

## ÜST TABAKA KALINLIĞININ SIVILAŞMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

### THE EFFECT OF UPPER LAYER THICKNESS ON LIQUEFACTION BEHAVIOR

Burak OKUR<sup>1</sup>, Ozan SUBAŞI<sup>2</sup>, Recep İYİSAN<sup>3</sup>

#### ÖZET

Dünyamızda ve ülkemizde son yıllarda meydana gelen depremler birçok can ve mal kaybına neden olmuştur. Özellikle, suya doymun gevşek kumlarda kuvvetli yer hareketleri sırasında sıvılaşma nedeniyle oluşan deformasyonlar, yeterli performans özelliklerini gösteren mühendislik yapılarını bile kullanılamaz hale getirmektedir. Sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyinde oluşabilecek hasarları tahmin edebilmek için literatürde Ishihara kriteri olarak bilinen ve Nihonkai-Chube ( $M_w=7.7$ ) ve Tangshan ( $M_w=7.8$ ) depremleri sonucunda arazide elde edilen sınırlı veri setine dayanan bir yöntem yer almaktadır. Bu çalışmada, Ishihara kriteri göz önüne alınarak zemin kesitleri oluşturulmuş ve farklı özellikteki ivme-zaman kayıtları kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, PGA değerlerine, rölatif sıkılıklara, sıvılaşmayan ve sıvılaşabilir kum tabaka kalınlıklarına bağlı olarak dinamik davranış ve yüzeyde meydana gelen oturmalar incelenmiştir. Kum zemin tabakalarının davranışı Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness ve PM4Sand bünye denklemleri kullanılarak modellenmiş, bir sonlu eleman yazılımı olan Plaxis2D ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, sıvılaşmayan kum tabakası kalınlığının sıvılaşabilir kum tabakası üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Ishihara kriteri, Sonlu elemanlar yöntemi, PM4Sand bünye modeli.*

#### ABSTRACT

Earthquakes occurred in recent years have caused many losses of life and property in our world and our country. Particularly, deformations caused by liquefaction during strong ground motions in saturated loose sands have made even well-performing engineering structures unusable. To predict the damage that may occur on the ground surface due to liquefaction, a method known as the Ishihara criteria, based on a limited data set obtained in the field after the Nihonkai-Chube ( $M_w=7.7$ ) and Tangshan ( $M_w=7.8$ ) earthquakes, is available in the literature. In this study, soil profiles were generated considering the Ishihara criteria, and numerical analyses were conducted using acceleration-time records with different characteristics. Within this scope, dynamic behavior and settlements were investigated based on peak ground acceleration (PGA) values, relative densities, and

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, okurb23@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Arş. Gör. Dr., Türk Alman Üniversitesi, subasi@tau.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, iyisan@itu.edu.tr



thicknesses of non-liquefiable and liquefiable sand layers. The behavior of sand layers was modeled using the Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness and PM4Sand constitutive equations, and numerical analyses were performed using the finite element software Plaxis2D. Based on the analysis results, the effects of non-liquefiable sand layer thickness on the liquefiable sand layer were examined.

*Keywords: Liquefaction, Ishihara criteria, Finite element method, PM4Sand model.*

## 1. Giriş

Dünyanın her yerinde yaşanan doğal afetler arasında en sık görülen ve en yıkıcı özelliğe sahip afetlerden biri olan depremler, insanların yaşamlarını kaybetmelerine neden olabilmekte ve mühendislik yapılarının ciddi anlamda hasar görmesine hatta kullanım dışı kalmasına neden olabilmektedir. Bu hasarların ana nedenlerinden birisi, kuvvetli yer hareketi sırasında zemin tabakalarında meydana gelen deformasyonlardır. Tekdüze, dengesiz ve deprem gibi tekrarlı yüklemeler altında özellikle suya doymuş kumlu zeminlerde, drenajsız şartlardaki yüklemenin hızlı gelişmesi zemin tabakalarında aşırı boşluk suyu basıncının artmasına müteakiben efektif gerilmenin azalmasına sebebiyet verir. Bundan dolayı, suya doymuş kumlu zemin tabakalarında deprem yükü altında sıvılaşma davranışı meydana gelebilmektedir.

Sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğindeki en önemli, karmaşık, ilgi çekici ve yaygın olarak tartışılan konulardan birisidir. Geoteknik mühendisleri tarafından sıvılaşma davranışının yıkıcı etkilerinin dikkat çekmesi, 1964 yılında Alaska'da meydana gelen Good Friday ( $M_w=9.2$ ) ve Japonya'daki Niigata ( $M_s=7.5$ ) depremleriyle olmuştur. Bu depremler, yamaç yenilmeleri, gömülü yapıların yüzmesi, köprü ve yapı temellerindeki yenilmeler gibi olaylar da dahil olmak üzere sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların çok yıkıcı ve çarpıcı örneklerini gözler önüne sermiştir. Zeminlerin sıvılaşma davranışı, bu depremlerden sonra dünya çapında birçok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir (Kramer, 1996).

