

Sıvılaşabilir Zeminlerde Hacimsel Sıkışma ve Genişleme Eğilimlerinden Kaynaklanan Doğrusal Olmayan Davranışın Bir Boyutlu Dinamik Zemin Tepkisi Analizlerine Etkisi

Devrim ERDOĞAN

EGE Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, devrim.sufa.erdogan@ege.edu.tr

Özet

Suya doymun granüler bir zeminin dinamik yükler altındaki davranışını temsil eden bir zemin modelinin hem sıvılaşma anına kadar gelişen süreci ve hem de sıvılaşma sonrası süreci modelleme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Sıvılaşma sonrası süreç özellikle yanal yayılma ve boşluksuyu basınçlarının sönümlenmesine bağlı oturmaların belirlenmesi anlamında önemlidir. Öte yandan, sıvılaşma, ana kayadan zemin yüzeyine iletilen kuvvetli yer hareketini genlik, frekans ve süre anlamında değiştirmektedir. Bu değişim, sıvılaşma öncesi ve sonrası süreçlerde, zeminin hacim değişimi eğilimlerine bağlı olarak rijitlik ve kayma dayanımı değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle, sıvılaşmaya yakın çok düşük seviyelerdeki efektif gerilmelerde ve daha çok orta sıkı ve sıkı suya doymun granüler zeminlerde meydana gelen genişleme yönündeki hacim değişimi eğilimleri aşırı boşluksuyu basınçlarının düşmesini sağlayarak efektif gerilme düzeyinin ve dolayısı ile rijitlik ve kayma dayanımında artışa neden olmaktadır. Böylece sıvılaşmaya çok yakın gerilme durumu mevcut olsa bile anlık rijitlik artışları, zeminin deformasyon yapabilme kabiliyetini artırmaktadır. Çevrimsel hareketlilik (sınırlı sıvılaşma) olarak tanımlanan bu davranış, zemin yüzeyinde, taban kayasına göre genliği, frekans içeriği ve süresi artmış bir ivme-zaman ilişkisinin elde edilmesine neden olmaktadır. Öte yandan, başlangıç kayma gerilmelerinin mevcut olması durumu bu davranışın ortaya çıkmasını kolaylaştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Cyclic1D bir boyutlu zemin tepkisi modülü içerisinde mevcut bulunan ve çevrimsel hareketlilik davranışını modelleme kapasitesine sahip olan Pressure-Dependent Multi-Yield Surface Plastisite modeli kullanılarak, 20 m derinliğinde orta sıkı kum zemin profilinde yatay zemin yüzeyi ($\alpha=0^\circ$) ve eğimli zemin yüzeyi ($\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$) durumları için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler taban kayasından sinüzoidal olarak uygulanan 0.05g, 0.2g ve 0.4g genliğindeki, 1Hz. frekansındaki ve 10 sn. süren yanal ivmeler için gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizler yardımı ile yatay ve eğimli zemin yüzeyi durumlarında, çevrimsel hareketlilik davranışını ortaya çıkaran etkenler araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, çevrimsel hareketlilik, faz transformasyon çizgisi.

Effect of Dilatancy Induced Nonlinear Behaviour of Liquefiable Soils on One-Dimensional Seismic Site Response

Abstract

It is essential that pre-liquefaction and post-liquefaction behavior should both be included in constitutive modelling of liquefiable soils. Post-liquefaction behavior is especially important for the assessment of lateral spreading deformations and post-liquefaction settlements due to drainage of excess porewater pressures. Moreover, liquefaction changes strong ground motion characteristics which is due to changes in rigidity and shear strength caused by contractive and dilative volume change tendencies during dynamic loading. Dilative volume change tendency is especially observed in medium dense / dense state and when mean effective stresses decreases such that undrained effective stress path approaches liquefaction. Dilative volume change tendency in such a stress state causes decrease in excess porewater pressures resulting in increase in mean effective stresses and hence rigidity and shear strength as well. Instantaneous increase in rigidity and shear

strength helps liquefiable soil attain the ability to deform without failure. In this case, failure occurs due to accumulated shear deformations made available by instantaneous increase in rigidity which is called cyclic mobility. Cyclic mobility may increase the amplitude, frequency content and duration of strong ground motion. Presence of initial static shear stresses eases occurrence of this behavior. In this study, parametric analyses have been conducted for the investigation of cyclic mobility behavior for saturated medium-sand profile with a depth of 20 m. Both level ground $\alpha=0^\circ$ and inclined ground conditions with inclination angles of $\alpha=3^\circ$ and $\alpha=8^\circ$ are considered. Analysis have been performed for sinusoidal accelerations of 0.05g, 0.2g and 0.4g, frequency of 1Hz and a duration of 10 sec. applied from the rigid rock level. Pressure Dependent Multi-Yield Surface Plasticity model which has the capacity to model cyclic mobility has been used for the parametric analysis. During the analyses, factors which enable the occurrence of dilative tendency and hence cyclic mobility behavior in both level and inclined ground cases are investigated.

Keywords: Liquefaction, cyclic mobility, phase transformation angle.

1. Giriş

Doğrusal olmayan zemin davranışı, deprem yükleri etkisi altındaki sıvılaştırılabilir zemin profillerinde, sıvılaşma öncesi, sıvılaşma esnası ve sıvılaşma sonrası süreçlerde farklı mekanizmaların kontrolünde belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Sıvılaşma sonrası stabilite sorunları, oturma ve yanıl yayılmalar doğrusal olmayan zemin davranışının bir sonucudur. Öte yandan, sıvılaşma, anakayadan zemin yüzeyine doğru ilerleyen kuvvetli yer hareketini değişime uğratmaktadır. Sıvılaşmış bir zemin profilinde, kayma dayanımı ve rijitlikteki azalma nedeni ile kuvvetli yer hareketinin üst tabakalara frekans içeriği ve genliği azaltılmış olarak iletilmesi beklenir. Hatta bazı profillerde, sıvılaşmış zemin tabakaları, üzerlerinde bulunan zemin tabakalarını izole etmek suretiyle yüksek kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonlarına maruz kalmalarını engellemiş olurlar. Öte yandan, sıklığı $D_r > 35\%$ olan orta sıkı ve sıkı suya doygun granüler zeminlerde, genişleme yönündeki hacim değişimi eğilimlerinden kaynaklanan ve zeminin dayanım ve rijitlik kazanmasına neden olan çevrimsel hareketlilik, doğrusal olmayan davranışın önemli bir bileşenidir. Bu davranış daha çok yüksek deformasyonlarda ortaya çıktığı için, bu anlamda alınabilmiş çok sınırlı sayıda kuvvetli yer hareketi kaydı bulunmaktadır. Özellikle, 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Depremi Port Island kuyu kayıtları, 1993 Kushiro-

