

DEPREM KAYNAK ÖZELLİKLERİ İLE SIVILAŞMA KAYNAKLI OTURMALAR ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN EARTHQUAKE SOURCE CHARACTERISTICS AND LIQUEFACTION INDUCED SETTLEMENTS

Ozan SUBAŞI¹, Merve AKBAŞI², Serdar KOLTUK³, Recep İYİSAN⁴

ÖZET

Yerel zemin koşulları, deprem kaynak özellikleri ve üstyapı performansı, kuvvetli yer hareketi sonucunda meydana gelen yapısal hasarları, can ve mal kayıplarını etkileyen en önemli faktörlerdir. Özellikle depremler sırasında suya doymuş kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen sıvılaşmalar büyük oturmalar ve yanar yayılmalara yol açmaktadır. Bunun sonucunda da mühendislik yapılarında ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, üç farklı rölatif sıkılığa sahip kum malzeme özellikleriyle idealize zemin kesitleri oluşturulmuş ve altı farklı ivme-zaman kaydı kullanılarak bir sonlu eleman yazılımıyla iki boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Numerik analizlerde kum zemin tabakalarının dinamik davranışını modellemek için PM4Sand bünye denklemleri kullanılmıştır. Sıvılaşma kaynaklı oturmalarla, deprem kaynak özellikleri arasındaki ilişkiler incelenerek, sonuçlar tartışılmıştır. Sayısal analizler sonucunda sıvılaşma kaynaklı oturmalar ile arias şiddeti, karakteristik şiddet ve kümülatif mutlak hız arasında, moment büyüklüğü, anakaya mostrası üzerindeki maksimum ivme, depremin hakim frekansı parametrelerine kıyasla daha güçlü ilişkiler olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Sıvılaşma kaynaklı oturmalar, PM4Sand bünye modeli, Numerik analiz

ABSTRACT

Local soil conditions, earthquake source characteristics and superstructure performance are the most important factors affecting structural damage, loss of life and property caused by strong ground motions. Especially during earthquakes, liquefaction occurring in fully saturated cohesionless soils leads to large settlements and lateral spreading. As a result of

¹ Araştırma Görevlisi, Türk-Alman Üniversitesi, ozansb@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, akbas@itu.edu.tr

³ Doktor, HPC AG The Engineering Company, serdarkoltuk@yahoo.de

⁴ Profesör Doktor, İstanbul Teknik Üniversitesi, iyisan@itu.edu.tr

this, serious damages occur in engineering structures. Within the scope of this study, idealized soil profiles were created with sand material properties with three different relative densities and two-dimensional nonlinear dynamic analysis were performed with a finite element software using six strong ground motion records. The PM4Sand constitutive equations were used to model the dynamic behavior of sand soil layers in numerical analysis. The relationships between liquefaction-induced settlements and earthquake source properties were examined and the results were discussed. As a result of numerical analysis, it was observed that there are stronger relationships between liquefaction-induced settlements and cumulative absolute velocity, arias and characteristic intensity compared to the parameters of moment magnitude, maximum acceleration on the rock-outcrop and the dominant frequency of the earthquake.

Keywords: *Liquefaction, Liquefaction-induced settlements, PM4Sand constitutive model, Numerical analysis*

1. GİRİŞ

Kuvvetli yer hareketi sırasında mühendislik yapılarında meydana gelen hasarlar, birçok can ve mal kaybına neden olmaktadır. Depremler sırasında oluşan bu hasarları etkileyen en önemli faktörler; deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve üst yapı performansdır. Depreme dayanıklı yapı tasarımı için, kuvvetli yer hareketinin yüzeye yakın zemin tabakalarında neden olduğu deformasyonları deprem kaynak özelliklerinin göz önüne alınarak doğru bir biçimde öngörülmesi gerekmektedir. Özellikle suya doygun kohezyonsuz zeminlerde gözlenen sıvılaşmalar, zemin tabakalarında meydana gelen deformasyon seviyelerini ciddi ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle, sıvılaşma davranışı ve sıvılaşma sonucunda meydana gelen hasarların, deprem kaynak özellikleri göz önüne alınarak incelenmesi gerekmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, sıvılaşma ve sonucunda meydana gelen hasarlar üzerine birçok arazi, laboratuvar ve numerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Ecemis, 2013; Chen ve Zhang, 2013; Bray ve diğ., 2014; Ayoubi ve Pak, 2017; Boulanger ve Ziotopoulou, 2018; Molina-Gomez ve diğ., 2019; Bayat ve Gülen, 2020). Yapılan çalışmalarla, arazi deneyleri sonucunda sıvılaşma potansiyeli tahmin edilebilmekte, model deneyler ve matematiksel ifadelerle sıvılaşma davranışı modellenebilmekte, arazi ve laboratuvar çalışmalarının birlikte değerlendirilmesiyle sıvılaşma kaynaklı oturmalar öngörülebilmektedir (Tokimatsu ve Seed, 1984; Ishihara ve Yoshimine, 1992; Wu ve diğ., 2003; Shamoto ve diğ., 1998; Çetin ve diğ., 1998). Sıvılaşma kaynaklı oturmalarla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, deprem kaynak özellikleri sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi aşamasında genellikle moment büyüklüğü (M_w) ve yüzeyde meydana gelen maksimum yatay ivme (a_{maks}) parametreleri ile modellenmektedir (Seed ve Idriss, 1971; Çetin ve diğ., 2004; Moss ve diğ., 2006; Boulanger ve Idriss, 2014).

