combined with the sudden degradation of soil stiffness, may cause considerable settlements and deformations in foundation systems. Particularly for shallow foundations, this behavior developed during seismic events constitutes a critical engineering problem that can directly affect structural performance. In this study, the effect of liquefaction on the settlement behavior of raft foundations was investigated using numerical analyses. Three-dimensional numerical models were developed for different liquefiable soil profiles. In order to evaluate the influence of soil–structure interaction on foundation behavior, the settlement response of raft foundations under static loading conditions was first examined. Subsequently, the same models were analyzed under seismic loading, and dynamic analyses were performed by considering liquefaction behavior induced by earthquake loading. The total settlements beneath the raft foundation and the development of pore water pressure were

[1] Öğretim Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Bölümü, sabahat.ileri@hacettepe.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, berna.unutmaz@hacettepe.edu.tr

comparatively evaluated for both conditions. The results indicate that the reduction in soil stiffness and the increase in pore water pressure associated with liquefaction significantly increase the settlement of raft foundations under seismic loading compared to the static case. These findings highlight the importance of considering soil–structure interaction and liquefaction effects together in seismic performance assessments.
Keywords: *Liquefaction, raft foundation, soil–structure interaction, soil settlement*

1. GİRİŞ

Depremler, zemin ve yapı sistemleri üzerinde oluşturdukları dinamik etkiler nedeniyle mühendislik yapılarının performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu etkiler arasında, gevşek ve suya doygun kum zeminlerde deprem sırasında gelişen sıvılaşma olgusu, geoteknik deprem mühendisliğinin en kritik ve karmaşık problemlerinden birini oluşturmaktadır. Sıvılaşma, gevşek ve suya doygun kohezyonsuz zeminlerin, deprem gibi dinamik veya tekrarlı yükler etkisi altında hacimce sıkışma eğilimi göstermesi, ancak drenajsız koşullar nedeniyle bu hacim azalmasının gerçekleşememesi sonucunda boşluk suyu basıncında meydana gelen artış ile açıklanmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış, taneler arası temas gerilmesini ifade eden efektif gerilmenin azalmasına, efektif gerilmenin sıfıra yaklaşması veya sıfıra eşitlenmesi durumunda ise zeminin kayma mukavemetini ve rijitliğini tamamen kaybederek sıvı benzeri bir davranış sergilemesine yol açmaktadır (Kramer, 1996). Bu durum, zemin rijitliğinde meydana gelen ani azalma ile birlikte temel sistemlerinde önemli oturma ve deformasyonların oluşmasına yol açabilmektedir. Özellikle yüzeysel temellerde, deprem sırasında gelişen bu davranış yapı performansını doğrudan etkileyebilecek önemli bir mühendislik problemi oluşturmaktadır. (Flora vd., 2025).

Geçmiş depremlerde gözlemlenen yapısal hasarların önemli bir kısmının, doğrudan zemin sıvılaşması kaynaklı temel oturmaları ve farklı oturmalar ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Çetin vd., 2002; Unutmaz ve Çetin, 2010; Bray ve Dashti, 2014; Karimi vd. 2018; Tsai vd., 2020). Özellikle yüzeysel temel sistemleri ile inşa edilmiş yapılarda, sıvılaşma sonrası gelişen oturmalar hem yapının kullanım güvenliğini hem de taşıyıcı sistem performansını doğrudan etkilemektedir (Kassas vd., 2022). Bu bağlamda, 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında özellikle Adıyaman-Gölbaşı ve İskenderun bölgesinde sıvılaşma kaynaklı temel oturmaları gözlemlenmiştir (Moug vd., 2024; Arnold vd., 2025; Ozener vd., 2024; Çetin vd., 2025). Bu tür saha gözlemleri, sıvılaşmanın yüzeysel temellerde oluşturduğu oturma davranışının daha detaylı ve güvenilir biçimde tahmin edilmesi ihtiyacını bir kez daha ortaya koymaktadır.

Literatürde sıvılaşma kaynaklı zemin oturmalarının tahminine yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir (Ishihara ve Yoshimine, 1992; Zhang vd., 2002; Çetin vd., 2009). Bu yaklaşımların başında, sıvılaşan zeminlerde hacimsel birim deformasyonların ampirik bağıntılarla tahmin edilmesini sağlayan Ishihara ve Yoshimine (1992) yöntemi gelmektedir. Bu yöntem, saha gözlemlerine ve laboratuvar deneylerine dayanan basit ve pratik bir yaklaşım sunması nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu tür ampirik yöntemler genellikle serbest zemin (free-field) koşulları için geliştirilmiş olup, zemin-yapı etkileşiminin ve temel yükünün oturma davranışı üzerindeki etkisini doğrudan dikkate almamaktadır. Mevcut mühendislik pratiğinde, sıvılaşma kaynaklı yapı oturmalarının tahmini büyük ölçüde Ishihara ve Yoshimine (1992), Tokimatsu ve Seed (1987) ve Zhang vd. (2002) tarafından tanımlanan tek boyutlu (1D) sıvılaşma-sonrası konsolidasyon (post-liquefaction reconsolidation) esaslı ampirik yöntemlere dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, yapının oturmasında önemli bir rol oynayan kayma kaynaklı deformasyonları (shear-induced movements) dikkate

almamaktadır. Dashti vd. (2010) tarafından ortaya konulduğu üzere, bu kayma kaynaklı hareketlerin ihmal edilmesi, özellikle temel altı zemin davranışının ve oturma dağılımının gerçekçi biçimde tahmin edilmesini sınırlandırmaktadır.