Oki Depremi yüzey ivmesi kayıtları, 1979 Imperial Valley Depremi Bonds Corner ivme kayıtları, 1980 Meksika Depremi Cerro Prieto Kaydı, 1994 Northridge Depremi Jansen Main Building ve Sylmar Converter Station Kayıtları ve aynı anda alınan aşırı boşluksuyu basıncı kayıtları bu anlamda önem arz etmektedir [Bonilla vd., 2005]. Bu kayıtlarda, zemin sıvılaşma aşamasında olsa bile, zemin profilinin kuvvetli yer hareketini üstteki tabakalara büyütür ve frekans içeriğini artırarak ilettiği gözlenmiştir. Bu durum, özellikle zemin yüzeyine yakın derinliklerde ivme kayıtlarında sıçramalar (anlık artışlar) şeklinde ortaya çıkmaktadır. Sözü edilen depremlerde alınan boşluksuyu basıncı kayıtları bu sıçramaların benzerinin boşluksuyu basınçlarında da (anlık düşüşler şeklinde) görüldüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca bu anlamda gerçekleştirilen laboratuvar model deneyleri de aynı davranışı doğrulamıştır [Elgamal vd. 1998].

1985-2000 yılları arasında, çevrimsel hareketliliğin, sıvılaşma davranışının bir parçası olarak ele alınması gereken bir dinamik zemin davranışı olduğu gerek deprem kayıtlarından ve gerekse model deneyler yardımı ile gözlenmiş ve bu davranışın mevcut sıvılaşma modelleri içerisine dahil edilmesi çalışmaları yoğunlaşmıştır. Bu anlamda, Strain Space Multiple Mechanism Model (birim deformasyon uzayında geliştirilmiş çoklu mekanizmalı plastisite modeli) [Iai vd. 1992 a ve b; Iai ve Ozutsumi, 2005; Iai, 2005; Iai ve Tobita

2006; Iai vd. 2011; Iai vd. 2013], Pressure-Dependent Multi-Yield Surface Plasticity modeli [Parra, 1996; Yang, 2000; Kramer & Elgamel, 2001; Yang vd. 2003; Elgamel vd, 2003; Kramer vd. 2011], PM4SAND [Boulanger & Ziotopoulou, 2015], METUSAND [Oral, 2014] güçlü modeller arasında yer almaktadırlar. Bu modeller, ilgili araştırmacılar tarafından halen geliştirilmekte ve geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında kullanılarak sürekli olarak gerçek verilerle test edilmektedirler (Bray vd. 2017).

Bu çalışma kapsamında, Cyclic1D bir boyutlu zemin tepkisi modülü içerisinde mevcut bulunan ve çevrimsel hareketlilik davranışını modelleme kapasitesine sahip olan Pressure-Dependent Multi-Yield Surface Plasticity modeli kullanılarak, 20 m derinliğinde orta sıkı kum zemin profilinde yatay zemin yüzeyi ($\alpha=0^\circ$) ve eğimli zemin yüzeyi ($\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$) durumları için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler taban kayasından sinüzoidal olarak uygulanan 0.05g, 0.2g ve 0.4g genliğindeki, 1Hz. frekansındaki ve 10 sn. süren yanal ivmeler için gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizler yardımı ile yatay ve eğimli zemin yüzeyi durumlarında, çevrimsel hareketlilik davranışını ortaya çıkaran etkenler araştırılmıştır.

2. Sıvılaşabilir Zeminlerde Dinamik Yükleme Sırasında Meydana Gelen Kayma Birim Deformasyonları ve Sıkışma / Genişleme Hacim Değişimi Eğilimleri (Dilatancy)

Gerek statik, gerekse dinamik yükleme koşulları altında olsun, granüler bir zemin kayma gerilmelerine maruz kaldığında, zemin içerisinde kayma birim deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar, granüler zemini hacim değişimi (dilatancy, shear-induced volume change) yapmaya zorlar. Bu hacim değişimi, zemin danelerinin sergilediği iki tip hareket sayesinde gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki kayma deformasyonları sırasında, danelerin boşlukları

doldurarak (slip down) daha sıkı bir hale gelmesi ve sonucunda da hacmin azalmasına hizmet eden bir dane hareketidir. Daha çok gevşek zeminlerde gelişen bir mekanizmadır. Diğeri de danelerin birbirleri üzerinden atlayarak (roll over) hacmin artmasına hizmet eden dane hareketleridir ve daha çok sıkı granüler zeminlerde gelişen bir mekanizmadır.

Bu iki tip dane hareketi aslında aynı anda gelişen hareketlerdir. Fakat net olarak düşünüldüğünde hangisi hakimse, hacimsel davranış da hakim olan dane hareketinin temsil ettiği hacim değişimi yönünde gelişmektedir. Kayma gerilmelerine maruz kalmış bir zeminde, danelerin boşlukları doldurduğu mekanizma (slip-down mekanizması) çok kolaylıkla gelişebilmektedir, çünkü bu mekanizmanın ortaya çıkabilmesi için danelerin kayma yönünde çok fazla deformasyon yapmasına gerek yoktur, daneler yalnızca boşlukları doldurarak daha sıkı hale gelmektedir. Dolayısı ile gerek statik ve gerekse dinamik yükleme sırasında, sıkışma yönündeki hacim değişimi eğilimlerinin kolaylıkla gelişebileceğini söylemek mümkündür. Öte yandan, danelerin birbirleri üzerinden atlayarak hacim artışına yol açtıkları mekanizma (roll-over mekanizması) yüksek kayma birim deformasyonlarında ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle, danelerin birbirleri üzerinden atlayabilmeleri için yüksek deformasyona ihtiyaç vardır, dolayısı ile kesmeye bağlı hacim artışı ancak yüksek deformasyonlarda ortaya çıkabilmektedir [Ishihara, 1996].

