Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

MÜHENDİSLİK DOLGUSUNUN SUYA DOYGUN GEVŞEK KUMLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

EFFECT OF ENGINEERED FILL ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF SATURATED LOOSE SANDS

Burak OKUR[1], Taylan AKSOY[2], Merve AKBAŞ[3], Ozan SUBAŞI[4], Recep İYİSAN[5]

ÖZET

Sıvılaşabilir zemin tabakaları üzerinde teşkil edilen mühendislik dolgularının kuvvetli yer hareketi altındaki davranışı ve sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi, geoteknik tasarım süreçlerinde değerlendirilen konular arasında yer almaktadır. Özellikle bu zemin koşullarında imal edilen mühendislik dolguları, sıvılaşma kaynaklı oturmaların sınırlandırılmasına katkı sağlayan maliyet etkin bir iyileştirme stratejisi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, sıvılaşabilir zemin tabakası üzerinde bulunan mühendislik dolgusu kalınlığının sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak iki boyutlu sayısal analizlerle incelenmiştir. Serbest saha koşulları altında farklı mühendislik dolgusu ve sıvılaşabilir tabaka kalınlığına sahip zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri ile 0.2g, 0.3g, 0.4g ve 0.5g ivme değerlerine ölçeklenmiş farklı deprem kaynak özelliklerine sahip toplam 7 adet ivme-zaman kaydı kullanılarak iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde sıvılaşabilir kum tabakasının dinamik davranışını temsil etmek amacıyla PM4Sand bünye modeli kullanılmıştır. Analizler sonucunda sıvılaşabilir tabaka üzerinde yer alan mühendislik dolgusunun sıvılaşma davranışına ve sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi sayısal olarak değerlendirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Mühendislik dolgusu, PM4Sand, Sıvılaşma, Sonlu elemanlar yöntemi*

ABSTRACT

The behavior of engineered fills constructed over liquefiable soil layers under strong ground motion and their effect on liquefaction-induced settlements are among the subjects considered in geotechnical design. Engineered fills constructed under such conditions can be considered a cost-effective ground improvement strategy that contributes to the mitigation of liquefaction-induced settlements. In this study, the effect of engineered fill thickness overlying liquefiable soil layers on liquefaction-induced settlements was investigated through two-dimensional numerical analyses using the finite element method. Soil models with varying engineered fill and liquefiable layer thicknesses were developed under free-field conditions. Two-dimensional dynamic analyses were performed using a total of 7 acceleration time histories with different source characteristics, scaled to peak ground acceleration levels of 0.2g, 0.3g, 0.4g and 0.5g. The PM4Sand constitutive model was employed to represent the dynamic behavior of the liquefiable sand layer. Based on the results, the effect of engineered fill overlying the liquefiable layer on liquefaction behavior and liquefaction-induced settlements was evaluated.
Keywords: *Engineered fill, Finite element method, Liquefaction, PM4Sand*

[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., okurb23@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] İnşaat Yüksek Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., aksoyt16@itu.edu.tr
[3] Araş. Gör. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, akbasm@itu.edu.tr
[4] Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, ozan.subasi@comu.edu.tr
[5] Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, iyisan@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kuvvetli yer hareketi esnasında suya doygun gevşek kumlu zeminlerde meydana gelen ve mühendislik yapılarının güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilen sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğinin temel araştırma konularından biri olarak değerlendirilmektedir. Dinamik yükleme koşulları altında drenajın gerçekleşemediği kısa zaman aralıklarında boşluk suyu basıncının hızla artması zeminin efektif gerilmesini ve kayma mukavemetini azaltmakta, bu durum zeminin viskoz bir akışkan benzeri davranış sergilemesine ve sıvılaşmasına neden olmaktadır. Bu davranış, temel sistemlerinde taşıma gücü kayıplarından aşırı oturmalara ve altyapı ağlarının işlevselliğinin etkilenmesine kadar farklı mertebe ve çeşitlerde yapısal hasarlara sebebiyet verebilmektedir (Kramer ve Stewart, 2024).

Türkiye'nin yüksek sismik aktiviteye sahip bir coğrafyada yer alması, zemin birimlerinin sıvılaşma potansiyelinin geoteknik tasarım süreçlerinde dikkatle değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Nitekim 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli olarak art arda meydana gelen iki deprem (M_w=7.8 ve M_w=7.6) geniş bir etki alanında yapısal hasarlara yol açmıştır. Birçok yerleşim bölgesinde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı yüzey deformasyonları, bu davranışın mühendislik yapıları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha göstermiştir (Çetin vd., 2023; Tobita vd., 2024).

