

# SIVILAŞMA SIRASINDA BİNA PERFORMANSINA TEMEL DERİNLİĞİNİN ETKİSİNİN NÜMERİK ANALİZLERLE İNCELENMESİ

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FOUNDATION DEPTH ON BUILDING PERFORMANCE DURING LIQUEFACTION THROUGH NUMERICAL ANALYSIS

Ömer İŞKİN<sup>1</sup> Pelin ÖZENER<sup>2</sup>

### ÖZET

Depremler sırasında kohezyonsuz ve düşük kohezyonlu zeminlerde boşluk suyu basıncının ani olarak artmasından dolayı meydana gelen sıvılaşma, zeminin kayma mukavemetinin ve rijitliğinin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu durum zeminlerde deformasyonlara ve aşırı deplasmanlara neden olarak mühendislik yapılarında ciddi hasarlara yol açmaktadır. Sıvılaşmadan kaynaklanan hasarları engellemek ya da en aza indirmek amacıyla binalar yerel zemin koşullarını dikkate alarak farklı temel tipleriyle, farklı temel derinlikleriyle ya da farklı zemin iyileştirme yöntemleriyle yapılan iyileştirmelerle tasarlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde olan %35 rölatif sıklığa sahip kumlu bir zemin tabakasında yer alan farklı temel tipine sahip binaların sıvılaşma sırasındaki performansı incelenmiştir. Bu amaçla, PM4SAND bünye modeli ile maksimum ivmesi 0.17g olan bir kuvvetli yer hareketi altında, farklı temel derinliklerine (bodrumsuz, tek kat bodrumlu, çift kat bodrumlu) sahip radye temel sistemli 7 katlı bir bina analiz edilerek, bina temelinde ve bina temelinin altındaki zeminde meydana gelen oturmalar ve kayma şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Oturma değerleri, bina performansını değerlendirmek için farklı oturma miktarları ve açılal dönme değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan uluslararası standartlar ve yönetmelikler kapsamında izin verilebilir sınırlarda kalıp kalmadığı değerlendirilmiştir. Bina performansına temel derinliğinin etkisini ortaya koyma amacıyla yapılan bu çalışmada, temel derinliğinin artırılmasının, binanın sıvılaşma sırasındaki performansına etkisinin olumlu yönde olduğu ortaya konulmuştur.

*Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, PM4SAND, Temel Derinliği, Bina Performansı, Oturmalar, Kayma Şekil Değiştirmeleri*

### ABSTRACT

Liquefaction, which occurs due to the sudden increase in pore water pressure in cohesionless and low cohesion soils during earthquakes, causes significant decrease in the shear strength and rigidity of the soil. This situation causes deformations and

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, omer.iskin@std.yildiz.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, [tohumcu@yildiz.edu.tr](mailto:tohumcu@yildiz.edu.tr) (Sorumlu Yazar)



displacements in the soils and causes serious damages in engineering structures. In order to prevent or minimize the damages caused by liquefaction, buildings are designed with different foundation types, different foundation depths or improvements made with different ground improvement methods considering the local soil conditions. Within the scope of this study, the performance of buildings with different foundation types located in a sandy soil layer with a relative density of 35% and a groundwater level at the ground surface during liquefaction was investigated. For this purpose, a 7-storey building with a raft foundation system with different foundation depths (without a basement, single-storey basement, double-storey basement) under a strong ground motion with a maximum acceleration of 0.17g with the PM4SAND constitutive model was analyzed, and the settlements and shear deformations that occur in the building foundation and the ground under the building foundation were investigated. The settlement values were evaluated over different settlement amounts and angular distortion values to evaluate the building performance and it was evaluated whether they remained within the allowable limits within the scope of international standards and regulations used in civil engineering applications. In this study, which was conducted to reveal the effect of foundation depth on building performance, it was revealed that increasing the foundation depth had a positive effect on the performance of the building during liquefaction.

*Keywords: Liquefaction, Pm4Sand, Foundation Depth, Building Performance, Settlements, Shear Deformations*

## 1. GİRİŞ

Depremler sırasında sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde artık boşluk suyu basıncının artması sonucu meydana gelen büyük şekil değiştirmeler ve akmalar yapılarında, alt yapı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmaktadır. Yakın zamanda meydana gelen 2011 Christchurch ve Tohoku depremleri ile ülkemizde meydana gelen 1999 Kocaeli ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde gözlemlenen sıvılaşma kaynaklı hasarlar, bina performansının temel sisteminin davranışı ile ilişkili olduğunu göstermiştir.