Bu çalışma kapsamında, rölatif sıklığı %35, 55, 75 olan üç farklı kum zemin özellikleri kullanılarak iki boyutlu zemin profilleri oluşturulmuştur. Farklı deprem kaynak özelliklerine sahip kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak serbest saha koşullarında bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis 2D ile analiz edilerek sıvılaşma kaynaklı oturmalar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Farklı rölatif sıklıktaki kum zemin tabakalarının dinamik davranışını modellemek için PM4Sand bünye denklemleri kullanılmıştır. Numerik analizler sonucunda

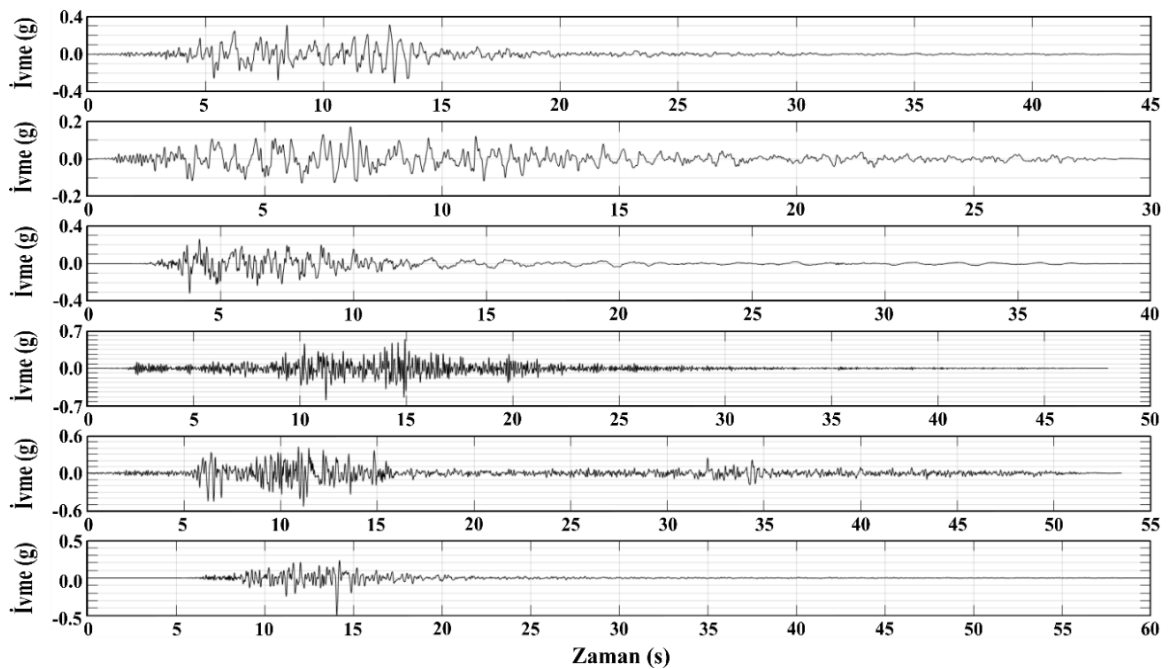
elde edile sivilaşma kaynaklı oturmalarla deprem kaynak özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2. NUMERİK ANALİZLER

2.1. Kuvvetli Yer Hareketleri ve Kaynak Özellikleri

Dünyamızda farklı periyot ve genliklerde sürekli titreşimler meydana gelmektedir. Bu titreşim hareketlerinin büyük bir çoğunluğu küçük genliklere sahip olup, mühendislik yapılarında herhangi bir hasara neden olmazken, nadir olarak görülen büyük genlikli kuvvetli yer hareketleri önlem alınmazsa mühendislik yapılarını kullanılmaz hale getirmektedir. Yeryüzünden kilometrelerce derinde meydana gelen depremler sırasında açığa çıkan dalga hareketi zemin tabakalarından geçerek yüze ulaşmaktadır. Yüzeyde oluşan kuvvetli yer hareketinin özelliklerinin tanımlanması, depreme dayanıklı yapı tasarımı için son derece önemlidir. Kuvvetli yer hareketinin mühendislik açısından en önemli üç özelliği genlik, frekans içeriği ve süresidir. Bu üç temel özelliğin tanımlanması için çok sayıda parametre önerilmiştir. Bu parametrelerden bazıları üç özellikten sadece birini yansıtırken, bazıları da bir veya iki özelliğini tanımlamaktadır. Dinamik hareketin karmaşık yapısı nedeniyle tüm özelliklerini doğru bir şekilde tanımlayan sadece bir parametrenin olması mümkün değildir (Jennings, 1985; Joyner ve Boore, 1988).