Sıvılaşma kaynaklı meydana gelen hasarların mertebesi, yalnızca sıvılaşabilir tabakanın mühendislik özellikleriyle değil aynı zamanda bu tabakanın üzerinde yer alan üst tabakanın kalınlığı ve mukavemet özellikleriyle de ilişkili olabilmektedir. Bu doğrultuda, sıvılaşabilir zemin tabakası üzerinde yeterli kalınlık ve mukavemete sahip bir üst tabaka oluşturmak amacıyla teşkil edilen mühendislik dolguları, sıvılaşma kaynaklı oturmaların sınırlandırılmasına katkı sağlayabilecek, uygulanabilir ve maliyet etkin bir zemin iyileştirme yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Bu tür zemin iyileştirme yöntemlerinin performansının değerlendirilmesinde, boşluk suyu basıncı gelişimini ve zemin tabakalarının dinamik davranışını temsil edebilen sonlu elemanlar tabanlı sayısal analizler bir araç olarak öne çıkmaktadır (Boulanger vd., 2018; Subaşı vd., 2022; Akbaş vd., 2023).

Bu çalışmada, sıvılaşabilir kum tabakası üzerinde teşkil edilen mühendislik dolgusunun sıvılaşma davranışına ve sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, serbest saha koşulları altında farklı mühendislik dolgusu ve sıvılaşabilir tabaka kalınlıklarına sahip zemin kesitleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu zemin kesitlerine farklı deprem kaynak özelliklerine sahip toplam 7 adet kuvvetli yer hareketi kaydı 0.2g, 0.3g, 0.4g ve 0.5g ivme değerlerine ölçeklenerek uygulanmış ve iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, maksimum yüzey ivmesine (PGA), mühendislik dolgusu ve sıvılaşabilir tabaka kalınlıklarına bağlı olarak zemin tabakalarının dinamik davranışı ve yüzeyde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı oturma miktarları incelenmiştir. Sıvılaşabilir kum tabakasının dinamik davranışı PM4Sand (Boulanger ve Ziotopoulou, 2017) bünye modeliyle, mühendislik dolgusunun davranışı ise Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness (Benz, 2007) bünye modeliyle temsil edilmiş, analizler bir sonlu elemanlar yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları doğrultusunda, farklı dinamik yükleme koşullarında ve tabaka kalınlıklarında mühendislik dolgusunun sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi değerlendirilmiştir.

2. SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMASI

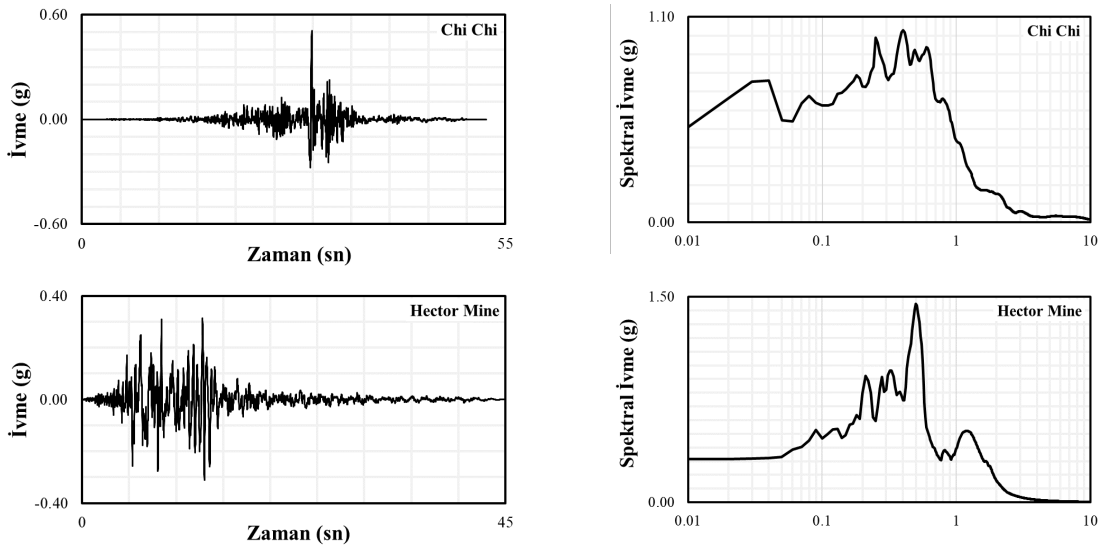
Bu çalışma kapsamındaki sayısal analizler, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde kullanılan ivme-zaman kayıtları, zemin tabakalarının davranışını temsil eden malzeme modelleri ile oluşturulan sayısal model geometrisi, sınır koşulları ve analiz aşamaları alt başlıklar halinde sunulmuştur.