Sıvılaşma, kuvvetli yer hareketi esnasında boşluk suyu basıncındaki ani artış sebebiyle önemli miktarda rijitlik ve mukavemet kaybına yol açmakta ve zemin tabakalarında büyük deformasyonlara sebebiyet vermekte, dolayısıyla mühendislik yapılarında ciddi hasarlara neden olmaktadır. Bu nedenle, kuvvetli yer hareketi sırasında sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu zemin tabakalarının dinamik davranışı, sıvılaşma nedeniyle meydana gelebilecek deformasyonlar ve bu deformasyonların mühendislik yapılarına olan etkisinin belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından önem arz etmektedir. Sıvılaşma davranışı ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların tahmin edilmesi için nümerik ve ampirik olmak üzere birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Nümerik yöntemler genellikle sonlu elemanlar veya sonlu farklar metodlarına dayanırken, ampirik yöntemler ise laboratuvar deney sonuçlarının arazi verileri ile karşılaştırılmasıyla oluşturulmuştur (Çetin vd., 2009; Subaşı vd., 2022).

Ampirik yöntemlerde, dinamik davranışın ve sıvılaşma kaynaklı hacimsel birim şekil değiştirmelerin belirlenebilmesi adına, laboratuvarında temiz kumlar üzerinde gerçekleştirilen burulmalı kesme, tekrarlı üç eksenli ve tekrarlı basit kesme deneylerinin sonuçlarıyla vaka analiz sonuçları birlikte değerlendirilerek sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) ve çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile SPT-N darbe sayıları arasındaki ilişkilere dayanan grafiksel çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümler aracılığıyla, sıvılaşma davranışının



gözlemlendiği zemin tabakalarında meydana gelen oturmalar tahmin edilebilir (Subaşı ve İyisan, 2021).

Nümerik yöntemler, arazi şartlarını simüle edebilecek şekilde benzer koşullar altında tasarlanan model yardımıyla, zemin tabakalarının doğrusal olmayan dinamik davranışı ve pekleşmesi göz önüne alınarak oluşturulan bünye denklemleri vasıtasıyla, sonlu elemanlar ve sonlu farklar metotlarıyla oluşturulan bir, iki ve üç boyutlu zemin profillerine, kuvvetli yer hareketi etki ettirilerek gerçekleştirilecek analizler, zamana bağlı olarak zemin tabakalarındaki değişimin, sıvılaşma davranışının ve sıvılaşma kaynaklı deformasyonların belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Nümerik yöntemler kapsamında sonlu elemanlar veya sonlu farklar metotlarıyla gerçekleştirilecek analizlerinde kullanılmak üzere gerekli girdi parametrelerinin belirlenmesi noktasında zorluklarla karşılaşılmasına rağmen, bünye modelleri yardımıyla yapılacak analizler zeminlerin dinamik davranışını, zemin tabakalarının içerisinde sismik dalgaların yayılmasını ve boşluk suyu basıncının dağılımını gerçeğe yakın bir şekilde modellemeyi mümkün kılmaktadır (Koltuk vd., 2022).

Bu çalışmada, literatürde sıvılaşma sonucu yüzey hasarlarını tahmin etmek amacıyla kullanılan ampirik yöntemlerden birisi olan Ishihara (1985) kriteri göz önüne alınarak serbest saha koşulları altında zemin kesitleri oluşturulmuştur. Oluşturulan zemin profillerinde, çeşitliliğin sağlanabilmesi adına farklı karakteristik özelliklere sahip olan toplamda dört adet kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, pik yüzey ivme (PGA) değerlerine, rölatif sıklıklara ( $D_r$ ), sıvılaşmaya potansiyeli bulunmayan ve sıvılaşabilir kum tabaka kalınlıklarına bağlı olarak zemin tabakalarının kuvvetli yer hareketi esnasındaki dinamik davranışı ve yüzeyinde meydana gelen oturma miktarları incelenmiştir. Kum zemin tabakalarının davranışı Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness (Benz, 2007) ve PM4Sand (Boulanger ve Ziotopoulou, 2017) bünye denklemleri kullanılarak modellenmiş, bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis2D aracılığıyla iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, sıvılaşma potansiyeli bulunmayan kum tabakası kalınlığının sıvılaşabilir kum tabakası üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