Sıvılaşma kaynaklı yapı oturmalarının değerlendirilmesinde, kayma kaynaklı zemin deformasyonlarını da yakalayabilen analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla araştırmacılar, genellikle zemin ve yapı davranışını temsil edebilmek için dinamik sayısal analizler veya santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir (Popescu ve Prevost, 1993; Elgamal vd., 2005; Dashti ve Bray, 2013; Karimi ve Dashti, 2016a, b). Bu araştırmacılar, gerçekleştirdikleri sayısal analizler ile deneysel çalışmalardaki temel gözlemleri genel olarak başarılı biçimde yakalayabilmiştir. Çetin vd. (2012) ve Unutmaz ve Çetin (2012), yapının etkisini de içerecek şekilde deprem kaynaklı tekrarlı gerilme oranını (CSR) tahmin etmek amacıyla basitleştirilmiş bir yöntem önermiştir. Elde edilen bu CSR değeri kullanılarak kayma ve hacimsel birim deformasyonlar tahmin edilmiş, bu deformasyonların entegrasyonuyla sıvılaşma kaynaklı yapı oturmaları hesaplanabilmiştir. Dhakal ve Cubrinovski (2025) tarafından geliştirilen Cubrinovski-Dhakal yöntemi, sıvılaşma kaynaklı zemin oturmasının basitleştirilmiş biçimde değerlendirilmesi amacıyla iki tabakalı bir hesaplama modeli sunmaktadır. Bu yöntem, CPT (koni penetrasyon) verilerinden kolayca elde edilebilen az sayıda parametre kullanarak hacimsel oturma (S_V) ve kayma kaynaklı oturma (S_{SH}) bileşenlerinin kapalı form çözümlerle tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemde kullanılan hesaplama modeli, saha koşulları (CPT profili ve yeraltı su seviyesi), yapı/temel özellikleri (temel yükü Q ve temel genişliği B) ile deprem yükü parametrelerini (PGA ve M_w) girdi olarak almakta ve bu girdiler üzerinden üç temel oturma bileşenini hesaplamaktadır: hacimsel oturma (S_V), kayma kaynaklı oturma (S_{SH}) ve ejekta (püskürük) kaynaklı oturma (S_E). Bu bileşenlerin birleştirilmesiyle toplam zemin oturması ($S_G = S_V + S_E$) ve toplam yapı oturması ($S_B = S_G + S_{SH}$) elde edilmektedir (Dhakal ve Cubrinovski, 2025).

Bu tür ampirik yaklaşımların sunduğu katkılara rağmen, sıvılaşma davranışını temsil edebilen gelişmiş bünye modellerinin kullanıldığı üç boyutlu sayısal analiz yöntemleri, zemin-yapı etkileşimini daha kapsamlı biçimde değerlendirebilmesi açısından önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu tür modelleme yaklaşımları, zemin-yapı etkileşimini, boşluk suyu basıncı gelişimini ve zemin deformasyonlarını eş zamanlı olarak değerlendirebilme imkânı sağlamakta, böylece temel sistemlerinin sismik yük altındaki davranışının daha gerçekçi biçimde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu yöntemlerin, ampirik yaklaşımlarla karşılaştırılarak doğrulanması ve aradaki farkların mühendislik açısından yorumlanması, literatürde hâlâ üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak durmaktadır.

Bu çalışmada, sıvılaşmanın radye temellerin oturma davranışı üzerindeki etkisi üç boyutlu sayısal analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı sıvılaşabilir zemin profilleri için sayısal modeller oluşturulmuş; zemin-yapı etkileşiminin temel davranışı üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek amacıyla öncelikle statik yükler altındaki oturma davranışı, ardından deprem etkisi altında gelişen sıvılaşma davranışı dikkate alınarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, toplam oturma miktarı ve boşluk suyu basıncı gelişimi açısından değerlendirilmiştir. Bu sayede, sıvılaşabilir zeminler üzerinde inşa edilen radye temellerin deprem performansının değerlendirilmesinde zemin-yapı etkileşiminin ve sıvılaşma etkisinin birlikte ele alınmasının önemi ortaya konularak, mevcut ampirik yaklaşımların sınırlılıklarına ve sayısal modelleme yönteminin sunduğu katkılara dikkat çekilmesi amaçlanmıştır.