Sıvılaşmadan kaynaklanan oturmaların tahmini için nümerik ve yarı-ampirik olmak üzere birçok farklı yöntem mevcuttur. Yarı-ampirik yaklaşımlarda, laboratuvar deneyleri ve arazi incelemelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda önerilen korelasyonlar kullanılırken, nümerik yöntemlerde ise matematiksel denklemlerle ifade edilen sıvılaşma davranışı genellikle sonlu elemanlar veya sonlu farklar metotları kullanılarak analiz edilmektedir. (Subaşı vd., 2022) Bu sayısal modeller ile sıvılaşma hesaplaması yapmak için birçok araştırmacı değişik bünye modelleri önermiştir. Bu yeni nesil bünye modelleri arasında UBCSand ve PM4Sand en popüler olanlarıdır. (Özenç, 2019) Plaxis2D programında yer alan bu bünye modelleri ile sıvılaşan zemin davranışının analizinin yanı sıra sıvılaşma sırasındaki ve sonrasındaki bina performansına etkiyen boşluk suyu basıncı oluşumu ve bununla bağlantılı oturma ve kayma şekil değiştirmeleri de analiz edilebilmektedir. Deprem sonrasında sahada yapılan gözlemler ve araştırmalar ise temel türünün, derinliğinin ve boyutunun gözlemlenen hasar seviyesini belirlediğini ortaya çıkarmıştır (Özener vd., 2024).



Bu çalışma kapsamında, rölatif sıklığı %35 olan sıvılaştırılabilir bir zemin tabakası oluşturulmuş, maksimum ivmesi 0.17g olan bir kuvvetli yer hareketi kullanılmıştır. Sıvılaşma davranışı bir sonlu eleman yazılımı olan Plaxis2D yazılımında yer alan PM4SAND bünye modeli ile modellenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen nümerik analizlerde, sıvılaşma sırasında temel derinliğinin etkisini görmek amacı ile radye temel sistemine sahip 7 katlı bir bina; bodrumsuz, tek kat bodrumlu ve çift kat bodrumlu olarak nümerik analizlerde dikkate alınmıştır. Bina temelinde ve bina altında yer alan zeminde sıvılaşma sırasında meydana gelen oturmalar ve kayma şekil değiştirmeleri incelenmiş olup meydana gelen oturma değerleri, bina performansını değerlendirmek için farklı oturma miktarları ve açılal dönme değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan uluslararası standartlar ve yönetmelikler kapsamında izin verilebilir sınırlarda kalıp kalmadığı değerlendirilerek bina performansına temel derinliğinin etkisi incelenmiştir.

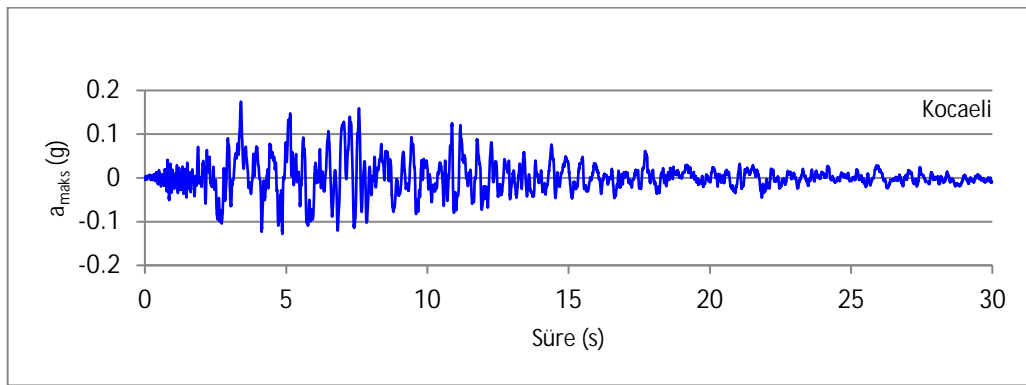
## 2. NÜMERİK ANALİZLER

### 2.1. Deprem Kaydı

Bu çalışmada, 17.08.1999 tarihinde gerçekleşen  $M_w=7.6$  büyüklüğündeki Kocaeli Depremi'nin İzmit İstasyonu'na ait deprem kaydının ilk 30 saniyesi kullanılmıştır. Kuvvetli yer hareketi kaydına Plaxis2D yazılımı üzerinden yapılan öteleme düzeltmesi haricinde herhangi bir düzeltme yapılmamış olup kuvvetli yer hareketi kayıtlarının özellikleri Tablo 1'de, ivme-zaman değişimi ise Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kuvvetli Yer Hareketi Özellikleri

Deprem Adı	Kırılma Mekanizması	$V_{s30}$ (m/s)	Süre(s)	$M_w$	PGA(g)	$f_{eq}$ (Hz)	$I_a$ (m/s)
Kocaeli	Doğrultu Atımlı	827	30	7.6	0.17	1.91	0.6