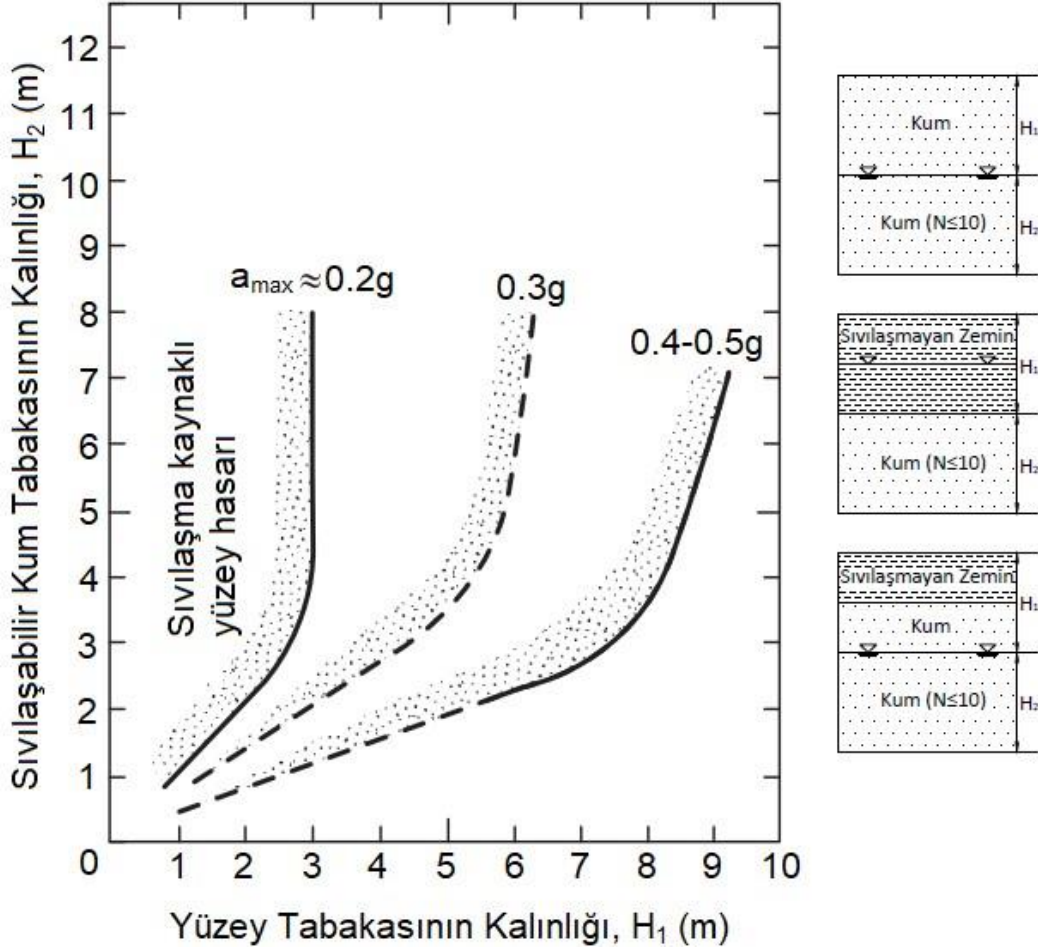
## 2. AMPİRİK YÖNTEM

Sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyinde oluşabilecek hasarları tahmin etmek amacıyla, literatürde Ishihara (1985) kriteri olarak bilinen ve Nihonkai-Chube ( $M_w=7.7$ ) ve Tangshan ( $M_w=7.8$ ) depremleri sonrası araziden elde edilen sınırlı veri setine dayanan bir yöntem yer almaktadır. Bu yöntem, sıvılaşabilir kum tabakasının üzerinde yeterli kalınlıkta sıvılaşma potansiyeli bulunmayan ve yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan bir zemin tabakası olması durumunda, sıvılaşmayla ilgili tehlikelerin oluşumunu tahmin etmek amacıyla, farklı pik yüzey ivme (PGA) değerlerine, sıvılaşma potansiyeli bulunmayan tabaka kalınlığına ( $H_1$ ) ve alttaki sıvılaşabilir kum zemin tabakası kalınlığına ( $H_2$ ) bağlı olarak geliştirilmiştir (Akbaş vd., 2023).

Şekil 1’de gösterilmiş olan Ishihara (1985) kriteri, başlangıçta tek bir eğri olarak 1983 yılında meydana gelen Nihonkai-Chube ( $M_w=7.7$ ) depreminde 200 gal ( $\approx 0.2g$ ) etki etmiş sahalardan elde edilen verileri kullanarak geliştirilmiş, daha sonrasında Gao vd. (1983) tarafından 1976 yılında meydana gelen Tangshan ( $M_w=7.8$ ) depreminden derlenen veriler yeniden yorumlanarak 400-500 gal ( $\approx 0.4-0.5g$ ) için karşılık gelen ikinci bir eğri eklenmiş



olup, müteakiben Ishihara interpolasyon yöntemi ile 300 gal ( $\approx 0.3g$ ) için karşılık gelecek üçüncü bir eğri tanımlamıştır. Bu eğriler toplu olarak, belirli bir PGA değeri için, sıvılaşmayan tabaka kalınlığının bir sınır değeri olduğunu ve bu değerin üzerinde sıvılaşabilir kum tabaka kalınlığından bağımsız olarak sıvılaşma kaynaklı yüzey hasarının beklenmediğini öne sürmektedir (Rateria ve Maurer, 2022).