Çalışma kapsamında, ivme-zaman kayıtları kullanılarak iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Kuvvetli yer hareket kayıtlarının seçiminde deprem kaynak özelliklerinin farklılık göstermesine dikkat edilmiş ve anakaya mostrası üzerinde alınmış altı farklı ivme-zaman kaydı kullanılmıştır (PEER, 2022). Deprem kaynak özellikleri olarak moment büyüklüğü (M_w), anakaya mostrası üzerindeki maksimum ivme (PGA), depremin hakim frekansı (f_{eq}), arias şiddeti (I_a), karakteristik şiddet (I_c) ve kümülatif mutlak hız (CAV) parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının ivme zaman geçmişleri Şekil 1 'de ve özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Analizlerde kullanılan ivme-zaman kayıtları (PEER, 2022).

Tablo 1. Numerik analizlerde kullanılan PM4Sand ve HSS parametreleri

No	Deprem Adı	M_w	PGA (g)	f_{eq} (Hz)	I_a (m/s)	I_c	CAV (m/s)
1	Hector Mine	7.13	0.31	1.82	1.80	0.08	11.35
2	Kocaeli	7.51	0.17	1.93	0.53	0.03	6.55
3	L'aquila	6.30	0.31	0.59	1.05	0.05	8.58
4	Landers	7.28	0.68	11.41	4.83	0.16	20.35
5	Manjil	7.37	0.53	2.93	4.31	0.14	21.91
6	Northridge	6.69	0.50	4.25	1.05	0.05	7.55

Analizlerde kullanılan ivme-zaman geçmişlerine “baseline” düzelmesi yapılmış olup, “Butterworth” yaklaşımı ile 0.5-15 Hz arasında “bandpass” filtreleme uygulanmıştır. Kuvvetli yer hareketi numerik modelin tabanı boyunca x ekseninde 0.5 m büyüklüğünde tanımlı deplasman olarak uygulanmış, y eksenindeki bileşeni ise “fixed” olarak seçilmiştir.

2.2. Bünye Denklemleri

Sonlu eleman modellerinde, suya doymuş kum zeminlerin dinamik davranışı için PM4Sand bünye denklemleri kullanılmıştır. Bu model, kritik durum teorisi ile uyumlu, plastisite teorisine dayanan ve gerilme oranı kontrollü ve kumların sıvılaşma davranışını modellemek için önerilmiştir (Boulanger ve Ziotopoulou, 2018). PM4Sand bünye denklemleri dinamik davranışının modellenmesinde son derece başarılı olmasına rağmen başlangıç gerilme koşullarının belirlenmesinde yetersizdir. Bu nedenle, başlangıç gerilme koşullarının modellenebilmesi için Hardening Soil with small-strain stiffness (HSS) bünye modeli kullanılmıştır. Araştırmada Bastidas, (2016), Boulanger ve Ziotopoulou, (2018) tarafından belirlenen ve $D_R = 35\%$, 55% ve 75% olan temiz Ottawa kum zemin için kullanılan PM4Sand parametreleri ve Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından önerilen korelasyonlarla belirlenen HSS parametreleri kullanılmış ve ilgili parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. PM4Sand ve HSS parametreleri

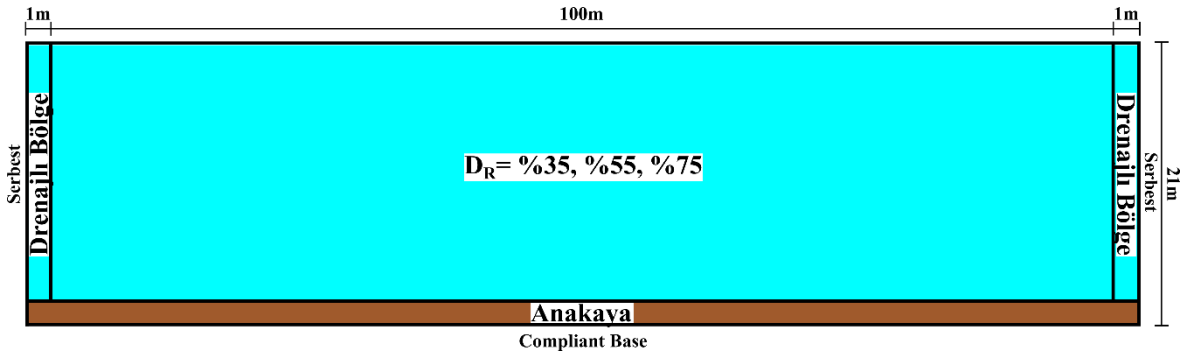
PM4Sand				Hardening Small Strain			
Parametreler	$D_R=35\%$	$D_R=55\%$	$D_R=75\%$	Parametreler	$D_R=35\%$	$D_R=55\%$	$D_R=75\%$
γ_k (kN/m ³)	15.34	15.90	16.52	γ_k (kN/m ³)	15.34	15.90	16.52
γ_d (kN/m ³)	19.36	19.71	20.10	γ_d (kN/m ³)	19.36	19.71	20.10
e	0.695	0.635	0.575	e	0.695	0.635	0.575
D_{R0}	0.35	0.55	0.75	E_{50ref} (MPa)	21	33	45
G_0	476	677	890	E_{oedref} (MPa)	21	33	45
h_{p0}	0.53	0.4	0.63	E_{urref} (MPa)	63	99	135
e_{maks}	0.8	0.8	0.8	m	0.59	0.53	0.47
e_{min}	0.5	0.5	0.5	c' (MPa)	0	0	0
P_a (MPa)	0.101	0.101	0.101	ϕ' (°)	33	33	33
n^b	0.5	0.5	0.5	$\gamma_{0.7}$	0.00017	0.00015	0.00013
n^d	0.1	0.1	0.1	G_{0ref} (MPa)	83.8	97.4	111.0
ϕ_{cv} (°)	33	33	33	ν	0.3	0.3	0.3
ν	0.3	0.3	0.3	P_{ref} (MPa)	0.1	0.1	0.1
Q ve R	10 - 1.5	10 - 1.5	10 - 1.5	R_f	0.956	0.931	0.906