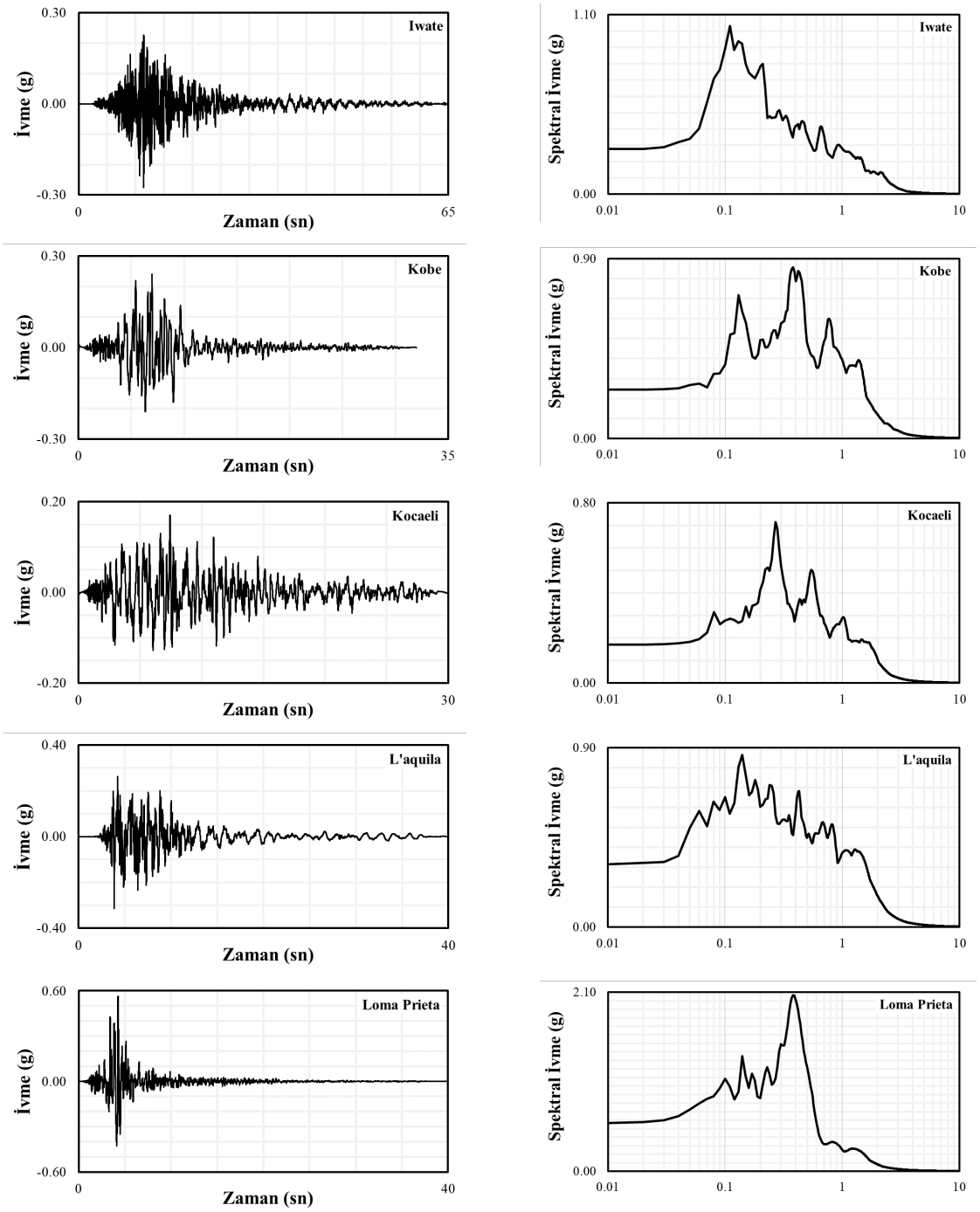
2.1. Dinamik Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtları

İki boyutlu sayısal analizlerde, dünyanın farklı sismotektonik bölgelerinde anakaya üzerinde kaydedilmiş ve farklı deprem kaynak özelliklerine sahip toplam 7 adet ivme-zaman kaydı kullanılmıştır. Söz konusu kayıtlar, sayısal model girdisi olarak kullanılmadan önce 0.2g, 0.3g, 0.4g ve 0.5g maksimum yüzey ivmesi değerlerine ölçeklendirilmiş, aynı zamanda baseline düzeltmesi ve Butterworth yöntemiyle 0.5-15 Hz bant aralığında bandpass filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Kuvvetli yer hareketleri sonlu elemanlar yazılımında oluşturulan iki boyutlu zemin modelinin tabanından x doğrultusunda 0.5 m büyüklüğünde tanımlı (prescribed) deplasman, y yönünde ise sabit (fixed) olarak uygulanmıştır. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri Tablo 1'de, bu kayıtların ölçeklendirilmemiş (ham) ivme-zaman geçmişleri ve yatay elastik tepki spektrumları ise Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sayısal analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özet bilgileri