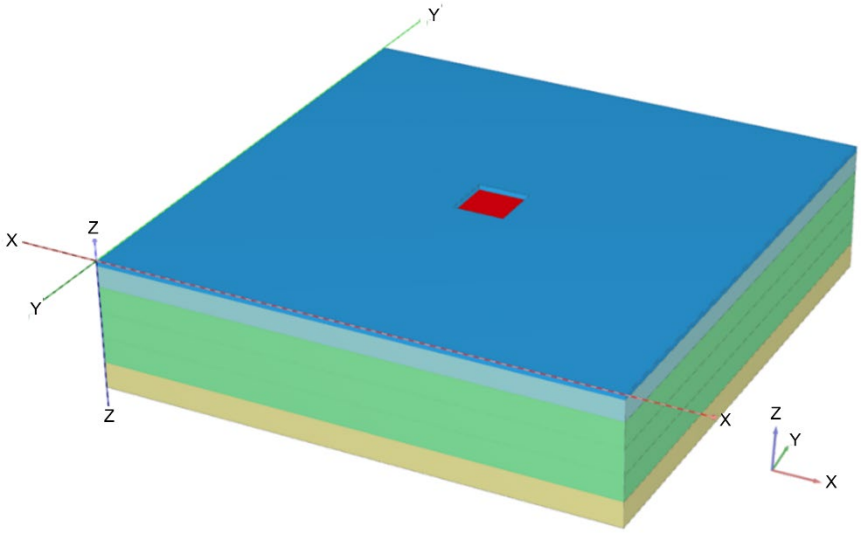
2. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada, sıvılaşabilir zemin profilleri üzerine inşa edilen radye temellerin sismik davranışı, PLAXIS 3D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak üç boyutlu sayısal analizler yoluyla incelenmiştir. Analizler kapsamında, zemin davranışı statik yükler altında Hardening Soil Small (HSsmall) modeli ile, sıvılaşma potansiyeli taşıyan tabakaların dinamik yükler altındaki davranışı ise UBC3D-PLM modeli ile temsil edilmiştir. Bu bölümde sırasıyla model geometrisi ve sınır koşulları, zemin profili ve kullanılan malzeme modelleri, radye temel modellemesi ile dinamik yükleme koşulları açıklanmaktadır.

2.1. Model Geometrisi ve Sınır Koşulları

Bu çalışmada, sıvılaşabilir zemin üzerine oturan radye temellerin sismik davranışını incelemek amacıyla PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuştur. Model geometrisi, sınır koşullarının analiz sonuçları üzerindeki etkisini en aza indirecek şekilde,100 m x 100 m yatay boyutlarda ve 25 m derinlikte bir zemin ortamı olarak tanımlanmıştır. Model merkezinde, zemin yüzeyinden 1 m derinlikte konumlandırılmış 10×10 m boyutlarında bir radye temel yer almaktadır.

Dinamik analizlerde deprem kaydı model tabanından uygulandığından, yanal sınırlarda free-field (açık alan) sınır koşulu, taban sınırında ise compliant base sınır koşulu tercih edilmiştir. Bu sınır koşulları, deprem dalgalarının model sınırlarından yapay olarak yansımasını önleyerek serbest saha koşullarının gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Statik aşamalarda ise yanal sınırlarda yatay hareketin engellendiği, taban sınırında ise hem yatay hem düşey hareketin sabitlendiği standart sınır koşulları kullanılmıştır. Oluşturulan modelin geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan üç boyutlu analiz modeli.

2.2. Zemin Profili ve Radye Temel Özellikleri

Analizlerde kullanılan zemin profili, her biri 5 m kalınlığında olacak şekilde üç tabakadan oluşan idealize edilmiş bir profil olarak tanımlanmıştır. Yeraltı su seviyesi, zemin profilinin yüzeyinden 1 m derinlikte olacak şekilde tanımlanmıştır. Sıvılaşmanın zemin profilindeki

konumunun temel oturma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla dört farklı analiz senaryosu oluşturulmuş; her bir senaryoda bu dört tabakadan yalnızca biri sıvılaşabilir olarak modellenmiş, diğer tabakalar ise sıvılaşmayan zemin davranışı ile temsil edilmiştir. Bu şekilde, sıvılaşabilir tabakanın profildeki derinliğine (yüzeye yakın, orta veya derin konumda yer almasına) bağlı olarak radye temel altında oluşan oturma miktarının nasıl değiştiği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Statik yükleme aşamalarında tüm tabakalardaki zemin davranışı Hardening Soil Small (HSsmall) malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Pekleşen zemin modeli (HSsmall), zeminin gerilme seviyesine bağlı rijitlik azalımını ve küçük gerinimlerdeki yüksek başlangıç rijitliğini dikkate alarak, Mohr-Coulomb modeline kıyasla zemin davranışını daha gerçekçi biçimde temsil etmektedir. Deprem yükü altında ilgili analiz senaryosunda sıvılaşması öngörülen tabakanın davranışı ise dinamik analiz aşamalarında UBC3D-PLM malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Modelde doğru bir başlangıç gerilme durumu oluşturabilmek amacıyla HSsmall modeli kullanılmıştır. Bu doğrultuda analizlere ilk olarak K_0 prosedürü ile başlanılmış, ardından HSsmall modeli kullanılarak plastik analiz ile statik gerilmeler elde edilmiştir. Üçüncü aşamada radye temel modele dahil edilerek üzerine 100 kPa büyüklüğünde yayılı yük uygulanmış ve statik yükler altındaki oturma davranışı incelenmiştir. Son aşamada ise sıvılaşan zemin tabakalarına UBC3D-PLM modelini tanımlanarak drenajsız koşullarda dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Her üç tabakaya ait HSsmall ve UBC3D-PLM model parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan zemin tabakalarına ait HSsmall ve UBC3D-PLM model parametreleri.