γ_k : Kuru birim hacim ağırlık, γ_d : Suya doymuş birim hacim ağırlık, e: Boşluk oranı, D_{R0} : Rölatif sıklık, G_0 : Kayma modülü katsayısı, h_{p0} : Sıkışma oranı parametresi, e_{maks} , e_{min} : Maksimum ve minimum boşluk oranı, P_a : Açık hava basıncı, n^b : Sınır yüzeyi parametresi, n^d : Dilatasyon yüzeyi parametresi, ϕ_{cv} : Kritik durum sürtünme açısı, ν : Poisson oranı, Q ve R: Kritik durum parametreleri, E_{50ref} : Sekant elastisite modülü, E_{oedref} : Tanjant elastisite modülü, $E_{ur,ref}$: Boşaltma- yüklem elastisite modülü, m: Gerilme bağımlılığı oranı, c': Efektif kohezyon, ϕ' : Efektif sürtünme açısı, $\gamma_{0.7}$: Kayma birim şekil değiştirme oranı, G_{0ref} : Çok küçük birim şekil değiştirmelerindeki kayma modülü, P_{ref} : Referans gerilme seviyesi, R_f : Göçme oranı

2.3. İki Boyutlu Sayısal Model

Araştırmada, %35, %55, %75 olmak üzere üç farklı rölatif sıklığı sahip temiz Ottawa kum özellikleri kullanılarak zemin profilleri oluşturulmuştur. Modelde yüzeyden 20 m derinliğe kadar suya tam doygun kum tabakası yer almaktadır. Bu kum tabakasının altında 1 m kalınlığında anakaya tanımlanmıştır. Zemin profilinin yatay uzunluğu 100 m olarak belirlenmiş ve her iki kenarda da sınır şartları ile uygunluk göstermesi için 1 m kalınlığında kum zemin özellikleriyle benzerlik gösteren drenajlı tabakalar tanımlanmıştır. Sayısal modelde yer altı su seviyesi yüzeyde yer almaktadır. Zemin profilinde yer alan kum zemin tabakasında sırasıyla her bir rölatif sıklığa sahip temiz Ottawa kum zemin parametreleri tanımlanmış toplamda üç farklı zemin profili oluşturulmuştur.

Analizlerde kuvvetli yer hareketinin doğru bir şekilde modellenebilmesi amacıyla alt sınır koşulu “compliant base”, üst ve yatay sınır koşulları ise “serbest” seçilmiştir. Numerik analizlerde kullanılan iki boyutlu sayısal model Şekil 2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. Sayısal analizlerde kullanılan zemin profili

Deprem dalgaları yüzeye doğru yaklaştıkça, zemin tabakalarındaki sürtünmeye ve şekil değiştirmelere bağlı olarak sönümlenme meydana gelmektedir. Numerik analizlerde bu sönümlenme davranışı, Denklem 1’de gösterilen Rayleigh sönüm parametreleriyle modellenmiştir.

$$[C] = \alpha_R [M] + \beta_R [K] \quad (1)$$

Denklem 1’de C uygulanacak sönüm, M zemin kütle matrisi, K rijitlik matrisi, α_R , β_R ise sönüm katsayılarıdır.

Plaxis 2D yardımıyla gerçekleştirilen analizler için Rayleigh sönüm katsayıları (α_R , β_R) hesaplanırken öncelikle oluşturulan modelin hakim frekansı hesaplanır. Bu Hedef 1 (f_1) parametresidir. Analizlerde kullanılan kuvvetli yer hareketi kaydının hakim frekansının f_1 parametresine bölümünün en yakın doğal sayıya yuvarlanması ile Hedef 2 (f_2) elde edilmektedir (Brinkgreve ve diğ., 2019). Analizlerde, hedef sönüm oranının (ξ) sınırlama kaynaklı oturmalar ve boşluk suyu basıncı oranı (R_u) üzerindeki etkileri incelenmiş ve kayda değer bir değişiklik olmadığı için hedef sönüm oranı %2 olarak seçilmiştir.