Dinamik yüklemenin herhangi bir çevrimi için danelerin boşlukları doldurma ve birbirleri üzerinden atlama hareketlerinin oluşma süreçleri ile ilgili olarak şöyle bir genelleştirme yapılabilir: Yükleme aşamasında, düşük deformasyonlarda daneler boşluk doldurma hareketi yapmakta, hacim azalmakta, kayma birim deformasyonları ilerledikçe, danelerin birbirleri üzerinden atlama eğilimleri artmakta, ek olarak ufak boşluklar oluşmakta ve bu durum hacim artışına neden olmaktadır. Boşaltma aşamasında ise, danelerin

boşlukları doldurma mekanizması yeniden harekete geçmekte ve hacim azalması yeniden devreye girmektedir. Deformasyonlar arttıkça danelerin birbirleri üzerinden atlama eğilimleri ve hacim artışı ters yönde yeniden harekete geçmektedir [Youd, T.L., 1977; Elgamal, A., 2014; Gingery, R. 2014].

Yukarıda sözü edilen durumda, hacim değişiminin meydana gelebildiği anlaşılmaktadır. Öte yandan, deprem yükü hızlı bir yüklemeye, dolayısıyla granüler zeminin permeabilitesi yüksek olsa bile suya doygun durumda su hareketi gerçekleşemeyebilir. Bu durumda, sıkışma eğilimi gösteren zeminden su çıkışı engellenmiş olur ve boşluksuyu basıncı artarak efektif gerilmeler azalır. Dolayısıyla, kayma dayanımı ve rijitlik azalır. Genişleme eğilimi gösteren zemin için ise su girişi engellenmiş olur, bu durumda da boşluksuyu basıncı azalarak efektif gerilmeler artar. Dolayısıyla kayma dayanımı ve rijitlik artmış olur.

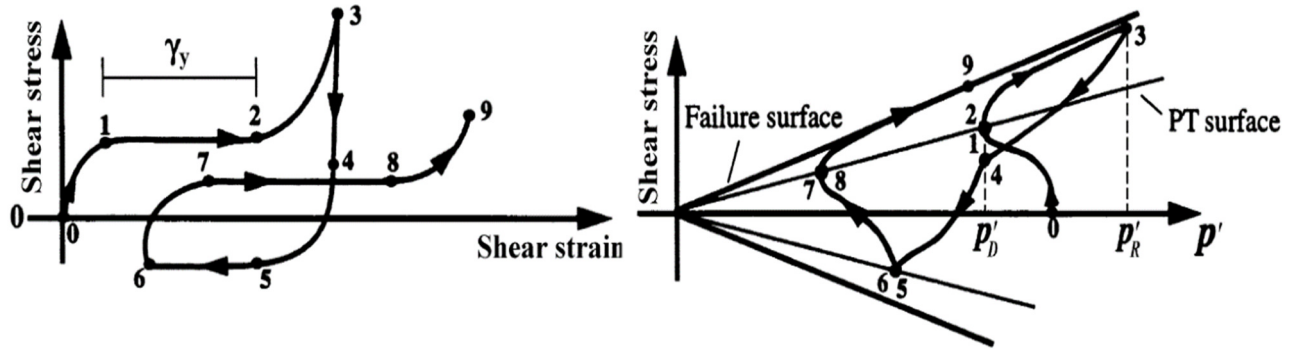
3. Pressure-Dependent Multi-Yield Surface Plastisite Modeli (PDMY Modeli)

Pressure-Dependent Multi-Yield Surface Plastisite modeli suya doygun granüler zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarını, sıvılaştırma öncesi, sıvılaştırma sırası ve sıvılaştırma sonrası süreci kapsayacak şekilde modelleme kapasitesine sahip olan efektif gerilme tabanlı bir zemin modelidir. Bu anlamda geliştirilen efektif gerilme tabanlı bir zemin modelinin içermesi gereken bazı model parçaları bulunmaktadır. Bunlar; yenilme kriteri, kayma modülü bozunumu (shear modulus reduction), yükleme – boşaltma – yeniden yükleme eğrilerinin tanımı (malzeme sönümü davranışı, Masing kuralları), plastik deformasyon üretimi, aşırı boşluk suyu basıncı gelişim modeli (sıvılaştırma öncesi, sıvılaştırma sırası ve sıvılaştırma sonrası süreci kapsayacak şekilde), boşluksuyu basıncı artışlarının neden olduğu

ortalama efektif gerilme düşüşlerinden kaynaklanan iskelet eğrisi bozunumu davranışı (backbone degradation), sıvılaştırma anına yaklaşmakla birlikte azalan ortalama efektif gerilmeler ve artan kayma birim deformasyonlarına paralel olarak ortaya çıkması daha kolaylaşan hacim artışı eğilimi ve beraberinde getirdiği boşluksuyu basınçlarında anlık azalma, dolayısıyla rijitlik ve kayma dayanımının anlık artışı, böylece, zeminin anlık ta olsa deformasyon yapabilme kabiliyeti kazanması ve sözü edilen genişleme-büzülme döngülerinde artımlı olarak meydana gelen büyük birim deformasyon birikimidir.

Ayrıca, boşluksuyu basınçlarının sönümlenme modeli de bu kapsamda ele alınmalıdır. Modelin bu parçası, kuvvetli yer hareketi sırasında, zemin ortamı içerisinde hidrolik yük farkı nedeni ile meydana gelen su akımları ile zeminin permeabilitesi ve kuvvetli yer hareketinin hızına bağlı olarak drenajın gerçekleşebildiği durumlara (genelde kuvvetli yer hareketi sonrası) ait olan boşluksuyu basınçlarının belirlenmesi anlamında önemlidir. Bu anlamda, Pressure-Dependent Multi-Yield Surface (PDMY) plastisite modeli, özellikle sıvılaştırma sonrası davranış düşünüldüğünde, güçlü özelliklere sahip bir modeldir.