Zemin Modelleri	Zemin Parametreleri	Birim	Zemin Tabakaları		
HSsmall	Bağıl yoğunluk	%	30	60	80
	SPT $N_{1,60}$	-	4	16	28
	γ_{kuru}	kN/m^3	16.2	17.4	18.2
	γ_{doygun}	kN/m^3	19.4	19.9	20.2
	E_{50}^{ref}	kN/m^2	18000	36000	48000
	E_{oed}^{ref}	kN/m^2	18000	36000	48000
	E_{ur}^{ref}	kN/m^2	54000	108000	144000
	G_0^{ref}	kN/m^2	80400	100800	114400
	m	-	0.60625	0.51250	0.45000
	$\gamma_{0.7}$	-	0.00017	0.00014	0.00012
	ϕ'	°	31	35	38
UBC3D-PLM	γ_{kuru}	kN/m^3	16.2	17.4	18.2
	γ_{doygun}	kN/m^3	19.4	19.9	20.2
	ϕ_{cv}	°	31	35	38
	ϕ_p	°	32	37	44
	m_e	-	0.5	0.5	0.5
	n_e	-	0.5	0.5	0.5
	n_p	-	0.4	0.4	0.4
	k_B^e	-	482.2	765.5	927.3
	k_G^e	-	688.9	1093.5	1324.7
	k_G^p	-	133.1	939.8	3315.3
	R_f	-	0.89	0.73	0.67

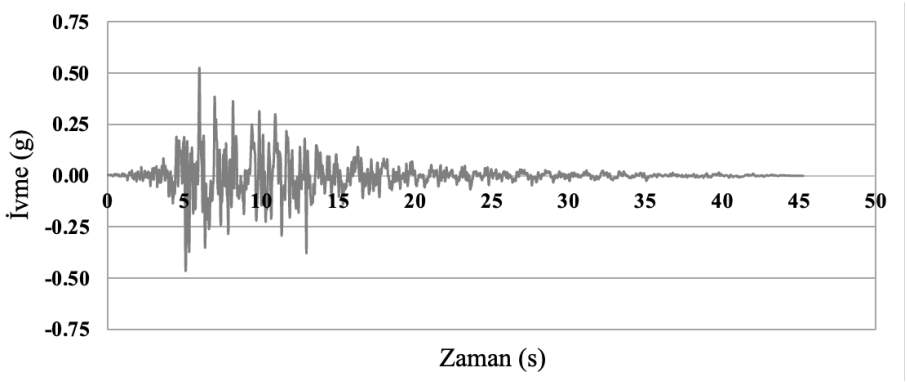
Radye temel, model geometrisinin merkezinde, zemin yüzeyinden 1 m derinlikte olacak şekilde konumlandırılmıştır. Temel, gerçek davranışını temsil edebilmek amacıyla plate eleman kullanılarak modellenmiş olup, temel-zemin arayüzündeki etkileşimi tanımlamak üzere arayüz (interface) elemanlarına yer verilmiştir. Radye temel modellemesinde kullanılan geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Sayısal modelde kullanılan radye temel özellikleri.

Parametre	Birim	Değer
Birim hacim ağırlık	kN/m^3	25
Elastisite modülü	kN/m^2	$3x10^7$
Temel kalınlığı	m	1
Poisson oranı	-	0.2

2.3. Deprem Kaydı ve Dinamik Yükleme

Dinamik analizlerde girdi hareketi olarak The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) veritabanından alınmış ve PGA değeri 0.52g olan bir deprem ivme-zaman geçmişi model tabanına uygulanmıştır. Girdi hareketi, compliant base sınır koşulu esas alınarak tanımlanmıştır. İlgili ivme-zaman kaydı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Dinamik analizlerde kullanılan girdi deprem hareketine ait ivme-zaman geçmişi

Dinamik analiz aşamasında, zeminin sönümleme davranışını temsil edebilmek amacıyla, hedef sönüm oranı %3 (ξ = %3) olacak şekilde Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Rayleigh sönüm katsayıları (α, β) bu sönüm oranı ile zemin profili özelliklerine ve deprem kaydının baskın frekansına göre Hudson et al. (1994) yöntemiyle belirlenen hedef frekanslar (f_1, f_2) kullanılarak hesaplanmıştır.

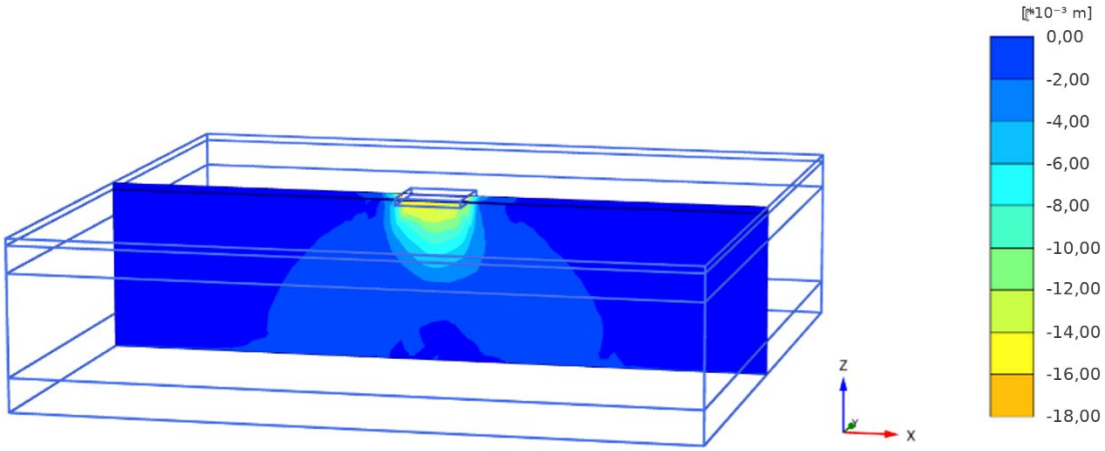
3. ANALİZ SONUÇLARI

Sıvılaşan tabakanın profildeki konumuna bağlı olarak radye temel oturma davranışının nasıl değiştiğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır. Bu kapsamda, zemin yüzeyinden itibaren ilk 20 metre her biri 5 m kalınlığında dört tabakaya ayrılmış ve her bir senaryoda bu tabakalardan yalnızca birinin sıvılaşabilir olduğu varsayılmış ve dört farklı senaryo modellenmiştir. Bu senaryolarda sıvılaşabilir tabakanın kalınlığı sırası ile 1) 0-5 m, 2) 5-10 m, 3) 10-15 m ve 4) 15-20 m olarak belirlenmiştir. Öncelikle, deprem etkisi öncesinde radye temelin statik yükler altındaki oturma davranışı incelenmiş; ardından bu dört senaryo için dinamik analizler