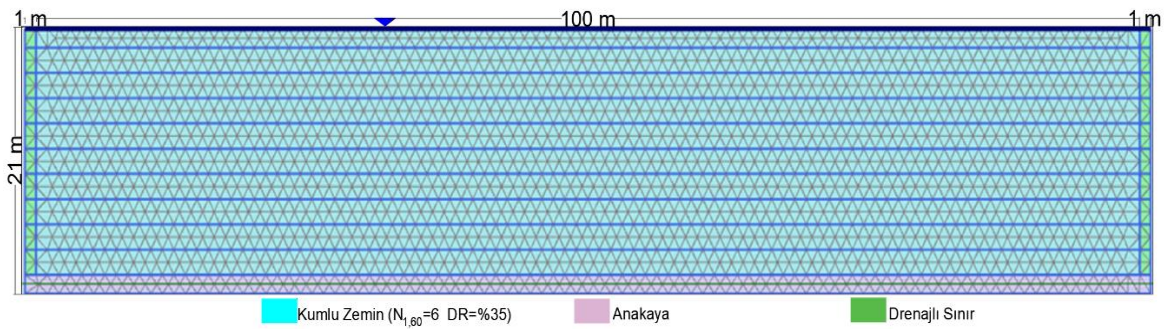


Şekil 1. Nümerik Analizlerde Kullanılan Kocaeli Depremi İzmit İstasyonu'nda Ölçülen İvme-Zaman Kaydı



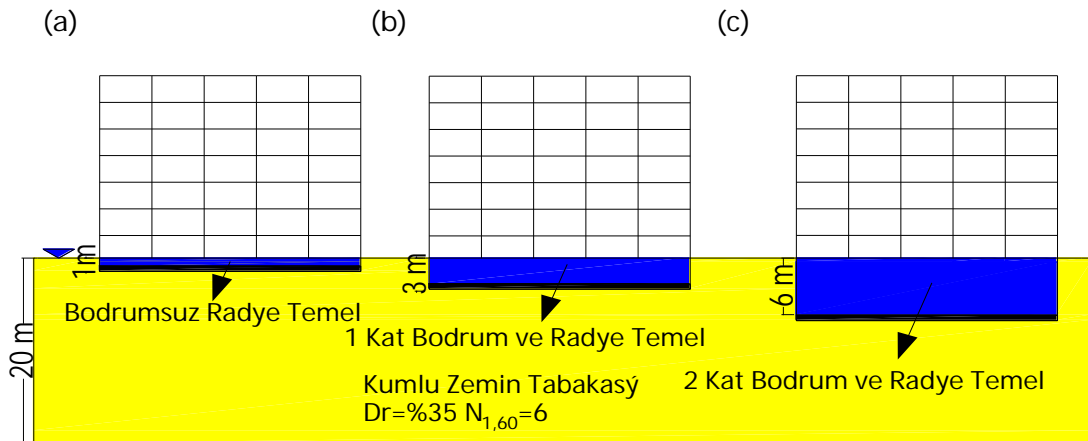
## 2.2. Nümerik Modeller

Bu çalışmada, rölatif sıklığı %35 olan 20 metre kalınlığında bir kumlu zemin tabakası ve 1 metre kalınlığında anakaya tabakası tanımlanmıştır. Modelde yeraltı su seviyesi zemin yüzeyindedir. Modelin toplam genişliği 102 metredir. Modelin düşey sınırları ve üst sınır koşulları "Free-Field", alt sınırı ise "Compliant Base" olarak seçilmiştir. Analizlerde deprem kaydı modelin tabanına tanımlandığı için aşağı yönde ve yukarı yönde yönde yayılan deprem dalgaları birleşerek sistemde iki katına çıkmasının engellenmesi gerekmektedir. Bu yüzden "Compliant Base" olarak seçilen alt sınır kısmına x yönünde değeri 0.5 olan bir "Line Displacement" eklenmelidir. (Plaxis,2018) Eklenen "Line Displacement" x yönünde tanımlı yer değiştirme (prescribed displacement), y yönünde ise sabit (fixed) olarak uygulanmıştır. Nümerik analizlerde kullanılan zemine ait sonlu elemanlar ağı Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Nümerik Analizlerde Kullanılan Zemine Ait Sonlu Elemanlar Ağı

Nümerik analizlerde Şekil 3'de görüldüğü gibi 20 metre kalınlığında gevşek, sıvılaşabilir kumlu zemin tabakası üzerinde yer alan farklı temel tipine sahip 3 farklı yapı dikkate alınmıştır. Şekil 3'de gösterilen 7 katlı binaların genişliği 25 metre olup 60 cm kalınlığında radye temele sahiptirler. Şekil 3a'da gösterilen bina zemin yüzeyinden 1 metre derinlikte, Şekil 3b'de gösterilen bina zemin yüzeyinden 3 metre derinlikte ve Şekil 3c'de gösterilen bina zemin yüzeyinden 6 metre derinlikte yer almaktadır.