Analizlerde kullanılan Plaxis 2D yazılımında, sonlu eleman ağı oluşturmak için otomatik olarak üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Ortalama eleman boyutunu (OEB) belirlemek için Kuhlemeyer et al. (1973) tarafından önerilen ve Denklem 2’de gösterilen ifade kullanılmıştır.

$$OEB = V_{s,min} / 8f_{maks} \quad (2)$$

Denklem 2’de yer alan $V_{s,min}$ zemin tabakasındaki en düşük kayma dalgası hızını, f_{maks} ise deprem maksimum frekans göstermektedir. Dinamik analizlerde, ortalama eleman boyutu (OEB) ile birlikte kritik zaman adımının (Δt) da uygun bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Δt parametresinin uygunluğu Denklem 3 kullanılarak kontrol edilmiştir (Brinkgreve ve diğ., 2019).

$$\Delta t \leq I_{min} / V_{s,tabaka} \quad (3)$$

Denklem 3’te I_{min} minimum eleman boyutunu, $V_{s,tabaka}$ ise zemin tabakasının kayma dalgası hızını göstermektedir.

Dinamik analizlerde 15 düğüm noktalı 3426 üçgen eleman kullanılarak sonlu eleman ağı oluşturulmuş ve ortalama eleman boyutu ise 1.20 m olarak belirlenmiştir. Kritik zaman adımı ise 0.005 s’dir.

2.4. Analiz Adımları

Sayısal analizler 4 adımdan oluşmaktadır.

Adım 1: K_0 prosedürü ile başlangıç adımı oluşturulmuştur.

Adım 2: Kum zemin tabakasındaki başlangıç gerilme koşullarının belirlenmesinde PM4Sand yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle boş bir adım oluşturularak kum zemin özelliklerine uygun parametreler kullanılarak HSS bünye modeli kullanılmıştır (Vilhar, 2018).

Adım 3: Sayısal modelin tabanı boyunca ivme-zaman kaydı etkililerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yatay ve yüzeydeki sınır koşulları “serbest”, alt sınır koşulu ise “compliant base” olarak tanımlanmıştır. Aşama boyunca drenaj türü “Undrained A” seçilerek sıvılaşma davranışı modellenmiştir (Quevedo, 2019).

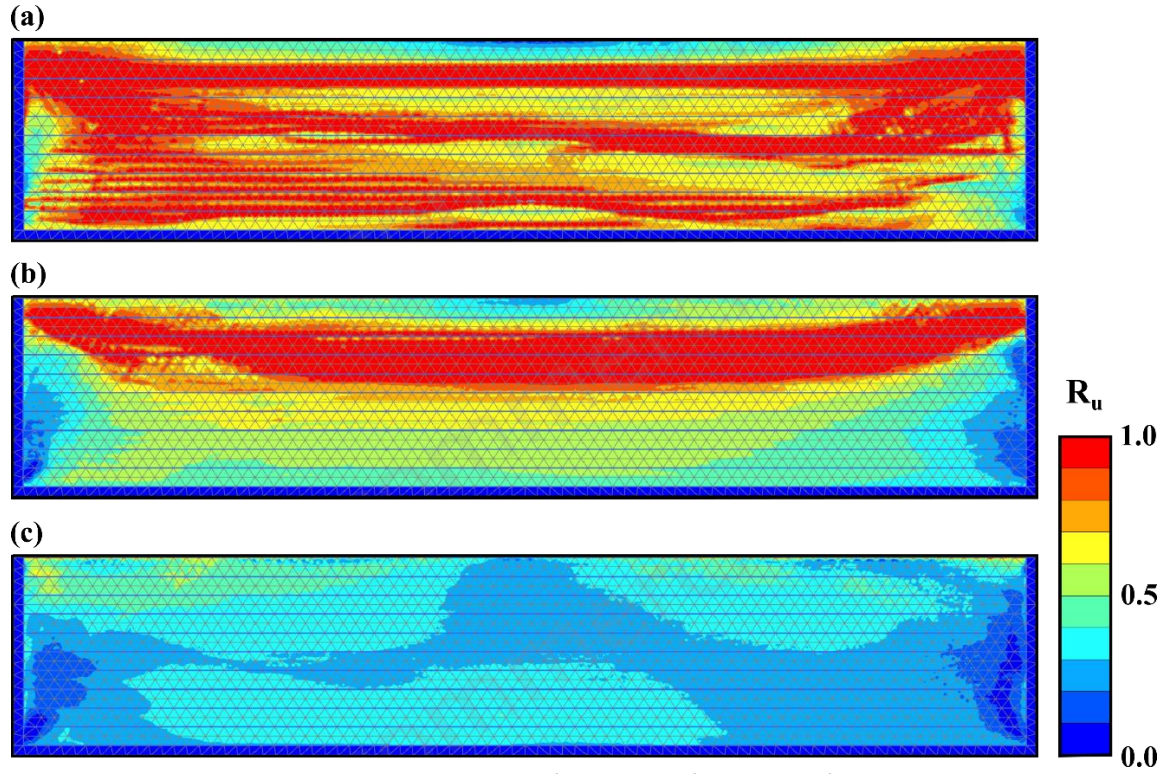
Adım4: Son aşamada kuvvetli yer hareketi tamamlandıktan sonra sıvılaşma kaynaklı toplam oturmaları elde edebilecek için Biot Teorisi kullanılarak analiz yapılmıştır (Biot, 1956). Bu aşamada drenajlar açılarak PM4Sand modelde yer alan “Postshake” parametresi 1 olarak seçilmiştir.

