

## YAPI ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN NÜMERİK ANALİZ İLE İNCELENMESİ (SIVILAŞMA VAKA ÖRNEĞİ)

### INVESTIGATION OF STRUCTURE-SOIL INTERACTION BY NUMERICAL ANALYSIS (CASE STUDY OF LIQUEFACTION)

Muharrem Aybars BÜYÜK<sup>1</sup> Berna UNUTMAZ<sup>2</sup> Banu İKİZLER<sup>3</sup>

#### ÖZET

Depremler sonucu meydana gelen yıkımı ve mühendislik yapılarındaki hasarları etkileyen faktörlerden en önemlilerinden biri, dinamik yükler altında zemin içerisinde oluşan deformasyonlardır. Özellikle suya doygun gevşek kumlu zeminler gibi sıvılaşmaya karşı hassas zeminlerde deprem etkisi altında boşluk suyu basıncında artış meydana gelmekte ve zemin bu şekilde taşıma gücünü kaybetmektedir. Bu da hem zemin içerisinde büyük deformasyonlara hem de zemin üzerinde bulunan mühendislik yapılarında toptan göçmeye varan büyük hasarlara sebep olmaktadır. İlgili literatür incelendiğinde ülkemizde gerçekleşen depremler sonucu yerel zemin koşullarından dolayı yapısal hasar oluşmuş pek çok vaka örneği bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında 1999 Kocaeli Depremi esnasında Adapazarı'nda sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı sebebiyle hasar görmüş bir yapının temel zeminin, Sakarya istasyonundan elde edilen deprem kaydının efektif 20 saniyelik kısmı altındaki davranışı incelenmektedir. Yapının üzerinde bulunduğu sahanın yerel zemin koşulları ve mühendislik özellikleri sahada gerçekleştirilen sondaj, arazi deneyleri ve çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılardan yararlanılarak belirlenmiştir. Zeminin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, yapının deprem esnasındaki davranışını ve Yapı-Zemin etkileşimini incelemek için PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı yardımıyla nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen sonuçlar ile deprem sonrası elde edilen gözlemlerle karşılaştırılmıştır.

*Anahtar Kelimeler: Nümerik Analiz, Sıvılaşma, Yapısal Hasar, Zemin Deformasyonu.*

#### ABSTRACT

One of the most important factors affecting the destruction caused by earthquakes and damage to engineering structures is the deformations that occur in the soil under dynamic

<sup>1</sup> Arş. Gör. , Atılım Üniversitesi, aybars.buyuk@atilim.edu.tr (Sorumlu Yazar)

<sup>2</sup> Prof. Dr. , Hacettepe Üniversitesi, berna.unutmaz@hacettepe.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr. , Karadeniz Teknik Üniversitesi, banuh@ktu.edu.tr



loads. Especially in soils susceptible to liquefaction such as saturated loose sandy soils, an increase in the pore water pressure occurs under the earthquake effect and the soil loses its bearing capacity in this way. This causes both large deformations within the soil and large damages up to total collapse in the engineering structures on the ground. When the related literature is examined, there are many examples of structural damage due to local soil conditions as a result of earthquakes in our country. In this study, the behaviour of the foundation soil of a structure damaged due to liquefaction and loss of bearing capacity during the 1999 Kocaeli Earthquake in Adapazarı is investigated. The local soil conditions and engineering properties of the site on which the structure is located are determined by utilising borings, field tests and relations proposed by various researchers. Liquefaction analysis was performed to determine the liquefaction potential of the soil. In addition, a numerical analysis was carried out with the help of PLAXIS 2D finite element software to investigate the behaviour of the structure during earthquake and the structure-soil interaction. The results obtained from the analyses were compared with the observations obtained after the earthquake.

*Keywords: Numerical Analysis, Liquefaction, Structural Damage, Soil Deformation.*

## 1.GİRİŞ

17 Ağustos 1999 tarihinde Marmara Bölgesinde gerçekleşen ve Kocaeli Depremi (Mw=7.4) olarak anılan deprem Türkiye'nin Kuzeybatı bölgesinin büyük bir kısmını etkilemiş ve bölgede yüzlerce yapı oturmuş, devrilmiş veya göçmüştür. Bu büyük hasarlara neden olan etmenleri incelemek için birçok araştırma gerçekleştirilmiştir (Bay ve Cox, 2001; Sancio 2003; Bray vd., 2011). Hasarların oluşmasında fay kırığı özellikleri, bölgenin jeolojik ve geoteknik yapısı ve yerel zemin koşulları gibi etmenlerin etkili olduğu ifade edilmektedir.