PDMY modelinde, sıkışma ve genişleme hacim değişimi eğilimleri ile büyük birim deformasyon birikimi davranışlarının nasıl temsil edildikleri Şekil 1'deki sembolik gerilme – deformasyon ve drenajsız efektif gerilme izi diyagramlarında görülmektedir. Gerilme izi diyagramında görülmekte olan faz transformasyon çizgisi, dinamik yükleme sırasında, zeminin sıkışma ve genişleme hacim değişimi eğilimleri sergilediği gerilme durumu bölgelerini ayıran bir çizgidir. Şekil 1'de PDMY modelinin işleyişi sembolik olarak gösterilmiş ve Tablo 1'de açıklamalı olarak verilmiştir.



Şekil 1. PDMY modelinde gerilme-deformasyon ve drenajsız efektif gerilme izinin temsil edilmiş şekli [Parra, 1996; Elgamel vd., 2003].

Tablo 1. PDMY modelinde drenajsız efektif gerilme izinin faz transformasyon çizgisine göre konumu ve beklenen davranış şekilleri.

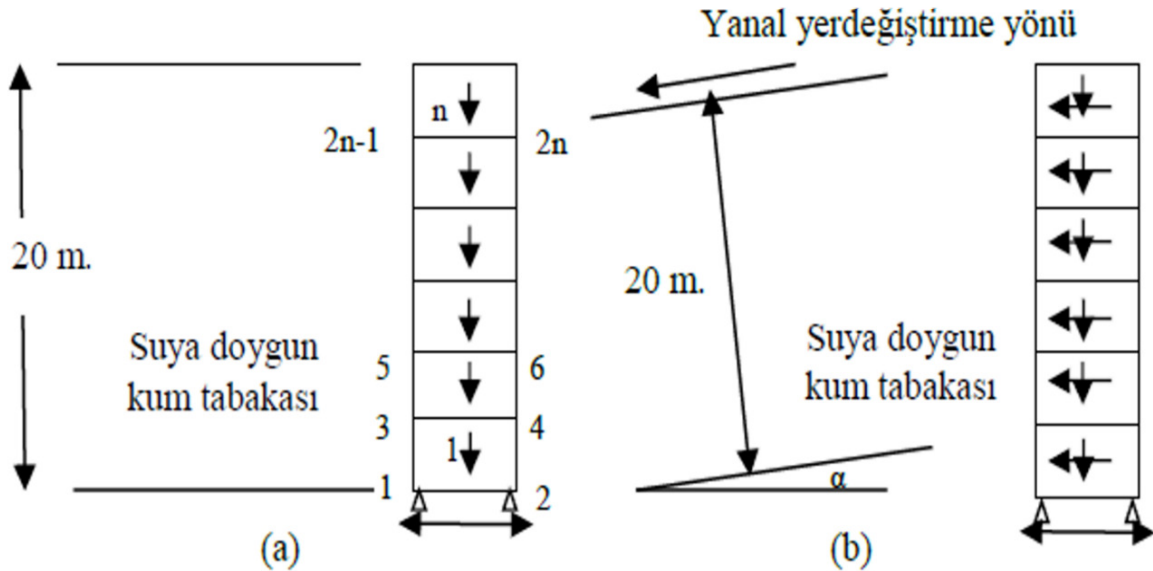
YÜKLEME (0-3 Arası)	
(0-1) PT Çizgisi Altında	Drenajsız efektif gerilme izinin 0-1 arasındaki bölümü faz transformasyon çizgisinin altında kaldığı için hacim değişimi eğilimi sıkışma yönündedir. Sıkışma eğilimi sonucu boşluk suyu basıncı artar, ortalama efektif gerilme azalır. Kayma birim deformasyonları henüz düşük seviyelerdedir. O nedenle modül azalımı deformasyon bağımlıdır.
(1-2) PT Çizgisinde	Gerilme izi faz transformasyon çizgisine yaklaştıkça, kayma gerilmesinde belirgin bir değişim olmasa bile yüksek düzeylerde kayma birim deformasyonları meydana gelir. Özellikle düşük ortalama efektif gerilmelerde, bu kayma birim deformasyonları çok belirgin olarak gözlenir. Öte yandan, bu deformasyonlar zemini genişleme yönünde hacim değişimi eğilimi gösterebilmesi için hazırlanmış olur, çünkü genişleme hacim değişimi eğilimi yüksek kayma birim deformasyonlarında ortaya çıkan bir davranıştır.
(2-3) PT Çizgisi Üzerinde	Bu bölgede zemin genişleme hacim değişimi eğilimi sergiler. Buna bağlı olarak drenajsız koşullarda boşluk suyu basınçları azalır, kayma dayanımı ve rijitlik artar. Zeminin drenajsız efektif gerilme izi göçme çizgisi boyunca yükselirken daha yüksek kayma gerilmelerini taşıyacak kabiliyeti kazanır. Anlık olarak artan rijitlik, deformasyon oluşumunu engeller. Anlık rijitlik artışları sırasında artımsal kayma birim deformasyonları meydana gelir. Genişleme hacim değişimi eğilimi düşük ortalama efektif gerilmelerde daha kolay ve belirgin bir şekilde ortaya çıkar.
BOŞALTMA (3-6 Arası)	
(3-4) PT Çizgisi Altına Geçiş	Drenajsız efektif gerilme izi, genişleme eğilimi öncesindeki ortalama efektif gerilme durumuna (Şekil 1'de p'_D) dönerken sıkışma eğilimi ve dolayısıyla boşluk suyu basınçlarında artış gözlenir. Kayma gerilmeleri düşer ancak kayma birim deformasyonlarında belirgin bir değişim gözlenmez.
(4-5) PT Çizgisi Altında	Gerilme izi faz transformasyon çizgisinin altında kaldığı için hacim değişimi eğilimi sıkışma yönündedir. Sıkışma eğilimi sonucu boşluk suyu basıncı artar, ortalama efektif gerilme azalır. Asal eksen dönmesi boşluksuyu basınçlarının hızla artmasını sağlar. Kayma gerilmeleri ters yönde artmaya başlar. Bu arada kayma birim deformasyonlarının yönü değişmiştir. Drenajsız efektif gerilme izi bu sefer ters yönde faz transformasyon çizgisine yaklaşmaktadır.
(5-6) PT Çizgisi Üzerinde	Ters yönde (1-2)'ye benzer bir davranış sergilenir. Ancak bu durumdaki kayma birim deformasyonları zemini genişleme hacim değişimi eğilimine sokmaya yeterli değildir.