Şekil 1. Ishihara kriteri

### 3. SAYISAL YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için oluşturulan zemin modeli ve kullanılan kuvvetli yer hareketlerinin özellikleri ile deprem yükleri altında zemin davranışını modellemek amacıyla kullanılan bünye denklemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

#### 3.1. Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları

Bu çalışma kapsamında, dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş, anakaya üzerinde alınmış, farklı karakteristik özelliklere sahip 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 g'ye ölçeklenmiş toplamda 4 adet kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılmıştır. Bu kuvvetli yer hareketi kayıtları ise yurt dışında meydana gelmiş depremlerden seçilmiştir. Kullanılan ivme-zaman kayıtlarına baseline düzeltmesi yapılmış ve Butterworth yaklaşımı ile 0.5-15 Hz arasında bandpass



filtreleme uygulanmıştır. Kuvvetli yer hareketi, sonlu elemanlar metoduyla oluşturulan sayısal modelin tabanından etki ettirilerek x ekseninde 0.5 m büyüklüğünde tanımlı deplasman olarak uygulanmış, y eksenindeki bileşeni ise fixed olarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan 4 farklı kuvvetli yer hareketinin karakteristik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kuvvetli yer hareketi özellikleri

No	Deprem	Kırılma Mekanizması	M <sub>w</sub>	Süre (sn)	f <sub>eq</sub> (Hz)
1	Chi Chi	Ters Oblik	7.62	52.5	1.32
2	Iwate	Ters	6.90	65.0	0.59
3	Loma Prieta	Ters Oblik	6.93	40.0	2.67
4	Parkfield	Doğrultu Atımlı	6.00	30.0	1.59

### 3.2. Zemin Bünye Modelleri

Sayısal analizlerde, kum tabakalarının zemin parametreleri Plaxis2D sonlu elemanlar yazılımı el kitapçığında yer alan, Boulanger ve Ziotopoulou (2017) tarafından önerilen %35 ve %75 rölatif sıklığa sahip Ottawa kumu üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen değerler kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında Ishihara kriteri göz önüne alınarak, sıvılaşabilir kum zemin tabakası için %35 rölatif sıklığa sahip, sıvılaşma potansiyeli bulunmadığı varsayılan kum zemin tabakası için ise %75 rölatif sıklığa sahip Ottawa kumu özellikleri seçilmiştir. Kum tabakalarının dinamik davranışını modelleyebilmek adına PM4Sand (Boulanger ve Ziotopoulou, 2017) bünye denklemleri kullanılmıştır. Bununla birlikte, başlangıç gerilme koşullarının belirlenmesinde PM4Sand bünye denklemleri yetersiz kaldığı için kum zemin tabakalarında dinamik yükleme öncesindeki davranışı modellemek amacıyla Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness (Benz, 2007) bünye denklemleri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan sıvılaşabilir (D<sub>r</sub>=%35) ve sıvılaşma potansiyeli bulunmadığı varsayılan (D<sub>r</sub>=%75) kum zemin tabakaları için ilgili parametreler ve değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

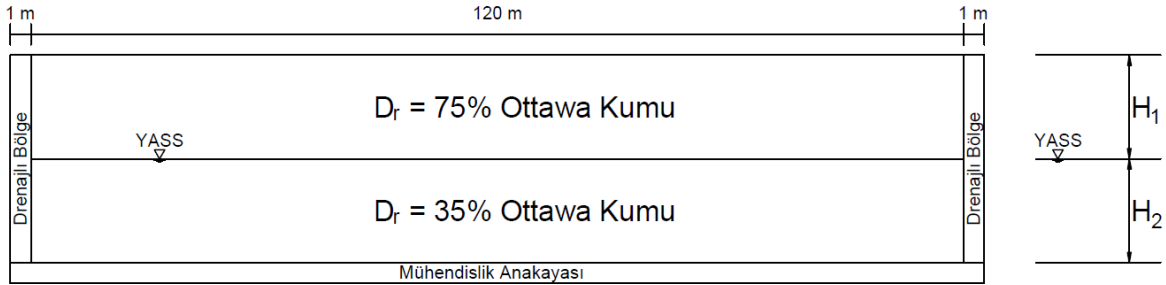
Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan HS Small ve PM4Sand parametreleri