Kocaeli depreminde en çok yıkıma uğrayan bölgelerden bir tanesi de Adapazarı'dır. Bölgedeki yıkımın büyük bir kısmı, Sakarya Nehrinin taşırken biriktirmesi sonucu oluşan düşük plastisiteli silt tabakalarına ve fay kırığına olan yakınlığına bağlanmıştır. Oluşan bu tür siltli zeminlerinde kumlara benzer şekilde sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu 1999 yılında meydana gelen Marmara depreminde doğrulanmıştır (Arel ve Önalp, 2012).

Bu çalışma kapsamında Kocaeli Depremi esnasında Adapazarı'nda sıvılaşma ve zemin taşıma gücü kaybı sebebiyle hasar alan bir yapının vaka analizi gerçekleştirilmiştir. Binanın bulunduğu bölgenin yerel zemin koşulları deprem sonrası ilgili alanda gerçekleştirilen arazi deney sonuçları ile literatürde önerilen ampirik bağıntılar ve laboratuvar deneyleri yardımıyla bulunmuştur. Bölgedeki zeminin sıvılaşma potansiyelini belirlemek amacıyla da sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zemin sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşmaya bağlı bina oturması nümerik analizlerle incelenmiştir. Plaxis 2D programında zemin modeli olarak UBC3D-PLM kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiş ve serbest saha ile bina etkisi koşullarında deprem esnasında meydana gelen aşırı boşluksuyu basınçları ve oturma değeri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar yerinde gözlemlerle karşılaştırılmıştır.

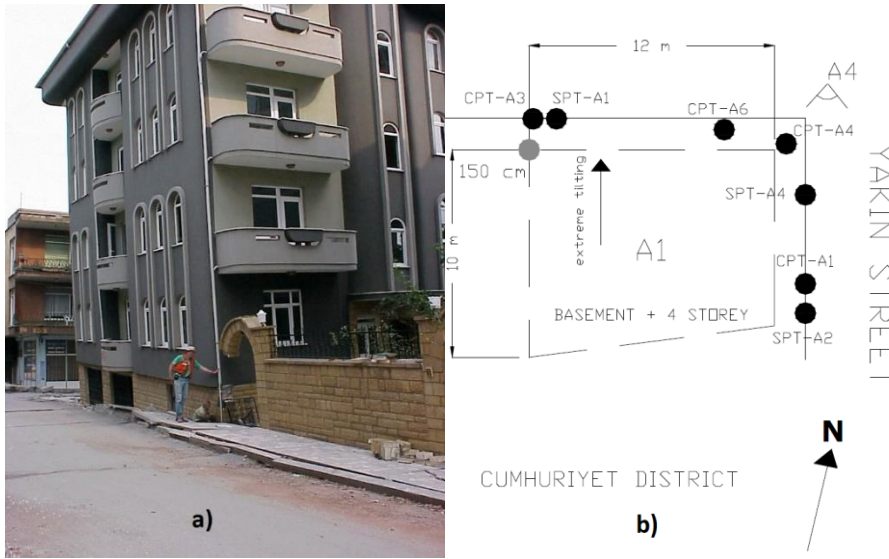


## 2. VAKA ÖRNEĞİ VE YEREL ZEMİN KOŞULLARI

Vaka çalışması, 1999 Kocaeli depremi sırasında Adapazarı, Cumhuriyet Mahallesi, Tül Caddesi boyunca, Yakın ve Telli sokakları arasında bulunan ve Şekil 1'de gösterilen 5 katlı betonarme bir binanın (Sancio (2003)'de Bina A1 olarak adlandırılmıştır) analizinden oluşmaktadır. A1 binası düzensiz bir planda olup ve Doğu-Batı yönünde 12 m ve Kuzey-Güney yönünde ise 10 m'lik genişliklere sahiptir. Bina yüksekliği ise yaklaşık 14 m'dir. Adapazarı' da görülen temel sistemlerinin çoğuyla uyumlu şekilde, bu yapının temeli 1,20 metre yüksekliğinde bağ kirişleriyle güçlendirilmiş 0,30 metre kalınlığında betonarme bir temelden oluşmakta ve bina çizimlerine göre temel alt kotu zemin kotundan itibaren 1.5 m aşağıda bulunmaktadır (Sancio, 2003).

Deprem sonrası gerçekleştirilen saha gözlemlerine göre, bina Güney-Doğu köşesinde 15 cm ve Kuzey-Batı köşesinde 150 cm'lik farklı oturmaya maruz kalmıştır. Farklı oturmaya bağlı olarak bina batıya doğru 3° ve kuzeye doğru 5° eğilmiştir (Sancio, 2003).