2.5. Analiz Sonuçları

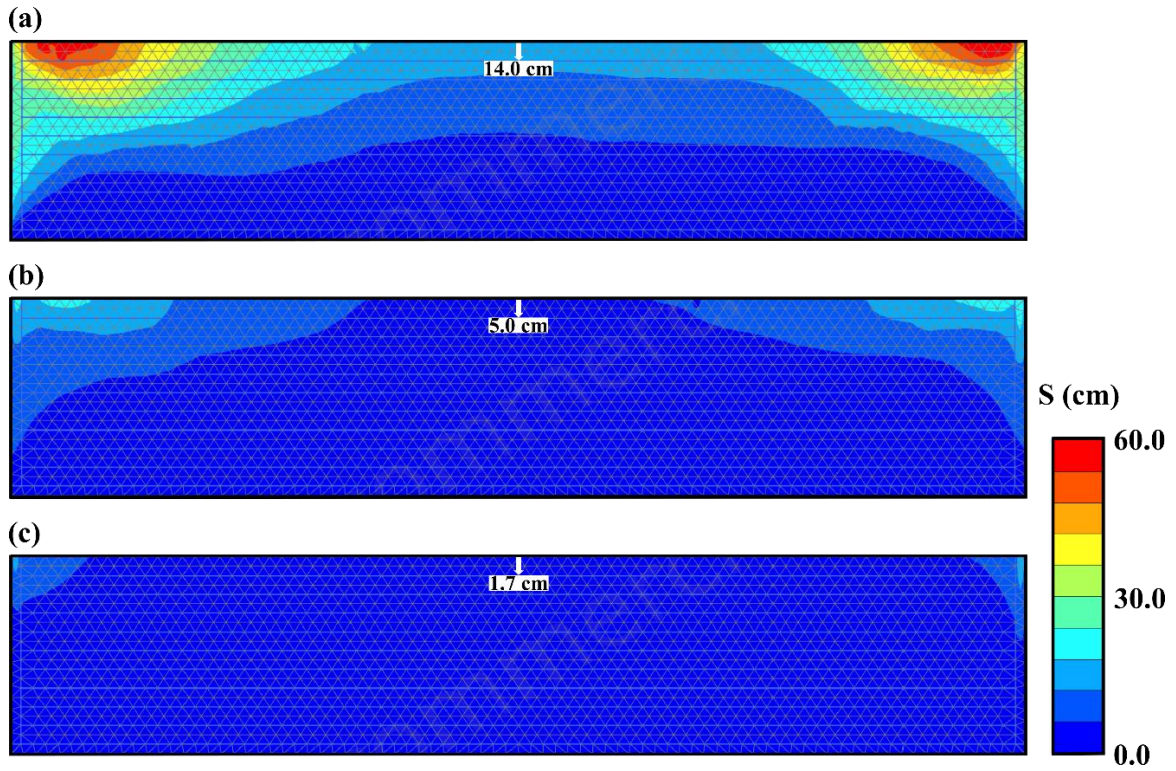
İnceleme kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, sıvılaşma davranışı ve oturmalar her bir rölatif sıklık için incelenmiştir. Sıvılaşma durumu, aşırı boşluk suyu basıncının başlangıçtaki düşey efektif gerilmeye bölünmesi ile elde edilen R_u parametresiyle belirlenmiştir. R_u ’nun 0.95’ten büyük olduğu değerlerde, sıvılaşmanın meydana geldiği kabul edilmiştir. Analizler sonucunda örnek teşkil etmesi amacıyla, Northridge depremi için elde edilen zemin modelindeki R_u değişimi Şekil 3’te, sıvılaşma kaynaklı oturmalar ise Şekil 4’te gösterilmiştir.

Şekil 3’ten de görüldüğü üzere sıvılaşma, zemin sıklığı arttıkça azalmakta ve analizlerde kullanılan depremler göz önüne alındığında $D_R=\%75$ ’te herhangi bir sıvılaşma gözlenmemektedir. Bununla birlikte modelin köşe noktalarında deformasyon birikimleri

meydana gelmektedir. Bu yüzden modelin orta noktasındaki sıvılaşmalar ve sıvılaşma kaynaklı oturmalar göz önüne alınmıştır.



Şekil 3. Sıvılaşma durumu a) $D_R=35\%$, b) $D_R=55\%$, c) $D_R=75\%$



Şekil 4. Sıvılaşma kaynaklı oturmalar a) $D_R=35\%$, b) $D_R=55\%$, c) $D_R=75\%$