4. Problemin Sonlu Elemanlar Modeli

Parametrik analizler, Pressure Dependent Multi Yield Surface Plastisite modelini içinde barındıran Cyclic1D modülü yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu modül aslında geoteknik ve yapısal anlamda performans tabanlı deprem mühendisliği problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile programlanarak çözülebildiği bir açık kod ortamı olan ve PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) tarafından sürekli olarak geliştirilen OPENSEES'in birer yan ürünü olarak ortaya çıkmış modüllerdir. Böylece, geoteknik deprem mühendisliği anlamında önem kazanan bazı problemler konuya özel modelleme unsurlarını da içerecek şekilde modüller haline getirilerek modelleme açısından kullanım kolaylığı sağlanmıştır.

Parametrik analizler Şekil 2'de görülen 20 m kalınlığındaki orta sıkı kum zemin profili dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kum tabakasının altında tamamen rijit sonsuz bir ortamın bulunduğu kabul edilmiştir. Zemin ortamını sağda ve solda sınırlayan düşey doğrultu boyunca *shear-*

beam sınır koşulu uygulanmıştır. Bu sınır koşuluna göre modelin sağında ve solunda aynı seviyede bulunan düğüm noktaları yatay doğrultuda aynı yerdeğiştirmeleri yapacak şekilde birbirlerine bağlanmıştır (*tied degree of freedom*). Eleman yüksekliklerinin seçiminde $f_{max}=V_s/4H$ kuralı dikkate alınmıştır. Zemin ortamı 9 – 4 quad u-p (9 düğüm noktası x ve y yönünde yerdeğiştirme, 4 düğüm noktası boşluk suyu basıncı olmak üzere $9 \times 2 + 4 = 22$ serbestlik derecesine sahip) veya 4 – 4 quad u-p ($4 \times 2 + 4 = 12$ serbestlik derecesine sahip) düzlem deformasyon elemanlarla temsil edilebilmektedir. u-p elemanının dinamik doğrusal olmayan yükleme koşulları altındaki sonlu eleman matrisleri bu koşullardaki zemin ortamının davranışını kontrol eden Biot diferansiyel denklem takımından Galerkin yöntemi ile üretilmektedir. Granüler zeminler için boşluk suyu basıncı gelişim modeli aşağıda sözü edilen Pressure-Dependent Multi-Yield Surface zemin plastisite modeli içinde ele alınmakta, aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlenme davranışı da Biot denklem takımı içerisindeki konsolidasyon denklemi yolu ile devreye sokulmaktadır. Orta sıkı kum durumu için Pressure-



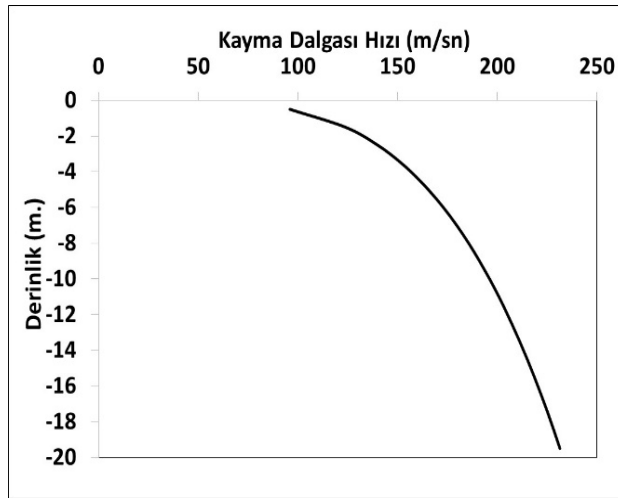
Şekil 2. (a) Yatay zemin yüzeyi durumu (b) Eğimli zemin yüzeyi durumu.

Dependent Multi-Yield Surface modeline ait model parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca kayma dalgası hızının derinlikle değişimi Şekil 3’de görülmektedir.

derinlik boyunca elde edilen yanıl ivme–zaman, gerilme deformasyon ilişkileri ve drenajsız efektif gerilme izleri Şekil 4’de görülmektedir. Bu şekillerde, ilk kolondaki ivme–zaman ilişkilerinde

Tablo 2. Orta Sıkı Kum durumu için model parametreleri.

Başlangıç konumundaki gerilme durumunu ilgilendiren model parametreleri		Yükleme sırasındaki gerilme-deformasyon ve permeabilite davranışını ilgilendiren model parametreleri	
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	1999	Kohezyon, c (kPa)	0.3
Referans kayma dalgası hızı, $V_{s,ref}$ (m/sn)	224	İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	35
Referans kayma modülü, $G_{max,ref} = \rho \cdot V_{s,ref}^2$ (kPa)	1×10^5	Maksimum kayma birim şekil değıştirmesi, γ_{max} (%)	5
Referans ortalama efektif gerilme, p'_{ref} (kPa)	80	Yenilme yüzeyleri sayısı, NYS	20
Ortalama efektif gerilmeye bağılı katsayı (Confinement dependent coefficient), n	0.5	Faz transformasyon açısı, ϕ_p (°)	24
Sükûnet durumundaki yanıl toprak basıncı katsayısı, K_0 (0.1-0.9 arasında)	0.67	Sıkışma (büzülme) parametresi, c_1	0.06
Poisson Oranı, ν (Sükûnetteki yanıl toprak basıncı katsayısından belirlenir) $K_0 = \nu / (1 - \nu)$	0.4	Sıkışma (büzülme) parametresi, c_2	0.5
Referans bulk modülü, B_{ref} (kPa), $B_{ref} = G_{max,ref} [2(1 + \nu) / (3(1 - 2\nu))]$	3×10^5	Genişleme parametresi, d_1	0.4
Ortalama efektif gerilmedeki değışime bağılı olarak G_{max} ve B modülleri, $G = G_{ref} (p'/p_{ref})^{0.5}$ ve $B = B_{ref} (p'/p_{ref})^{0.5}$		Genişleme parametresi, d_2	10
		Sıvılaşma parametresi, Li_q	0.01
		Permeabilite katsayısı, k (m/sn)	6.6×10^{-5}



Şekil 3. Kayma dalgası hızının derinlikle değışimi.