Şekil 3. Bina Modelleri (a) Bodrumsuz Bina, (b) Tek Kat Bodrumlu Bina ve (c) Çift Kat Bodrumlu Bina

Analizlerde kullanılan zemine ait malzeme parametreleri Tablo 2’de, binaların yapısal elemanlarına ait malzeme parametreleri Tablo 3’de gösterildiği gibidir.

Tablo 2. Zemine Ait Malzeme Parametreleri (Subaşı vd., 2022) (Boulanger vd., 2017) (Bringreave vd., 2010) (PLAXIS Connect Edition V22.02 2023)

Pm4Sand		Hardening Small Strain		Lineer Elastik (Anakaya)	
Drenaj Tipi	Undrained A	Drenaj Tipi	Undrained A	Drenaj Tipi	Drained
$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.34	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.34	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	22
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.36	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.36	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	22
e	0.695	e	0.695	e <sub>init</sub>	0.5
Dr <sub>0</sub>	0.35	Dr <sub>0</sub>	0.35	Rayleigh $\alpha$	0
G <sub>0</sub>	476	E <sub>50ref</sub> (MPa)	21	Rayleigh $\beta$	0
hp <sub>0</sub>	0.53	E <sub>oed ref</sub> (MPa)	21	E <sub>ref</sub> (MPa)	8
e <sub>maks</sub>	0.8	E <sub>uref</sub> (MPa)	63	$\nu$	0.2
e <sub>min</sub>	0.5	m	0.59	G <sub>ref</sub> (MPa)	3.33
Pa (MPa)	0.101	c' (MPa)	0	E <sub>oed</sub> (MPa)	8.889
n <sub>b</sub>	0.5	$\Phi'$ (°)	33	V <sub>s</sub> (m/s)	1219
n <sub>d</sub>	0.1	$\gamma_{0.7}$	0.00017	V <sub>p</sub> (m/s)	1991
$\Phi_{cv}$ (°)	33	G <sub>0ref</sub> (MPa)	83.8		
$\nu$	0.3	$\nu$	0.3		
Q	10	P <sub>ref</sub> (MPa)	0.1		
R	1.5	R <sub>r</sub>	0.956		

Tablo 3. Binaın Yapısal Elemanlarına Ait Malzeme Parametreleri (PLAXIS 2023)

Bina		Kolon		Temel	
Malzeme Tipi	Elastik	Malzeme Tipi	Elastik	Malzeme Tipi	Elastik
w (kN/m/m)	10	L <sub>spacing</sub> (m)	3	w (kN/m/m)	20
Rayleigh $\alpha$	0.232	EA (MPa)	2.5	Rayleigh $\alpha$	0.232
Rayleigh $\beta$	0.008			Rayleigh $\beta$	0.008
EA (MPa)	9			EA (MPa)	45
EI (kNm <sup>2</sup> /m)	67500			EI (kNm <sup>2</sup> /m)	1350000
$\nu$	0			$\nu$	0
				d (m)	0.6

### 2.3. Nümerik Analiz Aşamaları

Serbest sahanın analizleri 3 aşamada, yapı içeren analizler ise 4 aşamada gerçekleştirilmiştir.

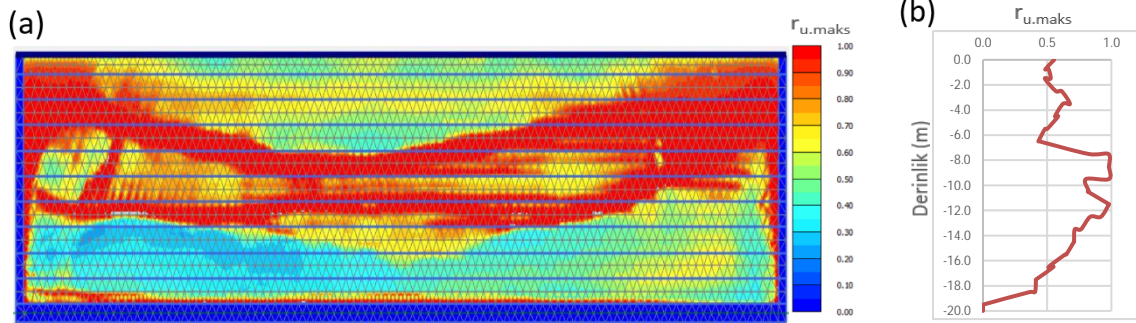
- 1.Aşama: K0 prosedürü ile başlangıç aşaması gerçekleştirilmiştir.
- 2.Aşama: HS-Small zemin modeli ile başlangıç gerilme durumu modellenmiştir. Bu aşamada herhangi bir dinamik yükleme yapılmamıştır.
- 3.Aşama: Yapı içeren analizlerde yapı elemanları bu aşamada aktif hale getirilmiştir. Serbest saha analizinde bu aşama yer almamaktadır.
- 4.Aşama: Dinamik analizler Pm4Sand bünye modeliyle bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Zeminin ve binaın sismik sıvılaşma sırasındaki davranışı bu aşamada gözlemlenmektedir.