Sembol	HS Small		Sembol	PM4Sand	
	D <sub>r</sub> = % 35	D <sub>r</sub> = % 75		D <sub>r</sub> = % 35	D <sub>r</sub> = % 75
γ <sub>k</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	15.34	16.52	γ <sub>k</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	15.34	16.52
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	19.36	20.10	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	19.36	20.10
e	0.695	0.575	e	0.695	0.575
E <sub>50ref</sub> (MPa)	21	45	D <sub>Ro</sub>	0.35	0.75
E <sub>oedref</sub> (MPa)	21	45	G <sub>0</sub>	476	890
E <sub>urref</sub> (MPa)	63	135	h <sub>po</sub>	0.53	0.63
m	0.59	0.47	e <sub>max</sub>	0.80	0.80
c' (MPa)	0	0	e <sub>min</sub>	0.50	0.50
φ' (°)	33	33	P <sub>a</sub> (MPa)	0.101	0.101
γ <sub>0.7</sub>	0.00017	0.00013	n <sup>b</sup>	0.50	0.50
G <sub>0ref</sub> (MPa)	83.80	111.00	n <sup>d</sup>	0.10	0.10
μ	0.30	0.30	φ <sub>cv</sub> (°)	33	33
P <sub>ref</sub> (MPa)	0.10	0.10	μ	0.30	0.30
R <sub>f</sub>	0.956	0.906	Q	10	10
k (m/s)	0.00019	0.00017	R	1.50	1.50



### 3.3. İki Boyutlu Sayısal Model

Çalışma kapsamında, serbest saha koşulları altında rölatif sıklığı %35 ve %75 olan Ottawa kumu kullanarak 20 m kalınlığa sahip zemin profilleri oluşturulmuştur. Ishihara kriteri göz önünde bulundurularak üst tabaka kalınlığının sıvılaşma davranışına olan etkisini incelemek amacıyla, sıvılaşma potansiyeli bulunmayan ve yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan zemin tabakası ( $H_1$ ) için %75 rölatif sıklığa sahip, sıvılaşabilir zemin tabakası ( $H_2$ ) için ise %35 rölatif sıklığa sahip Ottawa kumu özellikleri kullanılmıştır. 4 farklı kuvvetli yer hareketi kaydını etki ettirebilmek adına, zemin modelinin taban kısmına 1 m kalınlığında anakaya tanımlanmıştır. Zemin profilinin yatay uzunluğu 120 m olarak seçilmiş ve sınır şartları ile uygunluk göstermesi için modelin her iki tarafına 1 m kalınlığında kum zemin tabakası ile benzer özelliğe sahip drenajlı zemin tabakaları tanımlanmıştır. İki boyutlu sayısal analizlerde, kuvvetli yer hareketinin doğru bir şekilde modellenebilmesi amacıyla, üst ve yatay sınır koşulları "serbest", alt sınır koşulu ise "compliant base" olarak seçilmiştir. Nümerik analizlerde kullanılan örnek iki boyutlu sayısal model Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Sayısal analizlerde kullanılan örnek zemin profili

Sonlu elemanlarla gerçekleştirilen dinamik analizlerdeki önemli hususlardan biri de zemin tabakalarının sönüm parametrelerinin belirlenmesidir. Plaxis2D yazılımı yardımıyla gerçekleştirilen analizlerde malzeme sönümünü modelleyebilmek adına hedef sönüm oranı ( $\xi$ ) kullanılmıştır. Laera ve Brinkgreve (2015) tarafından hedef sönüm oranlarının %0.5 ile %2 arasında seçilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda, kum zemin tabakalarının hedef sönüm oranı %2 olarak seçilmiştir (Subaşı vd., 2023). Geriye kalan Rayleigh sönüm parametreleri, Plaxis'te Hedef 1 ( $f_1$ ) ve Hedef 2 ( $f_2$ ) olmak üzere iki farklı değişkenle belirlenmektedir. Burada,  $f_1$  tüm zemin profilinin hakim frekansını göstermekte,  $f_2$  ise deprem hakim frekansının zemin profilinin hakim frekansına oranı yardımıyla belirlenmektedir (Hudson vd., 1994). Dinamik analizler için bir diğer önemli husus ise deprem dalgalarının düğüm noktaları arasında bir dinamik zaman adımında birden fazla elemandan geçmesini önlemek amacıyla kullanılan, Denklem 1 ile verilen kritik zaman adımının ( $\Delta t$ ) uygun bir şekilde tanımlanmasıdır. Burada,  $l_{min}$  üç düğüm noktası arasındaki minimum uzunluk iken,  $V_{s,tabaka}$  ise zemin tabakasının kayma dalgası hızıdır. Denklem 1 aracılığıyla kritik zaman adımı 0.005 saniyedir (Plaxis2D Bilimsel El Kitabı, 2024).

$$\Delta t_{kritik} = \frac{l_{min}}{V_{s,tabaka}} \quad (1)$$

Sismik dalgaların yayılımını doğru bir şekilde modellemek için, sonlu eleman yöntemleri kullanılarak yapılan dinamik analizlerde gerekli ortalama eleman boyutu (OEB), Kuhlemeyer ve Lysmer (1973) tarafından önerilen yaklaşım ile belirlenmiştir. Bu yaklaşım, Denklem 2'de belirtilmiş olup, burada  $V_{s,min}$  zemin profilindeki minimum kayma dalgası hızı iken,  $f_{maks}$