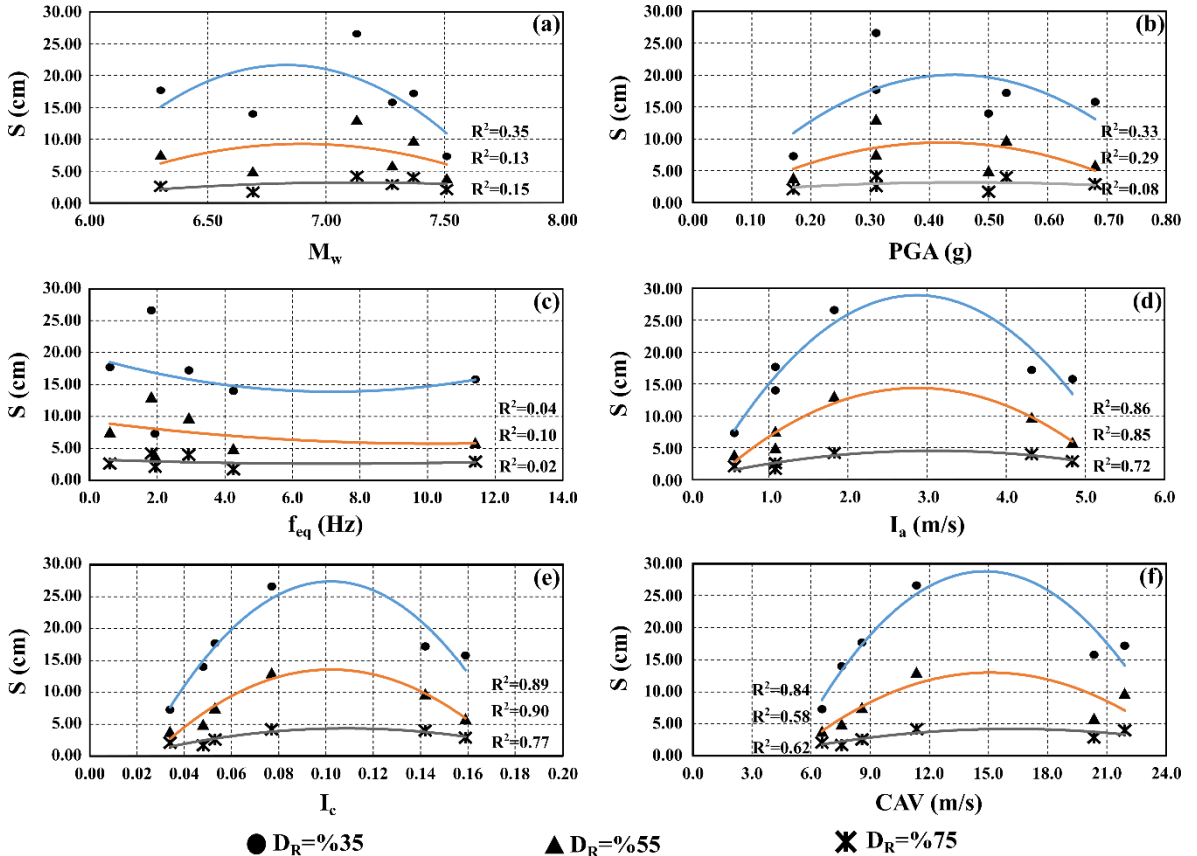
Sayısal analizler sonucunda gözlenen sıvılaşmalar ve sıvılaşma kaynaklı oturmalar Tablo 3'te gösterilmiştir. Sıvılaşma gözlenmişse "Var" gözlenmemiş ise "Yok" olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3. Numerik analiz sonuçları

No	Deprem Adı	$D_R=\%35$		$D_R=\%55$		$D_R=\%75$	
		Sıvılaşma	S (cm)	Sıvılaşma	S (cm)	Sıvılaşma	S (cm)
1	Hector Mine	Var	26.60	Var	13.10	Yok	4.20
2	Kocaeli	Var	7.30	Var	3.90	Yok	2.10
3	L'aquila	Var	17.70	Var	7.60	Yok	2.60
4	Landers	Var	15.80	Var	5.90	Yok	2.90
5	Manjil	Var	17.20	Var	9.80	Yok	4.00
6	Northridge	Var	14.00	Var	5.00	Yok	1.70

Tablo 2’de verilen analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere rölatif sıklığı %35 ve %55 olduğu zemin profillerinde sıvılaşma gözlenirken $D_R=\%75$ ’te herhangi bir sıvılaşma meydana gelmemiştir. Bununla birlikte rölatif sıklık azaldıkça, sıvılaşma kaynaklı oturmalar artmaktadır. Tüm rölatif sıklıklarda en büyük oturmalar, Hector Mine depremi kullanılarak yapılan analizlerde elde edilmiştir. Rölatif sıklığın %75 olduğu zeminlerde herhangi bir sıvılaşma gözlenmese bile dinamik yükler altında özellikle Hector Mine ve Manjil depremlerinde kayda değer oturmalar gözlenmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen sıvılaşma kaynaklı oturmalar ile deprem kaynak özellikleri Şekil 5’te gösterildiği gibi karşılaştırılmış, polinomsal eğilim çizgileri kullanılarak aralarındaki ilişkiler incelenmiştir.



Şekil 5. Deprem kaynak özellikleri ve sıvılaşma kaynaklı oturmalar a) M_w , b) PGA, c) f_{eq} , d) I_a , e) I_c , f) CAV

Şekil 5’ten de görüldüğü üzere deprem kaynak özellikleri olarak moment büyüklüğü (M_w), anakaya mostrası üzerindeki maksimum ivme (PGA), depremin hakim frekansı (f_{eq}), arias şiddeti (I_a),

karakteristik şiddet (I_c) ve kümülatif mutlak hız (CAV) parametreleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda sıvılaşma kaynaklı oturmalar ile I_a , I_c , CAV parametreleri arasında M_w , PGA, f_{eq} parametrelerine kıyasla daha güçlü ilişkiler olduğu gözlenmiştir.