No	Deprem	Yıl	Kırılma Mekanizması	M_w	Süre (sn)	f_{eq} (Hz)
1	Chi Chi	1999	Ters Oblik	7.62	52.5	1.32
2	Hector Mine	1999	Doğrultu Atımlı	7.13	45.0	1.82
3	Iwate	2008	Ters	6.90	65.0	0.59
4	Kobe	1995	Ters	6.90	32.0	0.73
5	Kocaeli	1999	Doğrultu Atımlı	7.51	30.0	1.93
6	L'aquila	2009	Normal	6.30	40.0	0.59
7	Loma Prieta	1989	Ters Oblik	6.93	40.0	2.67





Şekil 1. Deprem kayıtlarının ham hallerine ait ivme-zaman geçmişleri ve yatay elastik tepki spektrumları

2.2. Malzeme Modelleri ve Parametreleri

İki boyutlu sayısal analizlerde oluşturulan zemin kesitleri, sıvılaşma potansiyeline sahip bir kum tabakası ile bu tabaka üzerinde yer alan mühendislik dolgusundan oluşmaktadır.

Kum tabakasının mühendislik özellikleri, %35 rölatif sıkılığa sahip Ottawa kumu üzerinde Boulanger ve Ziotopoulou (2017) tarafından gerçekleştirilen dinamik basit kesme deneylerinden elde edilen verilere dayanmaktadır. Bu tabakanın deprem yükleme koşulları altındaki davranışı PM4Sand (Boulanger ve Ziotopoulou, 2017) bünye modeliyle temsil

edilmiştir. Ancak PM4Sand bünye modelinin başlangıç gerilme koşullarını tanımlamada sınırlı olmasından dolayı dinamik yükleme öncesindeki zemin davranışı için Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HS Small) (Benz, 2007) malzeme modeli kullanılmıştır.

Mühendislik dolgusunun malzeme özellikleri ise Sun vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında sunulan verilerden elde edilmiştir. Bu malzemenin davranışı HS Small bünye modeliyle temsil edilmiştir. Mühendislik dolgusu, imalat gereksinimleri ve model kurgusu itibarıyla suya doygun bir malzeme olarak tanımlanmamıştır. Bu nedenle sıvılaşma potansiyeli taşımayan mühendislik dolgusu için PM4Sand veya sıvılaşma davranışını temsil edebilecek başka bir bünye modeline ayrıca ihtiyaç duyulmamıştır. Bu doğrultuda, sayısal analizlerde kullanılan sıvılaşabilir kum tabakasına ve mühendislik dolgusuna ait tanımlanan malzeme modeli parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Sıvılaşabilir kum tabakası ve mühendislik dolgusuna ait malzeme modelleri ve parametreleri

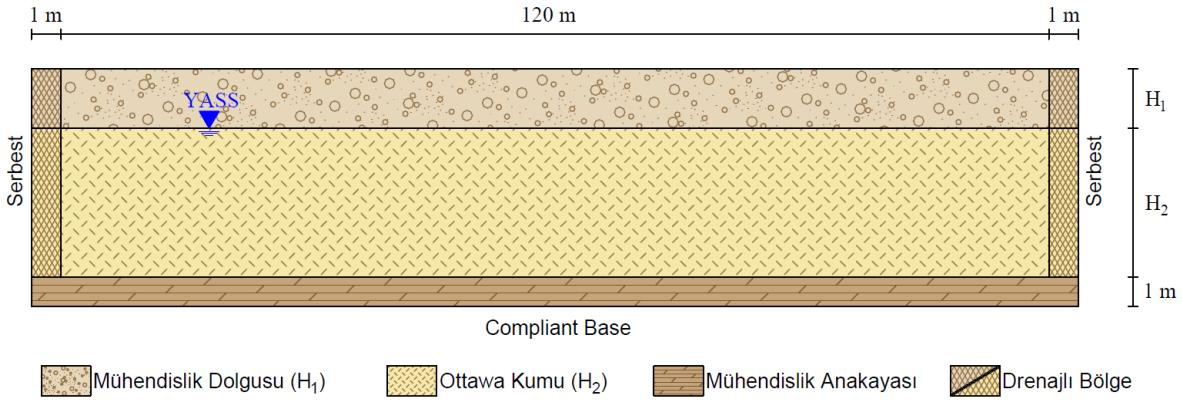
HS Small			**PM4Sand**	
Sembol	**Ottawa Kumu**	**Mühendislik Dolgusu**	**Sembol**	**Ottawa Kumu**
γ_k (kN/m^3)	15.34	17.5	γ_k (kN/m^3)	15.34
γ_d (kN/m^3)	19.36	18.0	γ_d (kN/m^3)	19.36
e	0.695	0.5	e	0.695
E_{50ref} (MPa)	21	36	D_{R0}	0.35
E_{oedref} (MPa)	21	36	G_0	476
E_{urref} (MPa)	63	108	h_{p0}	0.53
m	0.59	0.5	e_{max}	0.80
c' (MPa)	0	0	e_{min}	0.50
ϕ' (°)	33	34	P_a (MPa)	0.101
$\gamma_{0.7}$	0.00017	0.0002	n^b	0.50
G_{0ref} (MPa)	83.8	113	n^d	0.10
μ	0.30	0.20	ϕ_{cv} (°)	33
P_{ref} (MPa)	0.10	0.10	μ	0.30
R_f	0.956	0.90	Q, R	10, 1.5