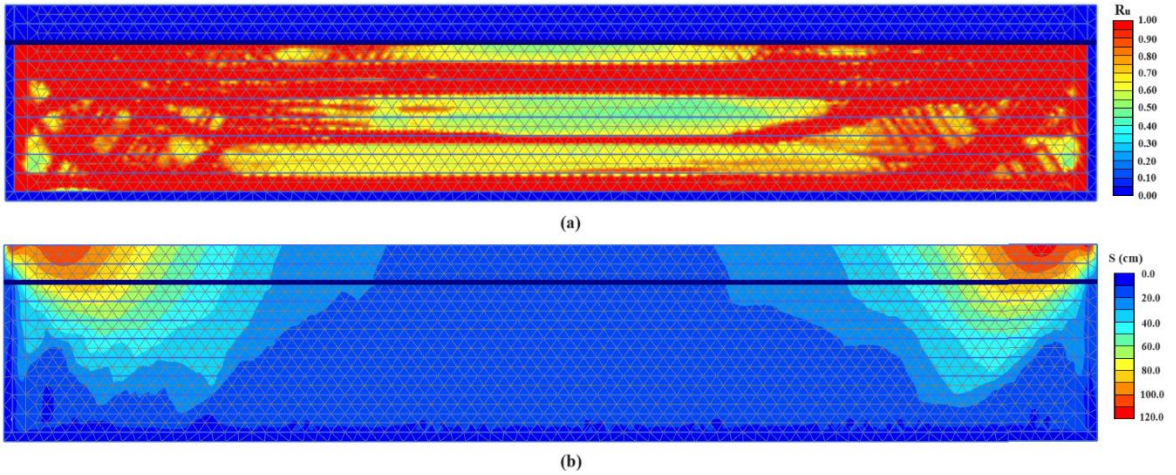
ivme-zaman kaydının maksimum frekans içeriğidir. İki boyutlu sayısal analizler, 15 düğüm noktalı 3421 üçgen eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortalama eleman boyutu, Denklem 2’de belirtilen yaklaşım kullanılarak 1.30 m olarak seçilmiştir.

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

Yapılan analizler toplamda 3 aşamadan oluşmaktadır. Kum zemin tabakalarında başlangıçta  $K_0$  prosedürü tanımlanmıştır. Sonraki aşamada, PM4Sand bünye modelinin başlangıç gerilme koşullarını belirlemedeki yetersizliğini ortadan kaldırmak için kum zemin tabakalarının özelliklerine uygun bir şekilde Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSSmall) modeli kullanılan bir adım tanımlanmıştır. Son aşamada ise, sayısal modelin tabanı boyunca ivme-zaman kayıtları etki ettirilerek PM4Sand bünye modeli kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, farklı karakteristik özelliklere sahip olan toplamda 4 adet kuvvetli yer hareketi kaydı ve PM4Sand bünye modeli kullanılarak gerçekleştirilen iki boyutlu sayısal analizlerde, pik yüzey ivme (PGA) değerlerine, rölatif sıklıklara ( $D_r$ ), sıvılaşma potansiyeli bulunmayan ve sıvılaşabilir kum tabaka kalınlıklarına bağlı olarak zemin tabakalarının kuvvetli yer hareketi esnasındaki dinamik davranışı, yüzeyinde meydana gelen oturma miktarları incelenmiş ve üst tabaka kalınlığının sıvılaşma davranışına olan etkisi irdelenmiştir. Sayısal analizler doğrultusunda, örnek teşkil etmesi amacıyla sıvılaşma potansiyeli bulunmayan ( $H_1$ ) zemin tabakasının kalınlığının 4 m, sıvılaşabilir kum zemin tabakasının kalınlığının ( $H_2$ ) 16 metre ve pik yüzey ivmesinin (PGA) 0.3g olduğu durumda Iwate depremi için elde edilen boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ) değerleri ve oturma miktarları Şekil 3’te gösterilmiştir.