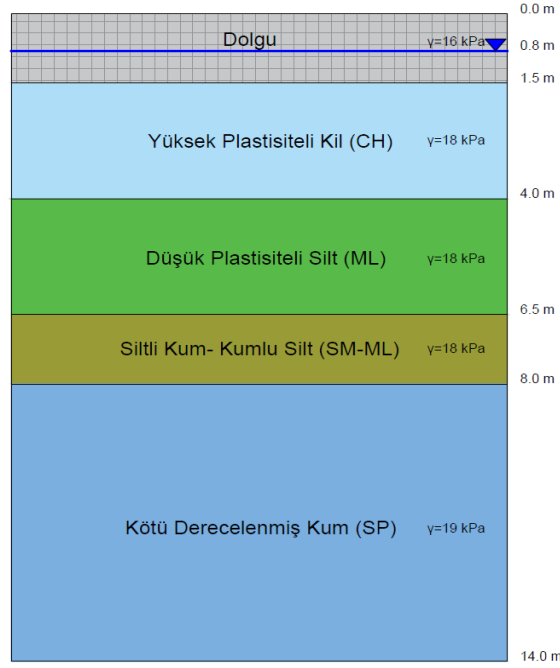
Şekil 1. b' de bulunan siyah noktalar arazide gerçekleştirilen standart penetrasyon deneyleri (SPT) ve koni penetrasyon deneylerini (CPT) temsil etmektedir. Sancio (2003)'nun çalışmasında yerel zemin koşullarının belirlenmesi amacıyla 3 adet SPT, 4 adette CPT deneyi ile önemli miktarda laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir.



Şekil 1. a) A1 binasının deprem sonrası görünümü, b) A1 binasının genel görünümü (Sancio, 2003)

Arazide gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler ve literatürde önerilen bağıntılardan yararlanarak temel altındaki zemin profili belirlenmiştir. İnceleme derinliği yaklaşık olarak 14 m olmak üzere, ilk 1.5 m'de dolgu bulunurken, 1.5 ve 4. m arasında yumuşak yüksek plastisiteli bir kil (CH) bulunmaktadır. Bu tabakanın altında ise 2.5m kalınlığında düşük plastisiteli bir silt (ML) tabakası olduğu belirlenmiştir. Onun altında ise 6.5-8 m arasında orta sıkılıkta siltli kum – kumlu Silt (SM-ML) tabakası bulunurken, en altta ise 6 m kalınlığında kötü derecelenmiş sıkı kum tabakası (SP) bulunmaktadır (Şekil 2).





Şekil 2. Zemin profili

### 3.SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

#### 3.1. Çin Kriterleri'ne göre Sıvılaşma Potansiyelleri

Seed ve Idriss (1982) ince daneli zeminlerin (yani plastisite tablosundaki A çizgisinin üzerindeki zeminler) ancak aşağıdaki koşulların üçünün de karşılanması halinde sıvılaşmaya duyarlı olabileceğini belirtmiştir: 1)  $5 \mu\text{m}$ 'den az yüzde  $< \%15$ , 2)  $LL < 35$  ve 3)  $w_c/LL > 0.9$ . Kökeni nedeniyle bu standart literatürde "Çin kriteri" olarak bilinmektedir.

Eğer biraz muhakeme yapılırsa, vaka örneğinin bulunduğu bölgeden alınan numunelerin birçoğunun Çin Kriteri'ne göre sıvılaşma potansiyeli olduğu düşünülebilir. Örneğin, zemin profilinin 3. tabakası olan Silt (ML) tabakasının 4.24 m derinliğinden alınan numune  $LL = 29$ ,  $w_c/LL = 1.0$  ve  $\%16 < 5 \mu\text{m}$  değerlerine sahiptir. Örnek her ne kadar Çin Kriterinin  $5 \mu\text{m}$  den az yüzde için önerilen koşulu sağlamasa da hidrometre deneyinde hata yapılmış olması ve deney sonuçlarında var olan belirsizlikler gibi durumlar göz önüne alındığında bu örneğin sıvılaşma duyarlı olduğu ifade edilebilir. CPT sonuçları incelendiğinde, zemin profilinin 6,5 m ile 8 m arasında yer alan siltli kum – kumlu silt 'ten (SM-ML) oluşan orta sıkılıktaki tabakanın sıvılaşma için yeterince düşük değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Bu tabaka içerisinde 7,04 m derinlikte alınan zemin örneği ( $LL = 27$ ,  $w_c/LL = 0.9$  ve  $\%15 < 5 \mu\text{m}$ ) için Çin Kriterinin karşılandığı görülmektedir.

#### 3.2. Basitleştirilmiş Yöntem ile Sıvılaşma Analizi

Deprem yol açtığı yer hareketinin etkisinin bir çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılarak göz önüne alındığı bu yöntemde (Seed ve Idriss, 1971) bu değerın Sıvılaşma direncini tanımlamak için kullanılan çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ile



karşılaştırması sonucu sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanmaktadır. Yönteme ait ilgili eşitlikler (CSR, CRR, MSF vb.) anılan çalışmadan bulunabilir.