2.3. Sayısal Model, Sınır Koşulları ve Analiz Aşamaları

Bu çalışmada, sıvılaşabilir kum tabakası ve mühendislik dolgusu kalınlıklarının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla serbest saha koşulları altında farklı tabaka kalınlıklarına sahip zemin kesitleri oluşturulmuştur. Bu kapsamda, mühendislik dolgusu kalınlığı (H_1) 0 m ile 6 m arasında 2 m'lik artışlarla, sıvılaşabilir kum tabakası kalınlığı (H_2) ise 10 m ile 25 m arasında 5 m'lik artışlarla değiştirilerek toplamda 16 farklı zemin modeli oluşturulmuştur. Kum tabakasının üst sınırında tanımlanan yeraltı su seviyesi (YASS), mühendislik dolgusunun doygun olmayan malzeme koşullarını koruyacak şekilde konumlandırılmıştır. Oluşturulan zemin modellerine, detayları Bölüm

2.1'de sunulan kuvvetli yer hareketi kayıtları etki ettirilerek toplamda 448 adet iki boyutlu dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Analizlere esas zemin modelinin yatay uzunluğu 120 m olarak belirlenmiş, deprem kayıtlarının modele etki ettirilebilmesi amacıyla model tabanına 1 m kalınlığında mühendislik anakayası tanımlanmıştır. Model içerisindeki sismik dalgaların yayılımının fiziksel gerçeklikle uyumlu bir biçimde aktarılması ve yansımaların önlenmesi amacıyla modelin her iki yatay kenarına, etki alanındaki birime benzer özelliklere sahip 1 m kalınlığında drenajlı tabakalar tanımlanmıştır. Aynı amaç doğrultusunda model üst ve yan sınırları serbest, alt sınırı ise compliant base olarak tanımlanmıştır. İki boyutlu sayısal model, temsili tabaka kalınlıkları ve tanımlanan sınır koşulları Şekil 2 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 2. İki boyutlu dinamik analizlerde kullanılan temsili sayısal model

Mühendislik dolgusu ve sıvılaşabilir kum zemin tabakasının doğrusal olmayan davranışını sayısal ortamda temsil edebilmek amacıyla, hedef sönüm oranı (ξ) yaklaşımından yararlanılmıştır. Laera ve Brinkgreve (2015), hedef sönüm oranının kum zeminler için genellikle %0.5 ile %2 aralığında seçilmesinin doğrusal olmayan zemin davranışının sayısal olarak temsilinde uygun sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Subaşı vd. (2023), Plaxis2D tabanlı dinamik analizlerinde %2 sönüm oranını tercih etmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, analizlerde kum tabakası ve mühendislik dolgusu için hedef sönüm oranı %2 olarak tanımlanmıştır.

Dinamik analizlerde kullanılan frekans bileşenlerinin tanımlanmasında ise Hudson vd. (1994) tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır. Rayleigh sönüm parametreleri, iki farklı hedef frekans üzerinden tanımlanan Hedef 1 (f_1) ve Hedef 2 (f_2) değişkenleri aracılığıyla belirlenmektedir. Burada f_1, zemin kesitinin hakim frekansını, f_2 ise deprem hakim frekansının zemin kesitinin hakim frekansına oranı dikkate alınarak belirlenen ikinci hedef frekansı ifade etmektedir.

Kritik zaman adımının (Δt_{kritik}) uygun şekilde belirlenmesi, dinamik analizlerde dikkate alınması gereken bir diğer parametredir. Bu parametre, deprem dalgalarının bir dinamik zaman adımı süresince birden fazla sonlu elemandan geçmesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Denklem 1'de sunulan kritik zaman adımının hesaplanmasında l_{min} üç düğüm noktası arasındaki en kısa mesafeyi, $V_{s,tabaka}$ ise ilgili zemin tabakasının kayma dalgası hızını göstermektedir. Bu bağıntıya göre yapılan hesaplama sonucunda kritik zaman adımı 0.005 s olarak bulunmuştur (Plaxis2D Bilimsel El Kitabı, 2025).