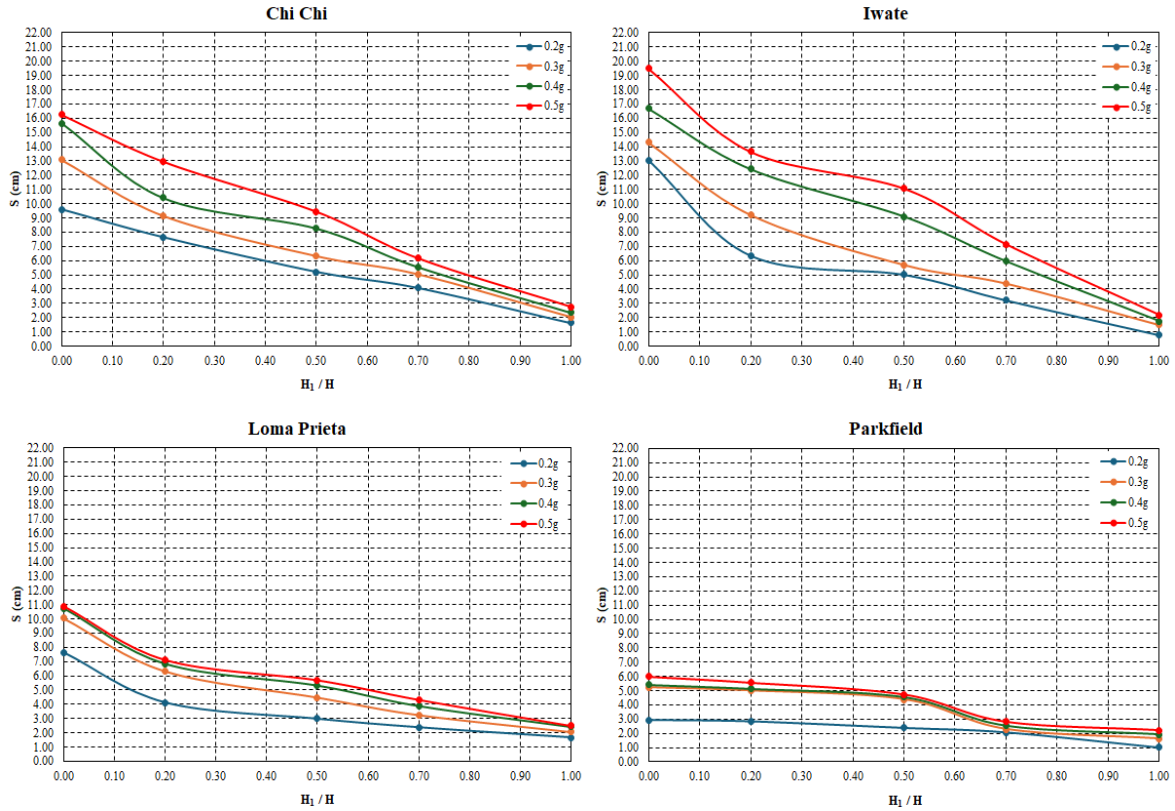


Şekil 3. Sonlu elemanlar yöntemi ile Iwate depremi için elde edilen a)  $R_u$  değerleri b) Oturma miktarları

Analizler sonucunda, farklı kalınlıklara sahip sıvılaşma potansiyeli bulunmayan ve sıvılaşabilir kum zemin tabakalarının, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5g’ye ölçeklenmiş dört farklı kuvvetli yer hareketi sonucunda elde edilen oturma değerleri sıvılaşma potansiyeli bulunmayan zemin tabakası kalınlığının toplam zemin profili kalınlığına oranına ( $H_1/H$ ) bağlı olarak incelenmiş, sonuçlar Tablo 3’te ve Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 3. Sayısal analizler sonucunda elde edilen oturma değerleri

No	Deprem	Oturma Değerleri (cm)				
		H <sub>1</sub> /H	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g
1	Chi Chi	0.00	9.586	13.090	15.650	16.250
		0.20	7.637	9.147	10.403	12.955
		0.50	5.218	6.318	8.270	9.449
		0.70	4.082	5.032	5.562	6.168
		1.00	1.622	2.022	2.366	2.757
		0.00	13.060	14.300	16.680	19.500
2	Iwate	0.20	6.356	9.212	12.430	13.650
		0.50	5.023	5.710	9.104	11.070
		0.70	3.230	4.399	5.965	7.161
		1.00	0.788	1.484	1.761	2.194
		0.00	7.641	10.042	10.750	10.886
		0.20	4.128	6.326	6.864	7.125
3	Loma Prieta	0.50	2.984	4.486	5.337	5.699
		0.70	2.384	3.253	3.902	4.330
		1.00	1.672	2.062	2.434	2.505
		0.00	2.918	5.218	5.410	5.982
		0.20	2.820	4.994	5.134	5.562
		1.00	1.035	1.622	1.930	2.210
4	Parkfield	0.50	2.376	4.381	4.555	4.735
		0.70	2.070	2.292	2.539	2.805
		1.00	1.035	1.622	1.930	2.210



Şekil 4. Dinamik analizler sonucunda elde edilen oturma değerleri





Tablo 3'te ve Şekil 4'te görüldüğü üzere, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının karakteristik özelliklerinin farklılıklarından dolayı, en büyük oturma değerleri Iwate depremi sonucunda elde edilirken, en düşük oturma değerleri ise Parkfield depremi sonucunda gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, sıvılaşabilir kum zemin tabakası üzerinde yer alan, sıvılaşma potansiyeli bulunmayan kum zemin tabakasının kalınlığı,  $H_1/H$  oranı, arttıkça kuvvetli yer hareketi sonucunda yüzeyde meydana gelen oturma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Analizler sonucunda, sıvılaşabilir kum zemin tabakası üzerinde yer alan sıvılaşma potansiyeli bulunmayan zemin tabakasının kalınlığı arttıkça, özellikle  $H_1/H$  oranının 0.5 değerinden fazla olduğu durumlarda oturma değerlerinde kayda değer miktarda azalma meydana gelmektedir.