gerçekleştirilerek sıvılaşma sonucu gelişen boşluk suyu basıncı değişimi ve radye temel altında oluşan ilave oturma miktarları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Statik Analiz Sonuçları

Statik yükleme aşamasında, radye temel üzerine uygulanan 100 kPa yayılı yük altında, temel merkezinde yaklaşık 16 mm oturma elde edilmiştir. Temelin tam merkezinden alınan düşey kesitte elde edilen düşey yer değiştirme (deplasman) dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, maksimum oturma temel altında yoğunlaşmakta ve temelden uzaklaştıkça düşey deplasman değerleri sıfıra yaklaşmaktadır.

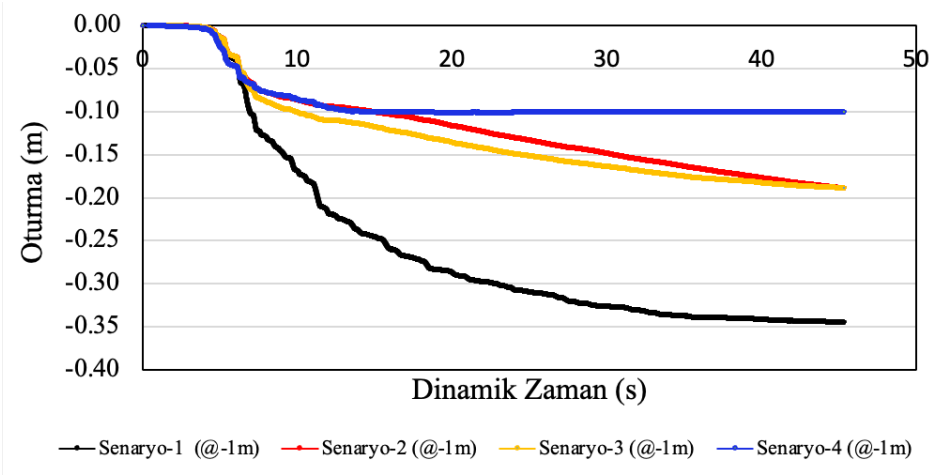


Şekil 3. Statik analiz sonucunda temel merkezinden alınan düşey kesitte elde edilen düşey yer değiştirme (oturma)

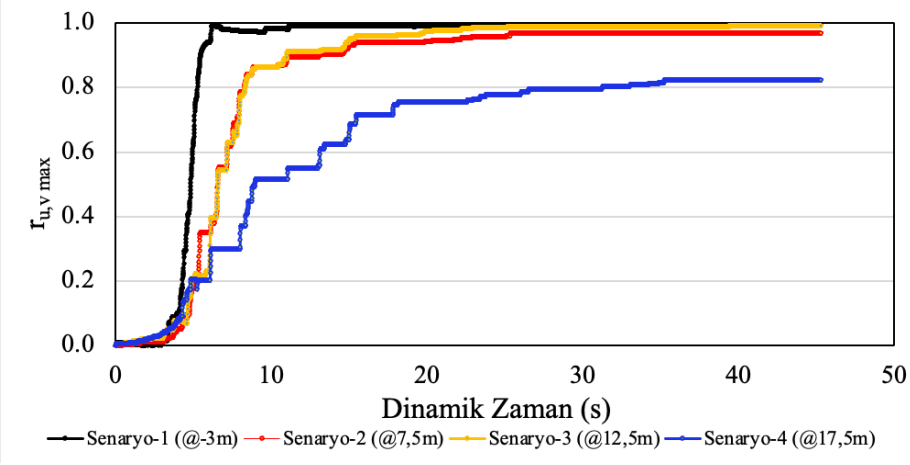
3.2. Dinamik Analiz Sonuçları

Dinamik analiz aşamasında, sıvılaşan tabakanın profildeki konumuna bağlı olarak oluşturulan dört farklı senaryo için elde edilen boşluk suyu basıncı gelişimi ve radye temel altında oluşan oturma miktarları incelenmiştir. Analizlerde sıvılaşmanın tetiklenip tetiklenmediğinin değerlendirilmesinde, literatürde yaygın olarak kabul görmüş ve aşırı boşluk suyu basıncının zeminin başlangıç düşey efektif gerilmesine (σ'_{vo}) oranına dayanan, boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1'e ulaşmasıyla tanımlanan başlangıç sıvılaşma kriteri esas alınmıştır (Seed ve Lee, 1966).