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

Sayısal model boyunca sismik dalgaların yayılımının doğru biçimde temsil edilebilmesi için, dinamik analizlerde kullanılan ortalama eleman boyutunun (OEB) uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Kuhlemeyer ve Lysmer (1973) tarafından önerilen bağıntı esas alınarak ortalama eleman boyutu belirlenmiştir. Denklem 2'de sunulan yaklaşımda, $V_{s,min}$ zemin kesitindeki en düşük kayma dalgası hızını, f_{maks} ise uygulanan ivme–zaman kaydının maksimum frekans içeriğini ifade etmektedir. Hesaplama sonucunda model için ortalama eleman boyutu 1.3 m olarak seçilmiştir.

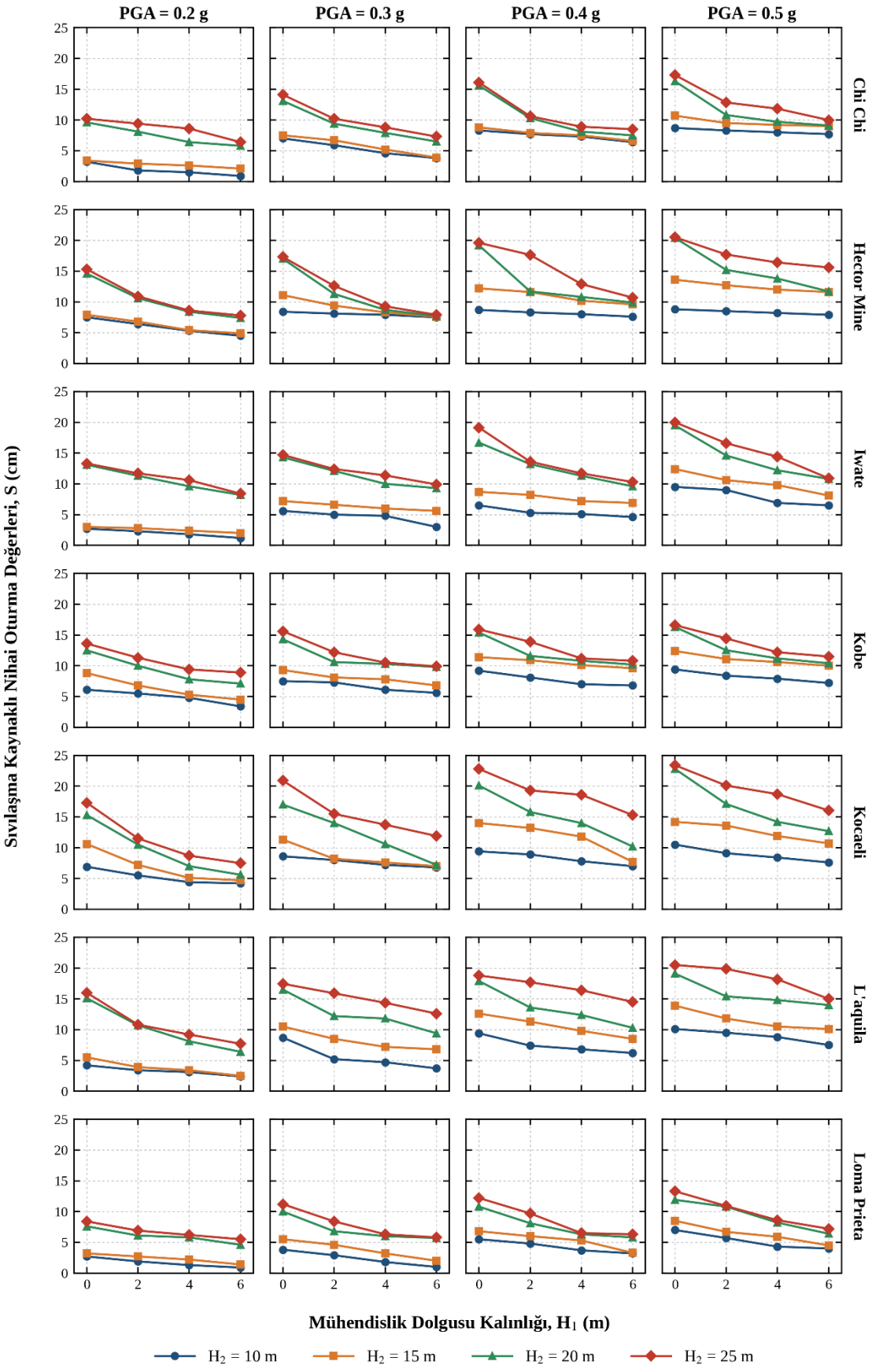
$$OEB \leq \frac{V_{s,min}}{8f_{maks}} \quad (2)$$