Vaka analizinin gerçekleştirildiği arazide yapılan sondajlar sonucunda elde edilen SPT verilerine göre basitleştirilmiş yöntem ile sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir ve elde edilen güvenlik sayıları Tablo 1’de gösterilmektedir. Zemin profilinin 3. tabakası (ML) ve 4. tabakasındaki (SM-ML) derinliklerde bulunan güvenlik sayılarının 1.10’dan küçük olduğu için, bu tabakalardaki sıvılaşma potansiyeli yüksektir.

Tablo 1. Basitleştirilmiş yöntemle sıvılaşma analizi sonuçları

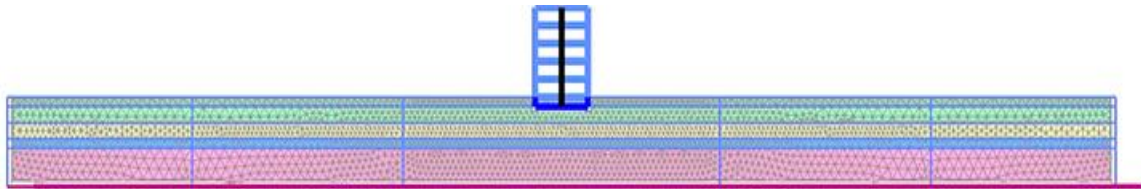
Derinlik	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma'_v$ (kPa)	$r_d$	$a_{max}$	$M_W$	CSR	CRR	MSF	FS
4.33	4	79.64	41.7	0.97	0.4	7.2	0.473	0.065	1.110	0.15
5.23	4	95.84	51.5	0.96	0.4	7.2	0.488	0.065	1.110	0.16
6.2	3	113.3	55.7	0.95	0.4	7.2	0.500	0.058	1.110	0.13
7.2	27	132	68	0.94	0.4	7.2	0.477	0.338	1.110	0.79
8.2	30	150	77	0.94	0.4	7.2	0.511	0.370	1.110	1.09

#### 4. NÜMERİK ANALİZLER

İnceleme bölgesindeki zemin profilinin deprem etkisi altındaki durumunu değerlendirmek ve sıvılaşma kaynaklı bina oturması sorununu sayısal olarak ele almak için Plaxis 2D programında analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak vaka bölgesindeki zemin profilinin modeli Plaxis’te oluşturulmuş ve daha sonra sıvılaşmanın gelişebileceği senaryolarda (serbest saha ve bina durumlarında) deprem esnasında meydana gelen aşırı boşluk basıncı ve oturma değerleri incelenmiştir.

##### 4.1. Sayısal Model

Zemin araştırmaları sonucu elde edilen zemin profili (Şekil 2) ve örnek vakadaki 5 katlı binanın Plaxis programındaki sonlu eleman modeli ve oluşturulan model ağ yapısı Şekil 3’te görülmektedir. Modelde sınır koşullarının belirlenmesi, özellikle deprem dalgalarının sınırlardan yansıma koşulları için önem arz etmektedir. Analizlerde, modelin sağ ve sol sınırları “free field” iken, alt taban “compliant base” olarak seçilmiştir. Modelin derinliği 14 m ve yatay uzunluğu ise deprem dalgalarının yansımasından kaçınmak için 210 m olarak belirlenmiştir. Yapısal elemanlar ise doğrusal elastik davranış ve temsili bir rijitlik varsayılarak modellenmiştir. Yapı ağırlığı için her bir üst döşeme üzerinde 10 kPa ve temel üzerinde 16 kPa ağırlık varsayılmıştır.