## 2.4. Nümerik Analiz Sonuçları ve Bina Performansı Açısından Değerlendirilmesi

Plaxis2D yazılımında yer alan Pm4Sand bünye modeliyle yapılan sıvılaşma analizleriyle, serbest sahanın merkezinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayılarının derinlikle değişimleri, temelin sol köşesinde, merkezinde ve sağ köşesinde sıvılaşmadan kaynaklanan oturmalar, kayma şekil değiştirmeleri ve temel merkezinin altındaki zeminde meydana gelen oturmaların ve kayma şekil değiştirmelerinin derinlikle değişimi gözlemlenmiştir. Oturma değerleri, bina performansını değerlendirmek için farklı oturma miktarları ve açıl dönme değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan uluslararası standartlar ve yönetmelikler kapsamında izin verilebilir sınırlarda kalıp kalmadığı değerlendirilmiştir.

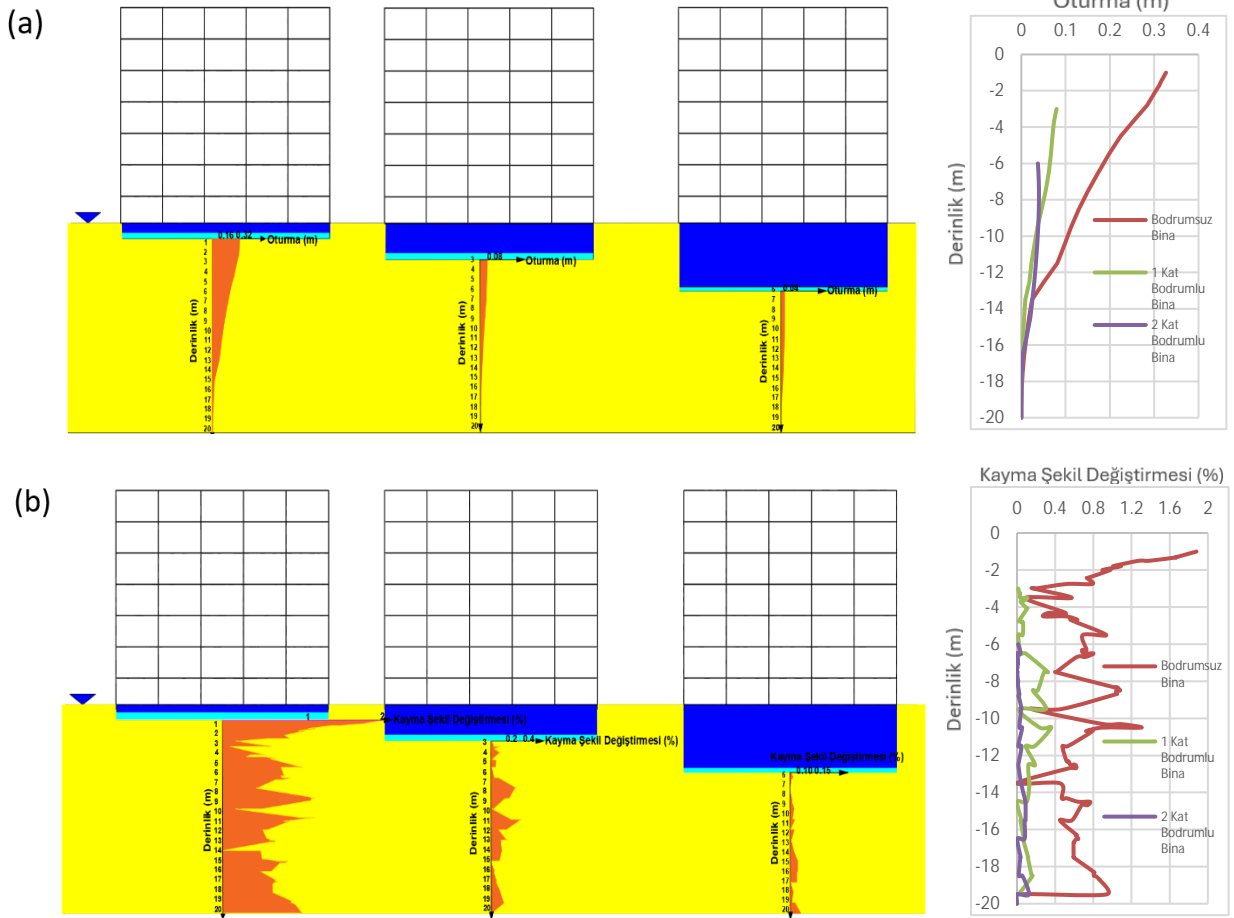
Serbest saha analizinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayılarının ( $r_{u,maks}$ ) sonlu elemanlar ağındaki gösterimi Şekil 4a'daki gibidir. Zemin modelinin orta noktasında meydana gelen maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayılarının derinlikle değişimi Şekil 4b'de gösterildiği gibidir. Zemin modelinin orta noktasında meydana gelen sıvılaşmadan kaynaklanan deformasyonlar, 7.2 metre derinlikte maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayısının 0.7 değerine ulaşmasıyla başladığı gözlemlenmektedir. 7.5 metre derinlikte maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayısı 1 değerine ulaşarak tam sıvılaşma davranışı meydana gelmiş olup 9.5 metre derinliğe kadar tam sıvılaşma davranışının devam ettiği gözlemlenmektedir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı katsayısının 0.7 değerine ulaştığı son derinlik 14.5 metredir ve bu derinlikten sonra sıvılaşma davranışı gözlemlenmemektedir.