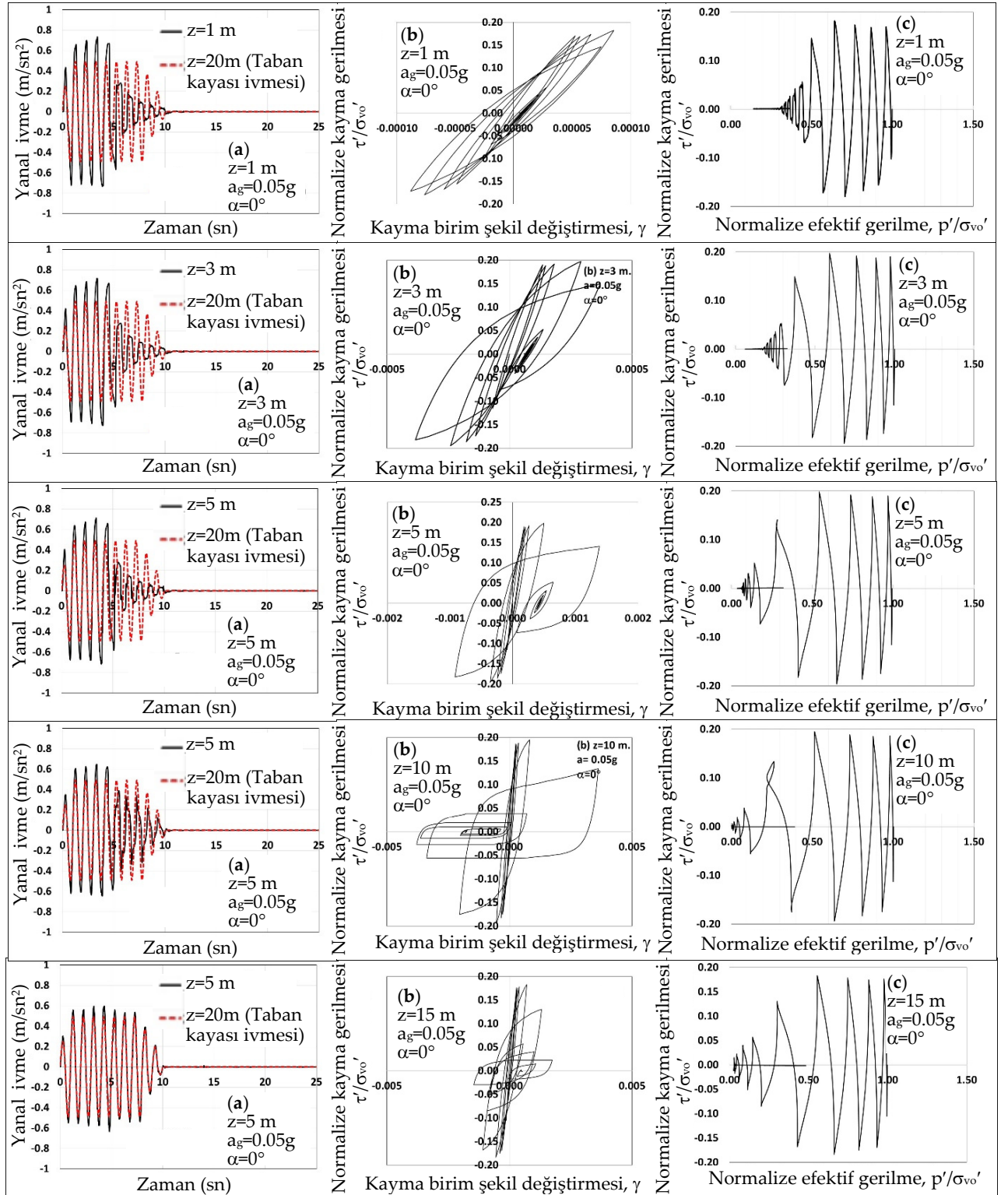
5. Parametrik Analizler

Yatay Zemin Yüzeyine Sahip Zemin Profili Durumu ($\alpha = 0^\circ$)

Yatay zemin yüzeyine sahip ($\alpha = 0^\circ$) zemin profili durumunda, 20 m derinlikteki rijit kaya seviyesinden 0.05g, genliğinde, 1Hz frekansında ve 10 sn. süresince sinüzoidal formda uygulanan taban kayası ivmesi altında, zemin profilinde

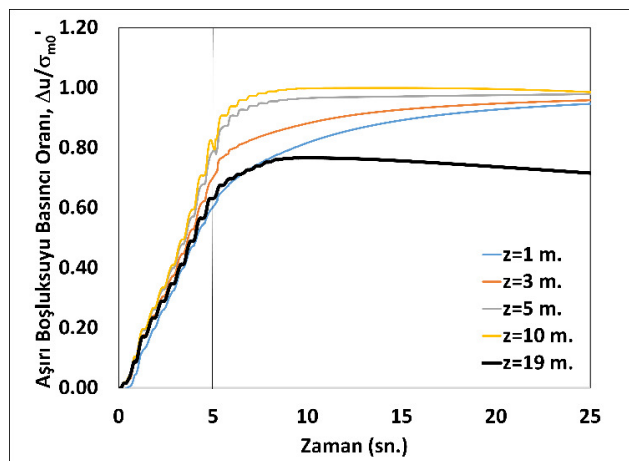
görülen kırmızı kesik çizgiler, taban kayasından uygulanan yanıl ivme değerlerini ifade etmektedirler.