Dört farklı senaryoya ait temel altı (-1 m derinliğinde) düşey yer değiştirme-zaman ilişkileri ve ilgili sıvılaşabilir tabakaların orta derinliğinde elde edilen maksimum aşırı boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u,max}$) değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4'te sunulmuştur.



a)



b)

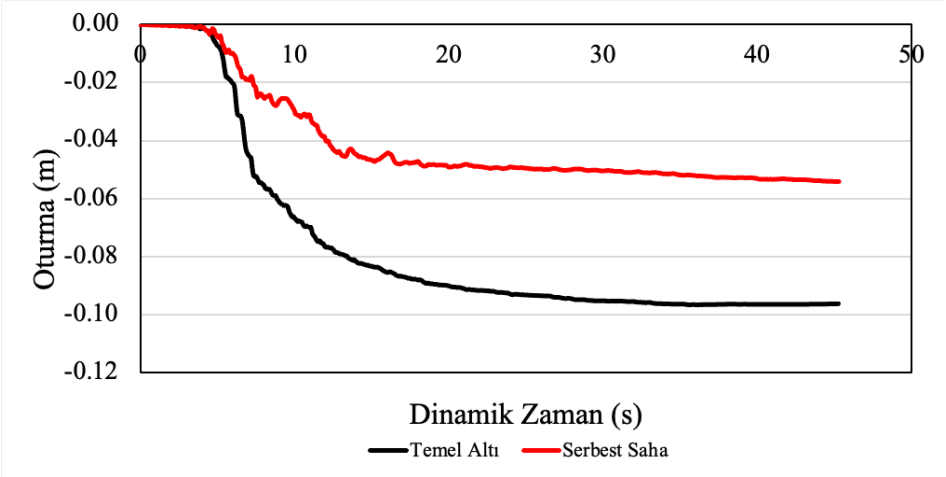
Şekil 4. Farklı senaryolara ait a) temel altında (-1 m derinlikte) gelişen düşey yer değiştirme (oturma)-zaman ilişkisi, b) ilgili sıvılaşabilir tabakanın orta derinliğinde elde edilen maksimum aşırı boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u,max}$)-zaman ilişkisi.

Şekil 4a incelendiğinde, sıvılaşabilir tabakanın zemin yüzeyine yakınlığı arttıkça temel altında gelişen oturma miktarının arttığı görülmektedir. Yüzeye en yakın tabakanın sıvılaştığı Senaryo-1'de, dinamik yükleme sonunda temel altında yaklaşık 0.35 m düzeyinde oturma gelişmiş olup bu değer, diğer üç senaryoya kıyasla belirgin ölçüde daha büyüktür. Sıvılaşabilir tabaka derinleştikçe (Senaryo-2'den Senaryo-4'e doğru), temel altında gelişen oturma miktarı azalmış ve en derin tabakanın sıvılaştığı Senaryo-4'te oturma yaklaşık 0.10 m düzeyinde kalarak dinamik yükleme sonrasında sabitlenmiştir.

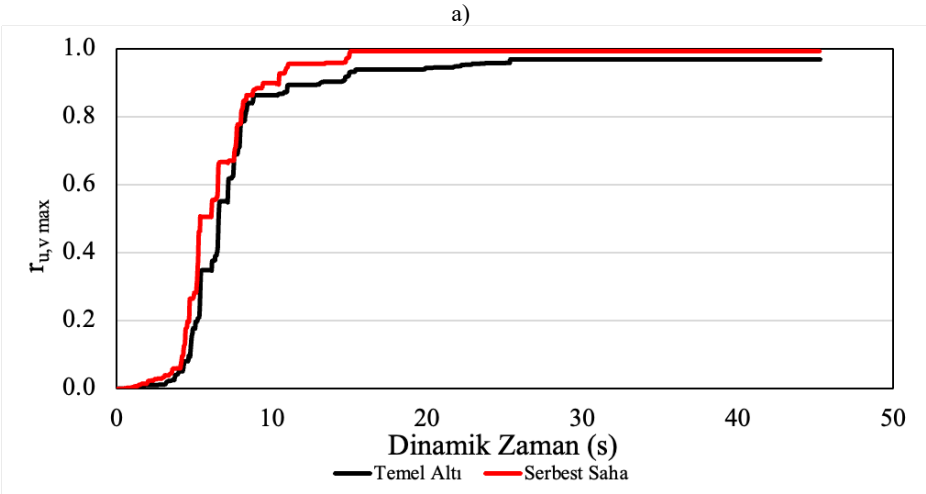
Senaryo-1'de r_u değeri sismik yüklemenin erken evrelerinde (yaklaşık 5. saniye civarında) 1.0 değerine ulaşarak sıvılaşma koşulunu sağlamış ve bu durum tabakanın hızla mukavemetini kaybetmesine ve buna bağlı olarak büyük oturmaların gelişmesine yol açmıştır (Şekil 4b). Senaryo-2 ve Senaryo-3'te r_u değerleri de yüksek seviyelere (yaklaşık 0.95-1.0) ulaşarak sıvılaşma davranışını göstermiştir. Senaryo-4'te ise $r_{u,max}$ değeri yaklaşık 0.80 düzeyinde kalmıştır.