Şekil 4. (a) Serbest Saha Analizinde Oluşan  $r_{u,maks}$ 'ların Sonlu Elemanlar Ağı ile Gösterimi (b) Zemin Modelinin Orta Noktasında Oluşan  $r_{u,maks}$ 'ların Derinlikle Değişimi

Bodumsuz, 1 kat bodrumlu ve 2 kat bodrumlu binaların yer aldığı analizlerde elde edilen oturmaların derinlikle değişimi Şekil 5a'da gösterildiği gibidir. Bodumsuz binanın merkezinin altındaki zeminde meydana gelen oturmaların derinlikle değişiminin bodrumlu binaların altındaki zemine göre oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. En düşük oturmalar, 2 kat bodrumlu binanın merkezinin altındaki zeminde gözlemlenmiştir. Bodumsuz, 1 kat bodrumlu ve 2 kat bodrumlu binaların yer aldığı analizlerde elde edilen kayma şekil değiştirmelerinin derinlikle değişimi Şekil 5b'de gösterildiği gibidir. Bodumsuz binanın temel merkezinin altındaki zeminde oluşan kayma şekil değiştirmeleri bodrumlu binalara göre oldukça yüksek olup, en düşük miktarda meydana gelen kayma şekil değiştirmeleri 2 kat bodrumlu binanın merkezinin altındaki zeminde olduğu görülmektedir.





Şekil 5. (a) Bina Merkezlerinin Altındaki Zeminde Oluşan Oturmaların Derinlikle Değişimi  
(b) Bina Merkezlerinin Altındaki Zeminde Oluşan Kayma Şekil Değişirirmelerinin Derinlikle Değişimi

Binaların sınılaşma sırasındaki performansını incelemek amacıyla bina temelinin köşe noktalarında ve merkezinde meydana gelen kayma şekil değiştirmeleri ( $\gamma_{maks}$ ) Tablo 4’de ve oturmalar Tablo 5’de gösterilmiştir. Farklı derinliklerdeki binaların tümünde temellerinin köşe noktalarında oluşan maksimum kayma şekil değiştirmelerinin, temel merkezlerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bodrmsuz binanın temelinde oluşan kayma şekil değiştirmelerinin, temelin her noktasında bodrumlu binalarda oluşan kayma şekil değiştirmelerinden daha yüksek olduğu, 2 kat bodrumlu binanın temelindeki kayma şekil değiştirmelerinin, 1 kat bodrumlu binaya göre temel merkezinde daha düşük olduğu, temelin köşe noktalarında ise benzer kayma şekil değiştirmelerinin oluştuğu gözlemlenmektedir.

Sismik zemin sınılaşması sırasında binalarda meydana gelen oturmalar incelediğinde, binalarda farklı oturmalar olduğu gözlemlenmiştir. Binaların temellerinde sınılaşma sırasında meydana gelen toplam oturma değerleri incelendiğinde, bodrmsuz binanın temelinde meydana gelen maksimum oturma miktarı 35.4 cm, temelin köşe noktaları arasındaki farklı oturma miktarı 15.3 cm ve açisal dönme ise 0.0061 olarak hesaplanmıştır.