Zemin profili, ilk 5 sn. içerisinde, taban kayası ivmesini üstteki zemin tabakalarına büyüterek iletmiştir. Bu büyütme zemin yüzeyine yaklaştıkça daha belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Zemin yüzeyinde, yaklaşık olarak 0.07g–0.08g değerlerinde elde edilen yanıl ivme, 5 sn. sonrasında, her çevrimde belirgin bir şekilde azalma göstermektedir. Yanıl ivme değerlerinde gözlenen bu büyütme, rijit taban kayası ile zemin profili arasındaki rijitlik farkından kaynaklanmaktadır. Dinamik etki, rijit kaya ortamından (kayma dalgası hızı zemin ortamına göre çok daha yüksek) zemin ortamına girince, enerjinin korunumu ancak ivmenin artışı ile sağlanabilir [Beliçeli, 2006]. Tabii ki bu durum rijitlik ve kayma dayanımı kayıplarının ve kayma birim deformasyonlarının çok düşük seviyelerde olduğu durumda geçerlidir. Zemin yüzeyine yaklaştıkça artan şekilde gözlenen büyütme, zemin



Şekil 4. (a) İvme-zaman, (b) gerilme –deformasyon ve (c) drenajsız efektif gerilme izi ilişkilerinin derinliğe bağlı değişimi (0.05g genlikli taban kayası ivmesi ve $\alpha=0^\circ$ için).

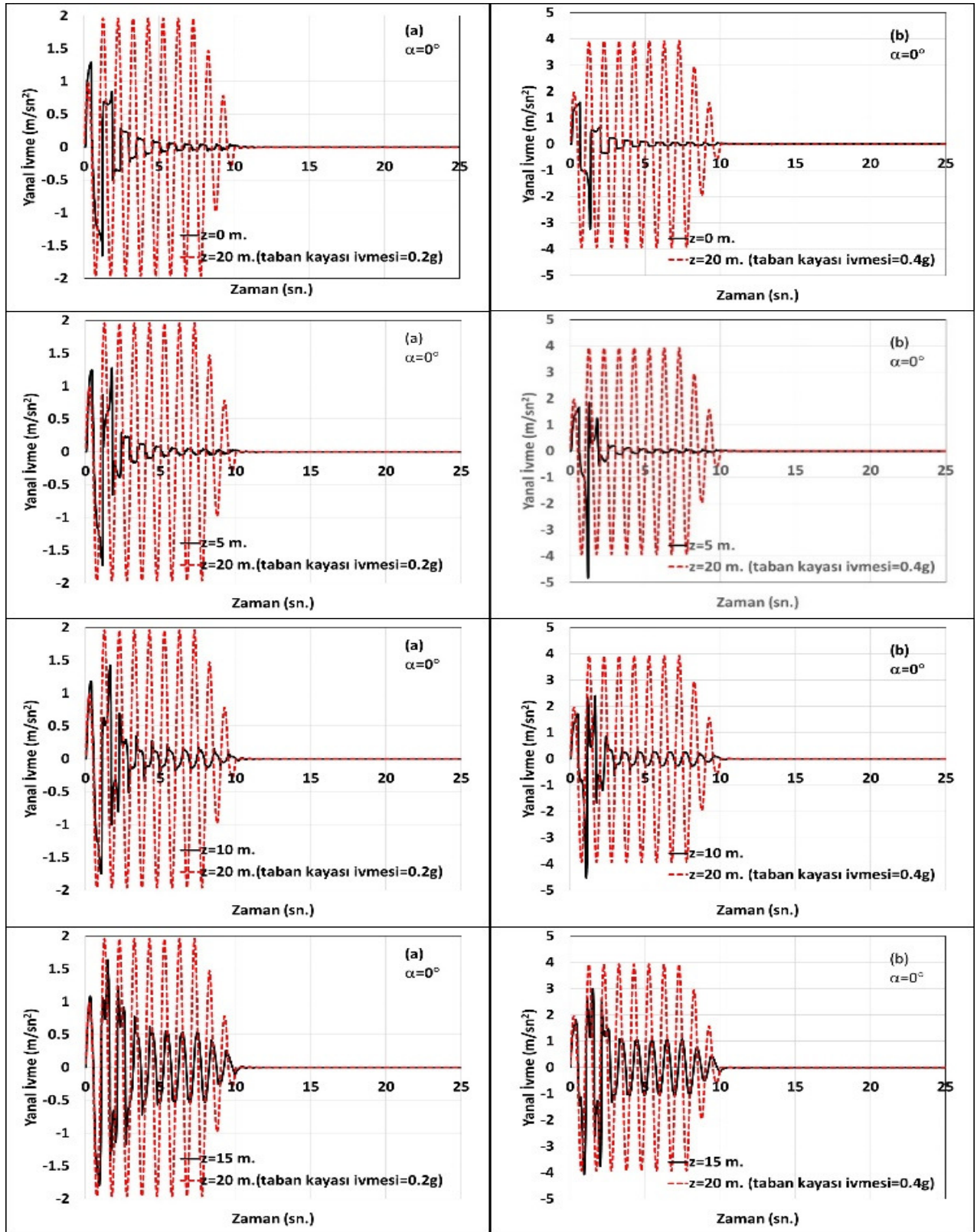
profilinin ilk 5 sn içerisinde, taban kayasından uygulanan dinamik etkiyi üst tabakalara iletebildiğinin bir göstergesidir. Nitekim, 5. çevrimde (5 sn'ye karşılık gelmektedir) iskelet eğrisindeki bozunum ve aniden artan yanıl deformasyonlar özellikle 5 m ve 10 m derinliklere karşılık gelen kayma gerilmesi–kayma birim deformasyonu eğrilerinde açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5'de aşırı boşluk suyu basıncı oranlarının farklı derinliklerde zamana bağlı değişimlerine bakılırsa, 5m ve 10 m derinliklerde, 5 sn. sonunda $r_u=0.85 - 0.90$ değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Öte yandan, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 5 m derinlik içerisinde, $r_u=0.60-0.70$ seviyelerinde gezindiği, başka bir deyişle sıvılaşma durumuna alttaki tabakalardan daha uzak olduğu görülmektedir. Bunun nedeni 5 m – 10 m aralığında meydana gelen sıvılaşma veya sıvılaşma konumuna çok yakın olma durumunun daha üstteki tabakaları izole etmesi şeklinde yorumlanabilir. Nitekim, Şekil 4'deki derinliğe bağlı olarak gerilme deformasyon ilişkilerine bakılırsa, kayma birim deformasyonları, 5 m – 10 m aralığında %0.15–%0.3 mertebelerinde iken, daha üst tabakalarda %0.04 mertebelerindedir. Başka bir deyişle 5 m – 10 m aralığındaki tabakalar üstteki tabakaları izole ederek, dinamik etkinin iletimini ve yüksek kayma birim deformasyonlarının oluşumunu engellemiştir.