Bu çalışmada gerçekleştirilen iki boyutlu dinamik analizler, her bir zemin kesiti için dört ayrı aşamadan oluşan bir sıra takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Analizlerin başlangıcında K_0 koşulu tanımlanmış, ardından PM4Sand bünye modelinin başlangıç gerilme koşullarını belirlemedeki sınırlılığı nedeniyle sıvılaşabilir kum tabakası için HS Small malzeme modeli tanımlanmıştır. Bu aşamayı takiben kuvvetli yer hareketi kayıtları modele uygulanmış, kum tabakasının dinamik davranışı PM4Sand bünye modeliyle drenajsız koşullar altında analiz edilmiştir. Son aşamada, sıvılaşma sonrası (post-liquefaction) davranışı temsil etmek amacıyla analiz süreci drenajlı koşullar altında devam ettirilmiştir. Mühendislik dolgusu, detayları Bölüm 2.2'de sunulduğu üzere tüm aşamalarda HS Small bünye modeliyle temsil edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, mühendislik dolgusu kalınlığının sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisini incelemek amacıyla farklı deprem kaynak özelliklerine sahip 7 kuvvetli yer hareketi kaydı 0.2g, 0.3g, 0.4g ve 0.5g ivme değerlerine ölçeklenerek kullanılmıştır. Mühendislik dolgusu kalınlığı (H_1) 0, 2, 4 ve 6 m, sıvılaşabilir kum tabakası kalınlığı (H_2) ise 10, 15, 20 ve 25 m olacak şekilde değiştirilmiş ve PM4Sand bünye modeli aracılığıyla toplam 448 adet iki boyutlu dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sıvılaşma kaynaklı nihai oturma değerleri (S), kuvvetli yer hareketi, maksimum yüzey ivmesi ve tabaka kalınlıkları temel alınarak Şekil 3'te paylaşılmıştır. Şekil 3'te sunulan sıvılaşma kaynaklı nihai oturma değerleri, dinamik analiz aşamasından itibaren sayısal model yüzeyinde meydana gelen düşey deplasmanları temsil etmekte olup mühendislik dolgusunun statik yükleme koşulları altındaki davranışını kapsamadığı belirtilmelidir.

Şekil 3'te sunulduğu üzere, mühendislik dolgusu kalınlığının artması sıvılaşma kaynaklı meydana gelen nihai oturma değerlerinde azalmaya karşılık gelmektedir. Bu eğilim, tüm deprem kayıtları ve maksimum yüzey ivmesi değerlerinde tutarlı biçimde korunmakla birlikte oturmalardaki azalmanın mertebesi kayıtlar arası farklılık göstermektedir. En yüksek oturma değerleri genel olarak Kocaeli depremi altında, en düşük oturma değerleri ise Loma Prieta depremi altında meydana gelmiştir. Bu farklılığın, ivme-zaman kayıtlarının frekans içeriği ve süre gibi kaynak özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, aynı deprem kaydı ve tabaka kalınlıklarında oturma davranışının ivme seviyesine bağlı olarak değişmesinin, kum tabakasının doğrusal olmayan davranışıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Sayısal analiz değişkenlerine bağlı deprem bazlı sıvılaşma kaynaklı nihai oturma değerleri

Mühendislik dolgusunun oturma davranışı üzerindeki etkisinin nicel olarak ifade edilebilmesi amacıyla her maksimum yüzey ivmesi için yedi deprem kaydı ve dört sıvılaşabilir tabaka kalınlığı üzerinden ortalama oturma değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama oturma değerlerinin, mühendislik dolgusunun tanımlanmadığı referans duruma ($H_1 = 0$) ait oturma değerlerine göre azalma oranları belirlenmiş ve Tablo 3 kapsamında sunulmuştur.

Tablo 3. Mühendislik dolgusu kalınlığına bağlı olarak oturma değerlerindeki ortalama azalma oranları

H_1 (m)	PGA = 0.2g	PGA = 0.3g	PGA = 0.4g	PGA = 0.5g
2	%22.5	%20.7	%17.6	%15.8
4	%36.7	%31.8	%28.0	%24.7
6	%46.9	%41.0	%37.1	%32.8

Tablo 3'te görüldüğü üzere, en yüksek azalma oranı 6 m kalınlığındaki mühendislik dolgusunda elde edilmiş olup, bu değer 0.2g ivme seviyesinde ortalama %46.9'a karşılık gelmektedir. Bu oran maksimum yüzey ivmesinin artmasıyla birlikte kademeli olarak azalmakta ve 0.5g seviyesinde %32.8'e düşmektedir. Aynı eğilim 2 m ve 4 m mühendislik dolgusu kalınlıkları için de geçerliliğini korumaktadır.