Tek kat bodrumlu binanın temelinde meydana gelen en büyük oturma miktarı 17.2 cm, temelin köşe noktaları arasındaki farklı oturma miktarı 5 cm ve açıl dönme miktarı ise 0.002 olup, çift kat bodrumlu binanın temelindeki maksimum oturma miktarı 14.4 cm, temelin köşe noktaları arasındaki oturmalar farkı 2.8 cm ve açıl dönme miktarı 0.0011 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan oturma, farklı oturma ve dönme miktarları Tablo 5’ de özetlenmiştir. Hesaplanan bu değerlerin izin verilen sınırların içerisinde kalıp kalmadığını belirlemek amacı ile Tablo 6’da gösterilen Avrupa Standardizasyon Komitesi’nin çeşitli bina ve temel tipleri için farklı oturma, toplam oturma ve dönme miktarına göre önerdiği kriterler dikkate alınmıştır. Buna göre, bodrumsuz, tek kat bodrumlu binalarda sıvılaşma sırasında meydana gelen toplam oturmaların ve farklı oturmaların izin verilebilir değerleri aştığı, iki kat bodruma sahip binada ise farklı oturma ve açıl dönmenin izin verilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Sıvılaşabilir zeminler üzerinde konumlanan farklı temel derinliğine sahip binaları temsil eden yukarıdaki sayısal analiz sonuçlarına göre, bodrum kat sayısının sıvılaşma sırasında meydana gelen oturmaları tolere edebilmek açısından olumlu katkıları olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Binaların Temelinde Oluşan Maksimum Kayma Şekil Değişimleri

	Maksimum Kayma Şekil Değişimi (%)		
	Temelin Sol köşesi	Temel Merkezi	Temelin Sağ Köşesi
Bodrumsuz Bina	0.244	0.0849	0.126
1 Kat Bodrumlu Bina	0.173	0.0198	0.064
2 Kat Bodrumlu Bina	0.187	0.00986	0.064

Tablo 5. Binaların Temelinde Oluşan Oturmalar

	Oturma (cm)		
	Temelin Sol köşesi	Temel Merkezi	Temelin Sağ Köşesi
Bodrumsuz Bina	20.1	31.1	35.4
1 Kat Bodrumlu Bina	12.2	14.8	17.2
2 Kat Bodrumlu Bina	14.4	1.6	11.6

Tablo 6. Avrupa Standardizasyon Komitesi’nin Farklı Oturma Parametrelerine İlişkin Önerileri (Avrupa Standardizasyon Komitesi 1994a ve 1994b)

	Parametre	Büyükük	Temel tipi
Hizmet Edebilirlik için Sınır Değerler (Avrupa Standardizasyon Komitesi, 1994a)	$S_T$	50 mm	Radye Temel için
	$\Delta S_T$	5 mm	Rijit Kaplamalı Çerçeveler için
	$\beta$	1/500	-
Kabul Edilebilir Maksimum Temel Hareketi (Avrupa Standardizasyon Komitesi, 1994b)	$S_T$	50 mm	izole Yüzeysel Temeller için
	$\Delta S_T$	20mm	izole Yüzeysel Temeller için
	$\beta$	$\approx 1/500$	-





### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımında yer alan Pm4Sand modeli ile yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde olan %35 rölatif sıklığa sahip kumlu bir zemin tabakası kullanılarak zemin profili oluşturulmuştur. Sıvılaşma sırasında, bina performansına temel derinliğinin etkisini incelemek amacıyla, aynı zemin üzerinde farklı temel derinliklerine (bodumsuz, tek kat bodrumlu, çift kat bodrumlu) sahip radye temel sistemli, 7 katlı bir bina inşa edilerek, binada ve temel altındaki zeminde meydana gelen oturmalar ve kayma şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Analizler sırasında hesaplanan oturma değerleri, bina performansını değerlendirmek için farklı oturma miktarları ve açısız dönme değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan uluslararası standartlar ve yönetmelikler kapsamında izin verilebilir sınırlarda kalıp kalmadığı belirlenmiştir.

Yapılan çalışma, temel derinliğinin artırılmasının, binanın sismik sıvılaşma sırasındaki performansını olumlu yönde etkilediğini, kayma şekil değiştirmelerinin, oturmaların, temeldeki farklı oturmalar ve açısız dönme miktarlarının tolere edilebilir mertebelerde kaldığını göstermiştir.