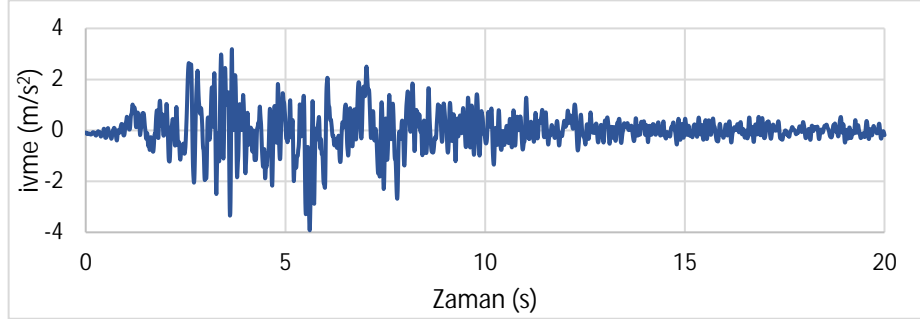


Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli ve oluşturulan ağ modeli

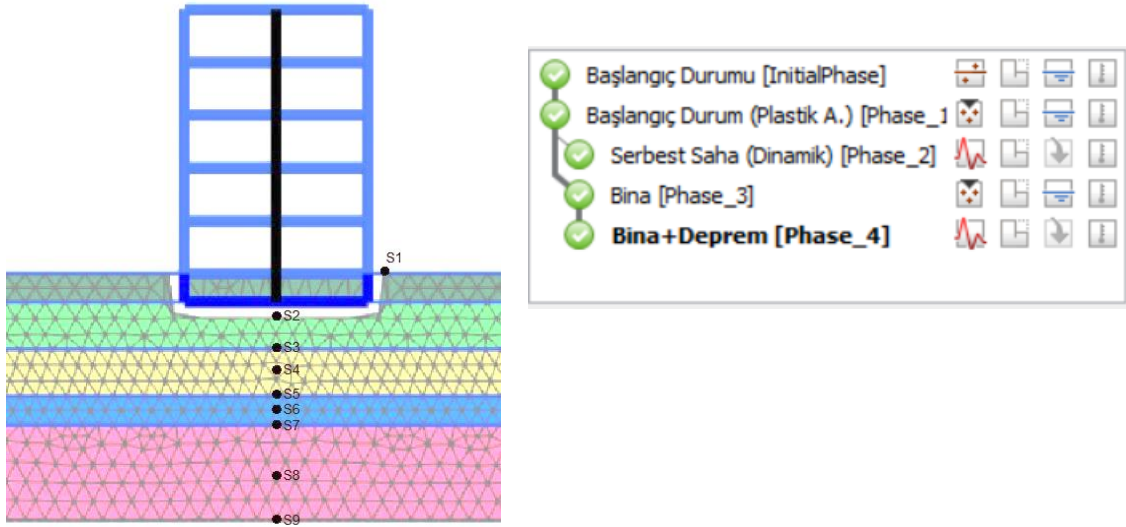
Dinamik analizlerde kullanılan deprem hareketi Kocaeli Depreminde Sakarya istasyonunda kaydedilen ve PGA değeri 0,4 g olan yer hareketi kaydından elde edilmiştir. Kayda gerekli



düzenlemeler yapıldıktan sonra, maksimum ivme zaman aralıkları dikkate alınarak efektif deprem zamanına ait 20 sn kısım deprem verisi olarak kullanılmıştır (Şekil 4). Deprem anındaki boşluk suyu basınçları, oturma ve ivme gibi değerlerin belirlenmesi için model içerisinde S1-S9 olmak üzere 9 adet nokta seçilmiştir. Şekil 5'te seçilen noktaların yerleri ve hesap aşamaları görülmektedir.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan ivme-zaman kaydı



Şekil 5. Analiz için seçilen noktalar ve analiz hesap aşamaları

#### 4.2. Zemin Parametreleri

Plaxis 2D' de 1 adet statik ve 2 adet dinamik olmak üzere 3 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Statik analizde bütün zeminler için Hardening Soil with Small Strain model (HSSmall Model) kullanılmıştır. HSSmall model zemine bağlı olarak histeretik sönümlenme uygulama kabiliyetine sahiptir. Her zemin tabakası için HSS modeli parametreleri arazi deney sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. (Tablo 2).

Dinamik analizlerde ise 3 ve 4. tabakaların davranışını incelemek için UBC3D-PLM zemin modeli kullanılırken, diğer tabakalarda HSSmall modeli kullanılmıştır. UBC3D-PLM, PLAXIS' te uygulanan ve kumların ve siltli killerin sismik sıvılaşma davranışını simüle edebilen ve drenajsız dinamik analiz altında aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişimini yakalayabilen doğrusal olmayan, elasto-plastik, efektif gerilme tabanlı bir modeldir. Tablo 3'te UBC3D-





PLM model girdi parametreleri sunulmaktadır. Model parametrelerinin genel kalibrasyonu için önerilen denklemler Galavi vd. (2013)'ün çalışmasından bulunabilir.