Bu sonuçlar, sıvılaşabilir tabakanın zemin yüzeyine yakınlığı radye temel altında oluşan oturma miktarını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Senaryo-2 kapsamında, radye temel altında ve serbest saha (free-field) koşulunda birer nokta seçilerek zemin davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada serbest saha koşulu aynı sayısal model içerisinde radye temelden yaklaşık 30 m uzaklıkta, temel yükünün etkisinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı bir noktada tanımlanan zemin davranışını temsil etmektedir. Bu sayede, temel altındaki zemin davranışı ile temel etkisinden bağımsız serbest zemin davranışı, aynı model ve aynı dinamik yükleme koşulları altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir. Elde edilen sonuçlar radye temel altındaki boşluk suyu basıncı oranının (r_u) aynı senaryoda serbest zemin koşullarına kıyasla daha düşük değerlerde kaldığını, buna karşın temel altında gelişen oturma miktarının serbest zemindeki oturma miktarının daha fazla olduğunu göstermektedir (Şekil 5a ve 5b).



a)



b)

Şekil 5. Senaryo-2 için temel altı ve serbest saha koşullarında elde edilen 7.5 metredeki a) düşey yer değiştirme (oturma)-zaman, b) maksimum aşırı boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u,max}$)-zaman ilişkileri

Bu davranış, Yoshimi ve Tokimatsu (1977) ile Ayoubi ve Pak (2017) tarafından elde edilen sonuçlarla tutarlılık göstermektedir. Ayoubi ve Pak (2017), bu durumu, yapı yükünün temel altındaki r_u değerinin serbest zemine kıyasla daha düşük seyretmesine rağmen daha büyük oturmaların oluşmasına yol açtığı şeklinde açıklamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında sıvılaşabilir zemin tabakasının profildeki konumunun radye temellerin oturma davranışı üzerindeki etkisi, PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu sayısal analizler ile incelenmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren ilk 20 m'lik derinlik her biri 5 m kalınlığında dört tabakaya ayrılmış ve her bir senaryoda bu tabakalardan yalnızca birinin sıvılaşabilir olduğu varsayılarak dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Analizlerde statik yükleme aşamasında zemin davranışı HSsmall modeli ile, sıvılaşma davranışının modellendiği dinamik aşamada ise UBC3D-PLM modeli ile temsil edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Radye temel altında, deprem etkisi öncesinde statik yükler altında yaklaşık 16 mm oturma gelişmiştir.
- Sıvılaşabilir tabakanın zemin yüzeyine yakınlığı arttıkça, radye temel altında deprem yükleri altında gelişen oturma miktarı belirgin biçimde artmıştır. Yüzeye en yakın tabakanın sıvılaştığı Senaryo-1'de temel altında yaklaşık 0.35 m düzeyinde oturma gelişirken, bu değer sıvılaşabilir tabaka derinleştikçe azalmış ve en derin tabakanın sıvılaştığı Senaryo-4'te yaklaşık 0.10 m düzeyinde kalmıştır.
- Maksimum aşırı boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u,max}$) da benzer bir eğilim göstermiş; yüzeye yakın tabakalarda r_u değeri hızla 1.0'e ulaşarak sıvılaşma koşulunu sağlarken, derin tabakalarda (Senaryo-4) bu değer yaklaşık 0.82-0.83 düzeyinde kalmıştır. Bu durum, derinlikle artan efektif örtü gerilmesinin sıvılaşma direncini artırdığını göstermektedir.
- Senaryo-2 kapsamında radye temel altı ve serbest saha koşulları karşılaştırıldığında, temel altındaki $r_{u,max}$ değerinin serbest sahaya kıyasla daha düşük kaldığı, buna karşın temel altında gelişen oturma miktarının serbest sahadaki oturmadan belirgin biçimde daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, sınırlı sayıda zemin, deprem ve model parametresi ile gerçekleştirilen sayısal analizlere dayanmaktadır. Sonuçların genellenebilirliğinin artırılması amacıyla, farklı zemin bağıl sıkılığı, tabaka kalınlığı, temel geometrisi ve deprem koşullarını kapsayan kapsamlı parametrik çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Arnold, C., Macedo, J., Bray, J.D., Moug, D.M., Atalay, F., Bassal, P.C., Liu, C., Bikçe, M. ve Durgunoğlu, T. (2025), "Field Characterization of Areas in İskenderun Affected by Liquefaction during the 2023 Kahramanmaraş Earthquake", Earthquake Spectra, Vol 41, 3949-3976.

Ayoubi, P. ve Pak, A. (2017), "Liquefaction-Induced Settlement of Shallow Foundations on Two-Layered Subsoil Strata", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 94, 35-46.

Bentley Systems. PLAXIS 3D Scientific Manual 3D

Bray, J. ve Dashti, S. (2014), "Liquefaction-Induced Building Movements", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 12, 1129-1156.

Cetin K. Ö., Youd T. L., Bray J. D., Seed R. B., Sancio R. B., Lettis W., Yılmaz M. T., Stewart J. P., Durgunoğlu H. T., Onalp A. (2002), “Liquefaction-induced ground

deformations at Hotel Sapanca during Izmit-Turkey Earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12), 1083-1092.

Çetin, K.Ö., Bilge, H.T., Wu, J., Kammerer, A.M. ve Seed, R.B. (2009), "Probabilistic Model for the Assessment of Cyclically Induced Reconsolidation (Volumetric) Settlements", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 135, No 3, 387-398.

Çetin, K.Ö., Unutmaz, B. ve Jeremic, B. (2012), "Assessment of Seismic Soil Liquefaction Triggering Beneath Building Foundation Systems", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 43, 160-173.

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

Dashti, S., Bray, J.D., Pestana, J.M., Riemer, M. ve Wilson, D. (2010), "Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 136, No 1, 151-164.

Dashti, S. ve Bray, J.D. (2013), "Numerical Simulation of Building Response on Liquefiable Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 139, No 8, 1235-1249.

Dhakal, R. ve Cubrinovski, M. (2025), "Key Considerations for a Simplified Evaluation of Liquefaction-Induced Settlement", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 199, 109669.