3. SONUÇLAR

Rölatif sıklıkları %35, %55, %75 olan kum zemin özellikleriyle oluşturulmuş zemin profilleri bir sonlu eleman program yardımıyla altı farklı ivme-zaman kaydı kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda %35 ve %55 rölatif sıklığa sahip zemin profillerinde tüm analizlerde sıvılaşma gözlenirken, rölatif sıklığı %75 olduğu zemin modelinde herhangi bir sıvılaşma durumu meydana gelmemiştir. Rölatif sıklık arttıkça sıvılaşma kaynaklı oturmalar azalmaktadır. Buna ek olarak rölatif sıklığın %75 olduğu zeminlerde herhangi bir sıvılaşma gözlenmese bile dinamik yükler altında kayda değer oturmalar gözlenmiştir. Analizler sonucunda sıvılaşma kaynaklı oturmalar ile I_a , I_c , CAV parametreleri arasında M_w , PGA, f_{eq} parametrelerine kıyasla daha güçlü ilişkiler olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte çalışma sonucunda elde edilen bulgular, kuvvetli yer hareketi sayısı artırılarak numerik analizler tekrarlanıp, deprem kaynak özellikleriyle sıvılaşma kaynaklı oturmalar daha detaylı bir şekilde incelenerek desteklenebilir.

KAYNAKLAR

- Ayoubi, P., Pak, A. (2017), “Liquefaction-induced settlement of shallow foundations on two-layered subsoil strata”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 94, 35-46.
- Bastidas, A.M.P. (2016), “Ottawa F-65 sand characterization”, Ph.D Thesis, University of California, Davis, USA.
- Biot, M.A. (1956), “General solutions of the equations of elasticity and consolidation for porous material”, Journal of Applied Mechanics, 23(2).
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). “CPT and SPT based liquefaction triggering procedures” Report No. UCD/CGM.-14, 1.
- Boulanger, R.W., Ziotopoulou, K. (2018), “PM4Sand (version 3.1 Revised July 2018): A sand plasticity model for earthquake engineering applications”, Report No. UCD/CGM-17/01.
- Bray, J.D., Dashti, S. (2014), “Liquefaction-Induced Building Movements”, Bulletin of Earthquake Engineering, 12(3) 1129-1156.
- Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Engin, H.K. (2010), “Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands”, In: Numerical methods in geotechnical engineering, 1st Edition, CRC Press, USA.
- Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy S., Swolfs, W.M. (2019), “Plaxis 2D Manuals”, Plaxis BV, Delft, The Netherlands.
- Cetin K.O., Seed R.B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L.F. Jr, Kayen R.E., Moss R.E.S. (2004), “SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(12), 1314-1340.
- Cetin, K.O., Bilge, H.T., Wu, J., Kammerer, A.M., Seed, R.B. (2009) “Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric) settlements”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(3): 387- 398.

- Chen, C., Zhang, J. (2013), "Constitutive modeling of loose sands under various stress paths" International Journal of Geomechanics, Vol. 13, No. 1, pp. 1-8.
- Ecemis, N. (2013), "Simulation of seismic liquefaction: 1-g model testing system and shaking table tests" European Journal of Environmental and Civil Engineering, 17(10), 899-919
- Eseller-Bayat, E.E., Gulen, D.B. (2020), "Undrained Dynamic Response of Partially Saturated Sands Tested in a DSS-C Device" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 146(11).
- Ishihara, K., Yoshimine, M. (1992), "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes" Soils and Foundations 32(1): 173-188.
- Jennings, P.C. (1985), "Ground motion parameters that influence structural damage. Strong ground motion simulation and engineering applications", EERI Publication.
- Joyner, W.B., Boore, D.M. (1988). "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion". Earthquake Engineering and Soil Dynamics II—Recent Advances in Ground-Motion Evaluation Conference, Utah, United States (pp. 27-30).
- Kuhlemeyer, R.L., Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 99(5), 421-427.
- Molina-Gomez, F., Caicedo, B., Viana da Fonseca, A. (2019), "Physical modelling of soil liquefaction in a novel micro shaking table", Geomechanics and Engineering, 19(3), 229-240.
- Moss, R. S. E, Seed, R. B., KAyen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian A., Cetin, K. O. (2006) "CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential", Journal of Geotech. Geoenviron. Eng., 132(8), 1032- 1051
- PEER. (2022), "NGA-West2 - Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes; Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database", California, USA. <https://ngawest2.berkeley.edu/site>.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, pp. 1249-1273.
- Shamoto, Y., Zhang, J.M., Tokimatsu, K., (1998), "New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 17(7-8): 427-438.
- Tokimatsu, K., Seed, H.B. (1984), "Simplified procedures of the evaluation of settlements in clean sands." Rep. No. UCB/GT-84/16, Univ. of California Berkeley, USA.
- Quevedo, V.H.P. (2019), "Seismic liquefaction analysis of a critical facility with PM4Sand in Plaxis", Master Thesis, Delf University of Technology, The Netherlands.
- Wu, J., Seed, R.B., Pestane, J.M. (2003), "Liquefaction triggering and post liquefaction deformations Monterey 0/30 Sand under Uni-Directional Cyclic Simple Shear Loading." Geotechnical Engineering Research Report, University of California.