Tablo 2. HSSmall modeli için girdi parametreleri

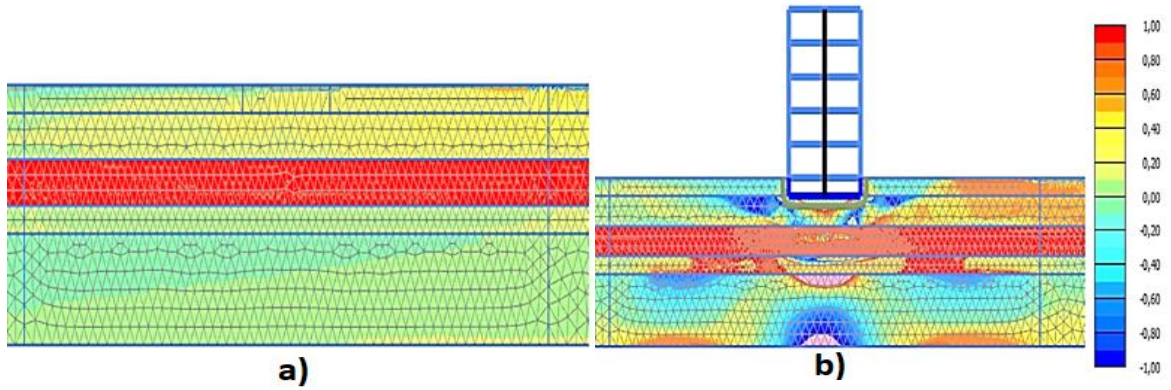
	Birim	Dolgu (1)	CH (2)	ML (3)	SM-ML(4)	SP (5)
$\gamma_n$	kN/m <sup>3</sup>	16	17	17	17	18
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	17	18	18	18	19
$E_{50}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	7132	8381	6321	19839	36250
$E_{eod}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	7132	8381	6321	19839	36250
$E_{ur}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	21397	25143	18964	59517	108750
$m$	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$e_{init}$	-	0.905	0.875	1.072	0.715	0.625
$c'_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	1	1	1	1	1
$\phi'$	°	30	31	30	32	33
$\psi$	°	-	1	-	2	3
$P_{ref}$	kPa	4	21.6	37.8	49.05	64.725
$G_0$	kN/m <sup>2</sup>	35662	41906	31607	99194	181250
$\gamma_{0.7}$	-	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
$v_{ur}$	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tablo 3. UBC3D-PLM model girdi parametreleri

	$\phi_{cv}$	$\phi_p$	$c$	$K^e_G$	$K^p_G$	$K^e_B$	$ne$	$me$	$\eta p$	$R_f$	$P_A$	$\sigma_t$	$f_{achard}$	$(N_1)_{60}$	$f_{acpost}$
ML (3)	30	30.5	-	741.7	155.6	519.2	0.5	0.5	0.4	0.864	100	0	1	5	0.2
SM-ML(4)	32	34	-	1176.9	1512.3	823.8	0.5	0.5	0.4	0.702	100	0	1	20	0.2

## 5. Nümerik Analiz Sonuçları

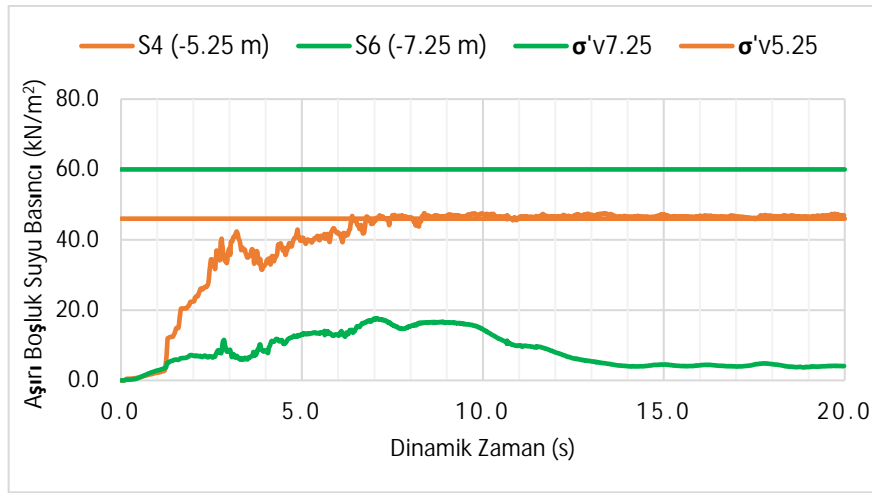
Plaxis programında sıvılaşma potansiyeli aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ ) yardımıyla belirlenebilmektedir.  $r_u$  incelenen derinlikteki aşırı boşluk suyu basıncının ilk efektif düşey gerilmenin oranını temsil eder. Aşırı boşluk suyu basıncı oranının ( $r_u$ ) 1.0'a eşit olması tam sıvılaşmış durum anlamına gelmektedir ancak  $r_u$  oranının 0.7'den büyük olduğu bölgeler sıvılaşmış durumda kabul edilir (Beaty ve Perlea 2011). Analizler sonucunda serbest saha koşulunda ve bina etkisi altında elde edilen  $r_u$  oranları Şekil 6'da görülmektedir.