Son olarak belirtilmelidir ki, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının sayısı artırılarak ve daha farklı özelliğe sahip zemin tabakaları göz önüne alınarak incelemeler yapılmalı, model laboratuvar ve arazi sonuçlarıyla desteklenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Akbaş, M., Subaşı, O., Kaygusuz, Z., İyisan, R. (2023). Sıvılaşma Kaynaklı Oturmaların Azaltılmasında Üst Dolgu Tabakasının Etkisi: Bir Vaka Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 11(1), 126-144, 2023. DOI: 10.21923/jesd.1174506.
- Benz, T. (2007). Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. PhD thesis. Geotechnical Institute – University of Stuttgart.
- Boulanger, R.W. ve Ziotopoulou, K. (2017). PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-17/01, March.
- 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, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:3\(387\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:3(387)).
- Gao, H., Hu, B., Chang, D. (1983). Some geological considerations for the damage during the Tangshan earthquake. *North China Earthquake Sciences*, 1, 64-72.
- Hudson, M., Idriss, I., Beirkae, M. (1994). Quad4m User's Manual.
- Ishihara, K., (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, CA, USA, 1, 321-376.
- Koltuk, S., Subasi, O., Fernandez-Steeger, T. *et al.* (2022). Beurteilung des Bodenverflüssigungspotenzials bei Erdbeben mithilfe von SPT-Schlagzahlen und zweidimensionalen Finite-Element-Analysen. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 27, 309–322. <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00521-6>.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Kuhlemeyer, R.L. ve Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 99(5):421-427.
- Laera, A. ve Brinkgreve, R.B.J. (2015). *Plaxis Site Response Analysis and Liquefaction Evaluation*.
- Plaxis BV. (2024). *Plaxis2D Scientific Manual*.



- Rateria, G. ve Maurer B.W. (2022). Evaluation and updating of Ishihara's (1985) model for liquefaction surface expression, with insights from machine and deep learning Soils and Foundations, Volume 62, Issue 3, 2022, 101131, ISSN 0038-0806, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101131>.
- Subasi, O., Koltuk, S., İyisan, R. (2022). A Numerical Study on the Estimation of Liquefaction-Induced Free-Field Settlements by Using PM4Sand Model. KSCE J Civ Eng 26, 673–684. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0719-0>.
- Subaşı, O. ve İyisan, R. (2021). Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen oturmaların PM4Sand bünye modeli ile incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(3), 378-388, 2022. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.06606>.
- Subaşı, O., Koltuk, S., Akbaş, M., İyisan, R. (2023). İki Boyutlu Dinamik Analiz Sonuçlarına Sonlu Eleman Ağ Sıklığının Etkisi. 9. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım 2023, İstanbul.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$\mu$	Poisson oranı	m	Gerilme bağımlılığı oranı
c'	Efektif kohezyon	$M_w$	Moment magnitüd
CSR	Çevrimsel gerilme oranı	$n^b$	Sınır yüzeyi parametresi
$D_r$	Rölatif sıklık	$n^d$	Dilatasyon yüzeyi parametresi
$D_{R0}$	Rölatif sıklık – PM4Sand	OEB	Ortalama eleman boyutu
e	Boşluk oranı	$P_a$	Atmosfer basıncı
$E_{50ref}$	Sekant elastisite modülü	PGA	Pik yüzey ivmesi
$e_{max}$	Maksimum boşluk oranı	$P_{ref}$	Referans basınç
$e_{min}$	Minimum boşluk oranı	Q, R	Kritik durum parametreleri
$E_{oedref}$	Tanjant elastisite modülü	$R_f$	Göçme oranı
$E_{urref}$	Yükleme boşaltma modülü	$R_u$	Boşluk suyu basıncı oranı
$f_{eq}$	Deprem hakim frekansı	$V_{s,min}$	Zemin profilindeki minimum kayma dalgası hızı
$f_{maks}$	Deprem kaydının maksimum frekansı	$V_{s,tabaka}$	Zemin tabakasının kayma dalgası hızı
FS	Güvenlik katsayısı	$\gamma_{0.7}$	Kayma birim şekil değiştirme oranı
$G_0$	Kayma modülü katsayısı	$\gamma_d$	Doğgun birim hacim ağırlık
$G_{0ref}$	Küçük birim şekil değiştirmelerde kayma modülü	$\gamma_k$	Kuru birim hacim ağırlık
$h_{p0}$	Büzülme oranı parametresi	$\Delta t_{kritik}$	Kritik zaman adımı
k	Permabilite	$\phi'$	Efektif içsel sürtünme açısı
$l_{min}$	Üç düğüm noktası arasındaki minimum uzunluk	$\phi_{cv} (^\circ)$	Kritik durum içsel sürtünme açısı