Elgamal, A., Lu, J. ve Yang, Z. (2005), "Liquefaction-Induced Settlement of Shallow Foundations and Remediation: 3D Numerical Simulation", Journal of Earthquake Engineering, Vol 9, Special Issue, 17-45.

Flora, A., Elia, S., Valtucci, F. ve Lirer, S. (2025), "Simplified Prediction of Settlements of Shallow Foundations Caused by Earthquake-Induced Excess Pore Water Pressures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 194, 109383.

Hudson, M. B., Idriss, I. M., Beikae, M., (1994), "QUAD4M - A Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures Using Finite Element Procedures Incorporating a Compliant Base", Department of Civil & Environmental Engineering, California.

Ishihara, K. ve Yoshimine, M. (1992), "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes", Soils and Foundations, Vol 32, No 1, 173-188.

Karimi, Z. ve Dashti, S. (2016a), "Numerical and Centrifuge Modeling of Seismic Soil Foundation-Structure Interaction on Liquefiable Ground", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 142, No 1.

Karimi, Z. ve Dashti, S. (2016b), "Seismic Performance of Shallow-Founded Structures on Liquefiable Ground: Validation of Numerical Simulations Using Centrifuge Experiments", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 142, No 6.

Karimi, Z., Dashti, S., Bullock, Z., Porter, K. ve Liel, A. (2018), "Key Predictors of Structure Settlement on Liquefiable Ground: A Numerical Parametric Study", Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Kassas, K., Adamidis, O. ve Anastasopoulos, I. (2022), "Structure–Soil–Structure Interaction (SSSI) of Adjacent Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol 51, 2315-2334.

Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, 653s.

Moug, D.M., Bray, J.D., Bassal, P., Macedo, J., Ulmer, K., Cetin, K.Ö., ... ve Bikçe, M. (2024), "Liquefaction-Induced Ground and Building Interactions in İskenderun from the 2023 Kahramanmaraş Earthquake Sequence", Earthquake Spectra, Vol 40, No 2, 913-938.

Ozener, P., Monkul, M.M., Bayat, E.E., Ari, A. ve Cetin, K. (2024), "Liquefaction and Performance of Foundation Systems in Iskenderun during 2023 Kahramanmaras-Turkiye Earthquake Sequence", Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Popescu, R. ve Prevost, J.H. (1993), "Centrifuge Validation of a Numerical Model for Dynamic Soil Liquefaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 12, 73-90.

Seed, H.B. ve Lee, K.L. (1966), "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 92, No 6, 105-134.

Tokimatsu, K. ve Seed, H.B. (1987), "Evaluation of Settlements in Sands due to Earthquake Shaking", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 113, No 8, 861-878.

Tsai, C.C., Hwang, Y.W. ve Lu, C.C. (2020), "Liquefaction, Building Settlement, and Residual Strength of Two Residential Areas during the 2016 Southern Taiwan Earthquake", Acta Geotechnica, Vol 15, No 6, 1363-1379.

Unutmaz, B. & Cetin, K. (2010), “Seismic Performance Of Mat Foundations On Potentially Liquefiable Soils After 1999 Turkey Earthquakes”, Technical Report METU/GTENG 10/09-02. Ankara, Turkey: METU Soil Mechanics and Foundation Engineering Research Center, Middle East Technical University.

Unutmaz, B. ve Çetin, K.Ö. (2012), "Post-Cyclic Settlement and Tilting Potential of Mat Foundations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 43, 271-286.

Yoshimi, Y. ve Tokimatsu, K. (1977), "Settlement of Buildings on Saturated Sand during Earthquakes", Soils and Foundations, Vol 17, No 1, 23-38.

Zhang, G., Robertson, P.K. ve Brachman, R.W. (2002), "Estimating Liquefaction-Induced Ground Settlements from CPT for Level Ground", Canadian Geotechnical Journal, Vol 39, No 5, 1168-1180.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
S_V	Hacimsel kaynaklı oturma	E_{50}^{ref}	Sekant elastisite modülü
S_{SH}	Kayma kaynaklı yapı oturması	E_{oed}^{ref}	Tanjant elastisite modülü
Q	Temele etki eden düşey yük	E_{ur}^{ref}	Boşaltma-yükleme elastisite modülü
B	Temel genişliği	R_f	Göçme oranı
PGA	Maksimum yer ivmesi	m	Gerilme bağımlılığı oranı
M_w	Deprem moment büyüklüğü	$\gamma_{0.7}$	Kayma birim şekil değiştirme oranı
S_G	Toplam zemin oturması	ϕ_{cv}	Sabit hacim içsel sürtünme açısı
S_E	Ejekta (püskürük) kaynaklı oturma	ϕ_p	Pik içsel sürtünme açısı
S_B	Toplam yapı oturması	m_e	Elastik bulk modül indisi
r_u	Boşluk suyu basıncı oranı	n_e	Elastik kayma modül indisi
σ'_{vo}	Düşey efektif gerilme	n_p	Plastik kayma modül indisi
SPT $N_{1,60}$	Düzeltilmiş SPT-N değeri	k_B^e	Elastik bulk modülü faktörü
γ_{kuru}	Kuru zemin birim hacim ağırlığı	k_G^e	Elastik kayma modülü faktörü
γ_{doygun}	Doygun zemin birim hacim ağırlığı	k_G^p	Plastik kayma modülü faktörü
G_0^{ref}	Küçük birim şekil değiştirme kayma modülü		