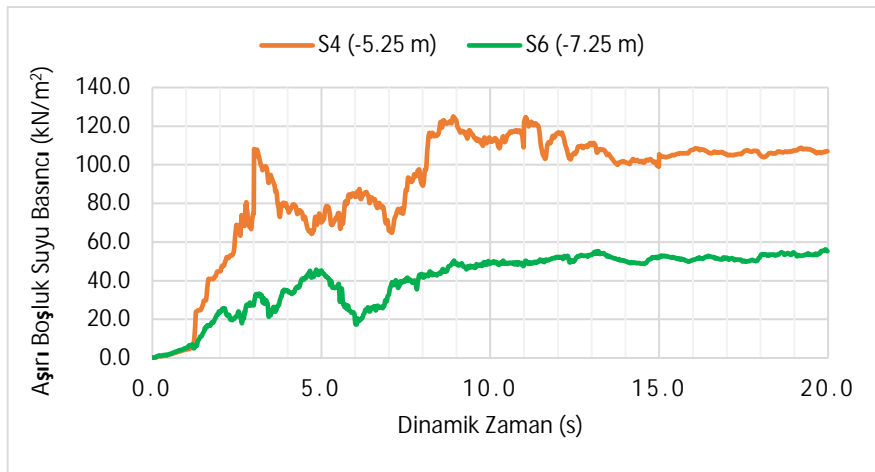
Şekil 6. a) Serbest saha koşulları ve b) bina etkisi altında elde edilen  $r_u$  oranları

Serbest saha koşullarında düşük plastisiteli silt tabakası (ML-Tabaka 3) depremin oluşturduğu yüksek seviyedeki aşırı boşluk suyu basınçları nedeniyle sıvılaşırken, siltli kum-kumlu silt (SM-ML- Tabaka 4) tabakası sıvılaşmamıştır. Serbest saha koşullarında tabakaların orta noktalarında (S4 ve S6) ölçülen aşırı boşluk suyu basınçları Şekil 7'deki grafikte görülmektedir. Deprem etkisinden dolayı ML (Tabaka 3) tabakasındaki S4 noktasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının derinlikteki efektif gerilme değerlerini aştığı gözükürken, SM-ML (Tabaka 4) tabakasındaki S6 noktasında ise aşmadığı görülmektedir.

Bina etkisi altında ise düşük plastisiteli silt (ML-Tabaka 3) tabakası yine sıvılaşırken, serbest saha koşullarından farklı olarak bina etkisinden dolayı siltli kum-kumlu silt (SM-ML- Tabaka 4) tabakasının  $r_u$  değerlerinin 0.7 mertebelerini aştığı ve sıvılaşma maruz kaldığı görülmektedir. Bina etkisi altında tabakaların orta noktalarında (S4 ve S6) ölçülen aşırı boşluk suyu basınçları Şekil 8'deki grafikte görülmektedir.



Şekil 7. Serbest saha koşulunda aşırı boşluk suyu basınçları

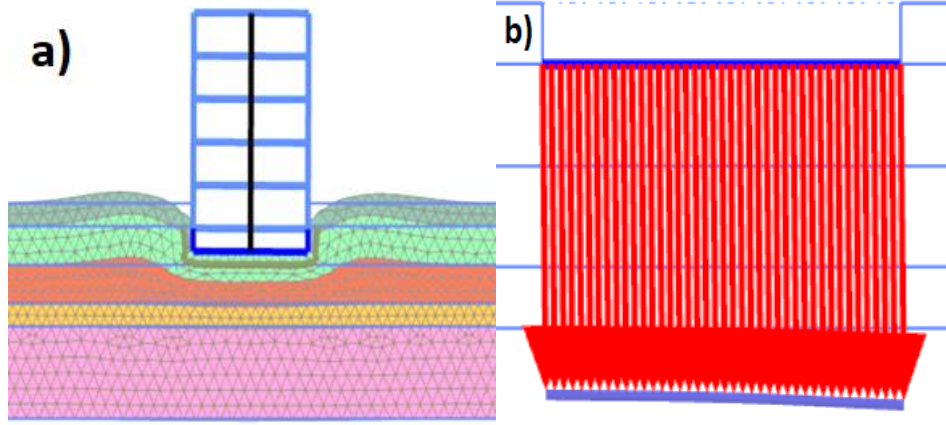


Şekil 8. Bina ve deprem etkisi altında aşırı boşluk suyu basınçları





Analizler sonucunda bina temelinde deprem etkisi altında üniforma yakın şekilde 160 cm'lik oturma gözlemlenmiştir. Yapı sisteminde gözlemlenen bu oturmada deprem etkisi altında sıvılaşmaya maruz kalan 3. tabaka (ML) ve 4. tabaka'nın (SM-ML) yanı sıra, yüksek hassasiyet ve su içeriğine ( $w_n \sim LL$ ) sahip ve dinamik yük altında taşıma gücünü kaybeden 1. tabakanın (CH) da katkısı mevcuttur. Deprem etkisi sonucu modelin deforme olmuş hali Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. a) Deforme olmuş zemin modeli b) Temel elmanı deformasyonu