### KAYNAKLAR

- Seed, H.B., Arango, I., and Chan, C.K. (1975), "Evaluation of Soil Liquefaction Potential during Earthquakes", Report, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA, Vol 75,28.
- Subaşı, O., ve İyisan, R., (2022), "Sıvılaşma Nedeniyle Meydana Gelen Oturmaların Pm4Sand Bünye Modeli ile İncelenmesi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol 28, No. 3, 378-388.
- Özenç, S. (2019), "Pm4Sand Zemin Bünye Modeline Ait Parametrelerin Yüzeysel Temellerde Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyonlara Etkisi" Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Özener, P., Monkul, M.M., Bayat, E.E., Ari, A., Çeçen, K.Ö., (2024), "Liquefaction and Performance of Foundation Systems in Iskenderun during 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquake Sequence", Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal, Vol 178, 108433.
- PLAXIS (2018), "PLAXIS The Pm4Sand model 2018", Editors: Vilhar G., Brinkgreve R.B.J., Zampich L., (2018), Bentley Advancing Infrastructure
- Skempton, A.W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation", *Geotechnique*, Vol 36, 425-447.
- Kuhlemeyer, R.L., ve Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol 99, No.5, 421-427.
- PLAXIS (2023), "PLAXIS 2D 2023.2 Reference Manual 2D", Bentley Advancing Infrastructure
- Hudson, M., Idriss, I.M., ve Beikae, M. (1994), "User's Manual for QUAD4M. Center for Geotechnical Modeling", University of California, Davis, USA.



- Andrus, R.D., and Stokoe, K.H. (2000), "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol 126, No.11, 1015.
- Boulanger, R.W., ve Ziotopoulou, K. (2017), "PM4Sand (version 3.1 Revised July 2018), A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications", Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, USA, Scientific Report, UCD/CGM-17/01.
- Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., ve Engin, H.K. (2010), "Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters For Sands", Editors: Benz, T., Nordal, S. (2010), Numerical Methods in Geotechnical Engineering, CRC Press, Balkema, Rotterdam, 137-142.
- PLAXIS Connect Edition V22.02 (2023), "User Defined Soil Models-Pm4Sand: A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering", Bentley Advancing Infrastructure
- PLAXIS (2023), "PLAXIS 2D 2023.2 Tutorial Manuel 2D", Bentley Advancing Infrastructure
- European Committee for Standardization (1994a) and (1994b), Basis of Design and Actions on Structures, Eurocode 1, Brussels, Belgium

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$V_{s30}$	Kayma Dalgası Hızı	$m$	Gerilme Bağımlılığı Oranı
$M_w$	Moment Büyüklüğü	$G_{0ref}$	Çok Küçük Birim Deformasyon Kayma Modülü
$f_{eq}$	Fourier Dönüşümündeki Maksimum Frekans	$P_{ref}$	Referans Gerilme Seviyesi
$I_a$	Arias Şiddeti	$R_f$	Göçme Oranı
$a_{maks}$	Maksimum İvme	$e_{init}$	Başlangıç Boşluk Oranı
$g$	Yer Çekimi İvmesi	$E'_{ref}$	Young Modülü
$N_{160}$	Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı	$G_{ref}$	Kayma Modülü
$f_{maks}$	Deprem Kaydının Maksimum Frekansı	$E_{oed}$	Ödometre Modülü
$\gamma_k$	Kuru Birim Hacim Ağırlık	$V_p$	Basınç Dalgası Hızı
$\gamma_d$	Doygun Birim Hacim Ağırlık	$w$	Ağırlık
$e$	Boşluk Oranı	Rayleigh $\alpha$	Rayleigh Sönüm Oranı Parametresi
$D_{r0}$	Rölatif Sıkılık	Rayleigh $\beta$	Rayleigh Sönüm Oranı Parametresi
$G_o$	Kayma Modülü Katsayısı	EA	Eksenel Rijitlik
$h_{p0}$	Sıkışma Oranı Parametresi	EI	Eğilme Rijitliği
$e_{maks}$	Maksimum Boşluk Oranı	$L_{spacing}$	Düzlem Dışı Boşluk
$e_{min}$	Minimum Boşluk Oranı	$d$	Temel Yüksekliği
$n_b$	Sınır Yüzeyi Parametresi	$\gamma_{u,maks}$	Maksimum Aşırı Boşluk Suyu Basıncı Katsayısı
$n_d$	Dilatasyon Yüzeyi Parametresi	$\gamma_{maks}$	Maksimum Kayma Şekil Değiştirmesi
$\nu$	Poisson Oranı	$S_T$	Toplam Oturma
Q, R	Kritik Durum Parametreleri	$\Delta S_T$	Temeldeki Oturmalar Farkı
$E_{50ref}$	Sekant Elastisite Modülü	$\beta$	Açısal Dönme
$E_{oedref}$	Tanjant Elastisite Modülü	$c'$	Efektif Kohezyon
$E_{urref}$	Boşaltma-Yükleme Elastisite Modülü	$\phi'$	Efektif Sürtünme Açısı
$m$	Gerilme Bağımlılığı Oranı		