Tablo 3'te sunulan azalma oranlarının, mühendislik dolgusu kalınlığındaki her 2 m'lik artışa karşılık gelen kısımları ayrıca hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, toplam azalma oranının mühendislik dolgusu kalınlığı arttıkça gösterdiği değişim aşamalı olarak incelenebilmektedir. Elde edilen değerler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Mühendislik dolgusu kalınlığındaki değişime bağlı oturma değerlerindeki azalma oranları

ΔH_1 (m)	PGA = 0.2g	PGA = 0.3g	PGA = 0.4g	PGA = 0.5g
$0 \rightarrow 2$	%22.5	%20.7	%17.6	%15.8
$2 \rightarrow 4$	%14.2	%11.1	%10.5	%9.0
$4 \rightarrow 6$	%10.1	%9.2	%9.0	%8.1

Tablo 4'te sunulduğu üzere, ilk 2 m'lik mühendislik dolgusu kalınlığındaki artışın oturma değerlerindeki azalmaya katkısı, sonraki iki kalınlık artışının katkısından belirgin biçimde yüksektir. Bu durum, incelenen dört PGA seviyesinin tamamında tutarlı biçimde görülmektedir. Bulgular, mühendislik dolgusu kalınlığı ile oturma değerlerindeki azalma arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını, ilk kalınlık artışlarının görece daha baskın olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler çalışmanın genel eğilimleri belirlemek açısından sonuçlar sunmakla birlikte daha kapsamlı ve genellenebilir değerlendirmelerin yapılabilmesi için ilerleyen çalışmalarda sayısal analizlerde kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının çeşitliliğinin artırılması, farklı mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin analiz sürecine dahil edilmesi ve analizlerin laboratuvar ile saha verileriyle desteklenmesi gerekmektedir.

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., Khosravi, M., Khosravi, A., & Wilson, D. W. (2018). Remediation of liquefaction effects for an embankment using soil-cement walls: Centrifuge and numerical modeling. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 114, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.001.

Boulanger, R.W., Ziotopoulou, K. (2017). PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-17/01, March.

Çetin, K.Ö., Bray, J.D., Frost, J.D., Hortacsu, A., Miranda, E., Moss, R.E.S., Stewart, J.P. (2023). February 6, 2023, Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts. GEER Association Report No. GEER-082, EERI.

Hudson, M., Idriss, I., Beirkae, M. (1994). Quad4m User's Manual.

Kramer, S. L., Stewart, J. P. (2024). Geotechnical earthquake engineering (2nd ed.). CRC Press.

Kuhlemeyer, R.L., Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. Journal of Soil Mechanics and Foundation Devision, 99(5):421-427.

Laera, A., Brinkgreve, R.B.J. (2015). Plaxis Site Response Analysis and Liquefaction Evaluation.

Plaxis BV. (2025). Plaxis2D Scientific Manual.

Subasi, O., Koltuk, S., Iyisan, 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., Koltuk, S., Akbaş, M., İyisan, R. (2023). İki Boyutlu Dinamik Analiz Sonuçlarına Sonlu Eleman Ağı Sıklığının Etkisi. 9. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım 2023, İstanbul.

Sun, Z., Wang,W., Liu, H. (2025). Pseudo-Static Design and Analysis of Seismic Earth Pressure for Cantilever Retaining Walls with Limitation Assessment. Designs 2025, 9, 114. https://doi.org/10.3390/designs9050114.

Tobita, T., Kiyota, T., Torisu, S., Cinicioğlu, Ö., Tonuk, G., Milev, N., Contreras, J., Contreras, O., Shiga, M. (2024). Geotechnical damage survey report on February 6, 2023 Turkey-Syria Earthquake, Turkey. Soils and Foundations, 64(3), 101463. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101463

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c'	Efektif kohezyon	n^b	Sınır yüzeyi parametresi
D_{R0}	Rölatif sıkılık - PM4Sand	n^d	Dilatasyon yüzeyi parametresi
e	Boşluk oranı	OEB	Ortalama eleman boyutu
E_{50ref}	Sekant elastisite modülü	P_a	Atmosfer basıncı
e_{max}	Maksimum boşluk oranı	PGA	Maksimum yüzey ivmesi
e_{min}	Minimum boşluk oranı	P_{ref}	Referans basınç
E_{oedref}	Tanjant elastisite modülü	Q, R	Kritik durum parametreleri
E_{urref}	Yükleme boşaltma modülü	R_f	Göçme oranı
f_{eq}	Deprem hakim frekansı	$V_{s,min}$	Zemin profilindeki en düşük kayma dalgası hızı
f_{maks}	Deprem kaydının maksimum frekansı	$V_{s,tabaka}$	Zemin tabakasının kayma dalgası hızı
G_0	Kayma modülü katsayısı	$\gamma_{0.7}$	Kayma birim şekil değiştirme oranı
h_{p0}	Büzülme oranı parametresi	γ_d	Doygun birim hacim ağırlık
m	Gerilme bağımlılığı oranı	γ_k	Kuru birim hacim ağırlık