Analizi gerçekleştirilen bina sahada deprem etkisi altında Güney-Doğu köşesinde 15 cm ve Kuzey-Batı köşesinde 150 cm'lik farklı oturmaya maruz kalmıştır. Sancio (2003) bu durumu bina temelinin düzgün olmayan şeklinden ve buna bağlı olarak bina kütesinin düzgün şekilde dağılmamasından kaynaklanabileceğini ifade etmektedir. Nümerik analiz sonucu binanın bir doğrultusunda sahaya benzer oturma değerleri elde edilirken, diğer kısımda farklı değerler bulunmaktadır. Sahadan farklı olarak görülen bu oturmanın iki boyutlu nümerik analizlerde birim genişlik prensibinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, 1999 Kocaeli Depreminde Adapazarı'nda sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı sebebiyle hasar görmüş 5 katlı bir yapı ve temel zemininin deprem esnasındaki davranışı incelenmiştir. İlgili zemin profili için literatürde önerilen sıvılaşma potansiyeli belirleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla, nümerik analizlerden elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Yine nümerik analizler sonucu 4. tabaka'nın (SM-ML) serbest saha koşullarında ve bina mevcudiyetinde farklı sıvılaşma potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Analizlerde zemin-yapı sisteminin gösterdiği oturma davranışı yalnızca belirli bir zemin tabakasının tepkisinden değil, temelin altında bulunan farklı zemin türlerinin birleşik etkilerinden kaynaklanmaktadır. 3. ve 4. tabakalarda gerçekleşen sıvılaşma ile 1. tabakadaki yumuşama kaynaklı taşıma gücü kaybı birlikte görülen oturma davranışına katkıda bulunmaktadır. Analizlerde bina deprem etkisi altında üniforma yakın şekilde 160 cm'lik oturma meydana gelmektedir. Analizlerde sahadan biraz farklı şekilde görülen bu davranış iki boyutlu nümerik analiz prensibinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Arel, E. ve Önalp, A. (2012), "Geotechnical properties of Adapazari silt", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol 71, 709–720.
- Bay, J. A. ve Cox, B. R. (2001), "Shear wave velocity profiling and liquefaction assessment of sites shaken by the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake", PEER Project Report SA3017-18336, Pacific Earthquake Engineering Research, Berkeley, CA.
- Beaty, M. H. ve Perlea, V. G. (2011), "Several observations on advanced analyses with liquefiable materials", Thirty first annual USSD conference on 21st century dam design-advances and adaptations, 1369–1397.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R. B., Cetin, O. K., Bol, E., Baturay, M. B., Christensen, C. ve Karadayılar, T. (2011), "Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey", J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol 130, 673–685.
- Galavi, V., Petalas, A. ve Brinkgreve, R. (2013), "Finite element modelling of seismic liquefaction in soils", *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, vol 44, 55–64.
- Sancio, R. B. (2003), "Ground failure and building performance in Adapazari, Turkey", PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Seed H.B. ve Idriss I.M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics, vol 97, 1249 – 1273.
- Seed H.B. ve Idriss I.M. (1982), "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes", EERI Monograph, Berkeley, California.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$E_{50}^{ref}$	Drenajlı üç eksenli deneydeki sekant rijitliği	$K_G^e$	Elastik kayma modülü faktörü
$E_{eod}^{ref}$	Birinci ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği	$K_G^p$	Plastik kayma modülü faktörü
$E_{ur}^{ref}$	Drenajlı üç eksenli deneydeki boş./yeniden yükleme rijitliği	$K_B^e$	Elastik bulk modülü faktörü
$m$	Güç katsayısı	$ne$ ve $me$	Elastik bulk ve kayma modülü üssü
$e_{init}$	Başlangıç boşluk oranı	$np$	Plastik kayma modülü üssü
$c'_{ref}$	Efektif kohezyon	$R_f$	Göçme oranı
$\phi'$	Efektif kayma direnci açısı	$P_A$	Atmosferik basınç
$\psi$	Genleşme açısı	$\sigma_t$	Çekme gerilmesi
$P_{ref}$	Rijitlikler için referans gerilme	$f_{achard}$	Sıkılaşma faktörü
$G_0$	Çok küçük birim şekil değiştirmelerde referans kayma modülü	$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş SPT-N değeri
$\gamma_{0.7}$	$G_s=0.722G_0$ için eşik kayma birim şekil değiştirme	$f_{acpost}$	Sıvılaşma sonrası faktör
$\nu_{ur}$	Boşaltma/yeniden yükleme için poisson oranı	$r_d$	Gerilme azaltma katsayısı
$\phi_{cv}$	Sabit hacim içsel sürtünme açısı	$a_{max}$	Yüzeydeki en büyük yatay ivme
$\phi_p$	PIK içsel sürtünme açısı	$r_u$	Aşırı boşluk suyu basıncı oranı
$c$	Kohezyon		