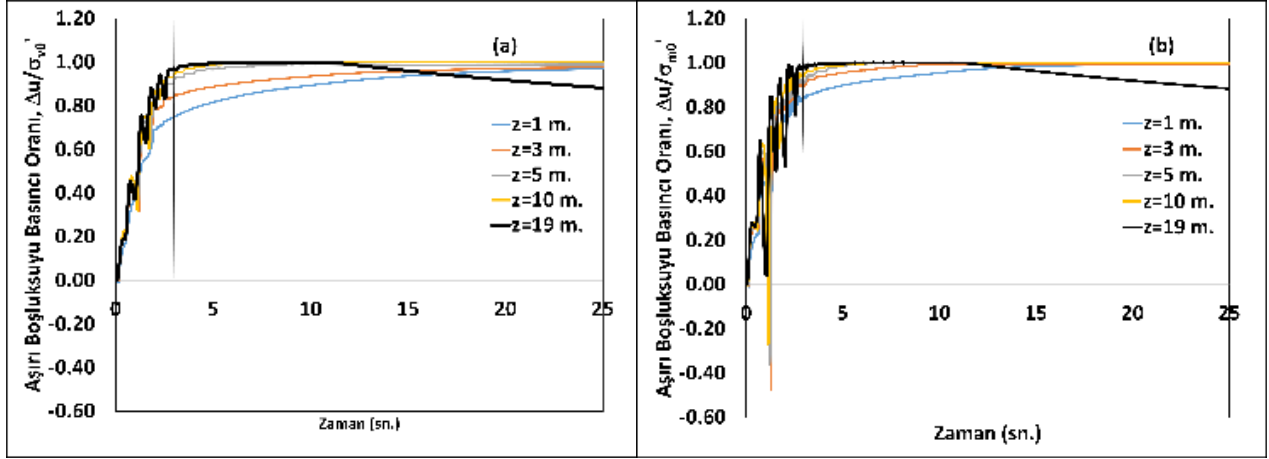
Şekil 5. Aşırı boşluksuyu basınçlarının derinliğe bağlı değişimleri (0.05g genlikli taban kayası ivmesi için).

Zemin yüzeyine yakın tabakalarda aşırı boşluksuyu basıncı oranları dinamik yükleme sonrasında artarak $r_u=1$ değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, sonlu eleman modellemesinde $u-p$ elemanlar kullanıldığı için yükleme sırasında model içinde su akımlarının da temsil edilebilmesi ve dolayısı ile alttaki tabakalardan üstteki tabakalara doğru bir su akışının meydana gelmiş olabileceği şeklinde açıklanabilir.

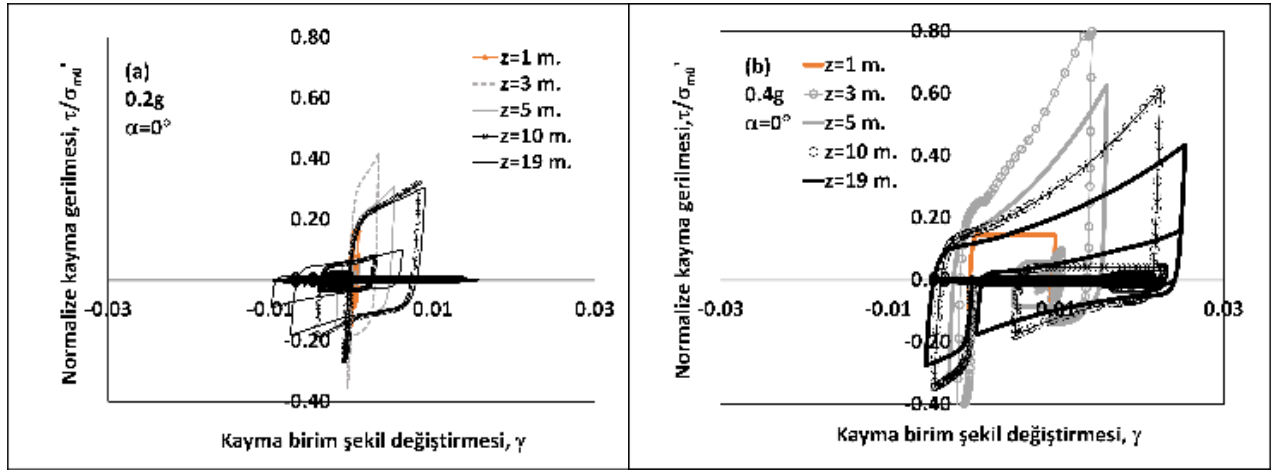
0.2g ve 0.4 g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmelerine ait olan yanıl ivme-zaman ilişkileri derinliğe bağlı olarak Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekillerde, yükleme başlangıcından yaklaşık olarak 1–2 sn. sonra tüm derinliklerdeki yanıl ivme genliklerinde belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, ilk çevrimde bir sıçrama (10 m içerisindeki ivme-zaman ilişkilerinde daha belirgin) göze çarpmaktadır. Aynı sıçrama Şekil 7'deki aşırı boşluksuyu-zaman ilişkilerinde de görülmektedir. Bu sıçrama, doğrusal olmayan davranışın bir sonucudur. Kayma gerilmesi–kayma birim deformasyonu (Şekil 8) bakıldığında bu sıçrama kendisini ilk çevrimde yüksek bir deformasyon ve sonucunda meydana gelen rijitlik artışı ile göstermiştir. Bu rijitlik artışı, drenajsız efektif gerilme izi diyagramlarında, (Şekil 9), ilk çevrimde gözlenen efektif gerilme artışından kaynaklanmıştır. Bu durum kendini aşırı boşluksuyu basıncı oranı değerlerinde anlık azalma şeklinde göstermiştir. Bu durumdaki deformasyonlar yaklaşık olarak %1-%3 seviyelerinde olup yüksek deformasyon seviyesidir. Zemin orta sıkı olduğu için anlık ta olsa genişleme yönünde hacim değişimi eğilimi sergilemiş ancak sonraki çevrimlerdeki kayma birim deformasyonları genişleme yönündeki hacim değişimi eğilimi için yeterli olamamıştır.



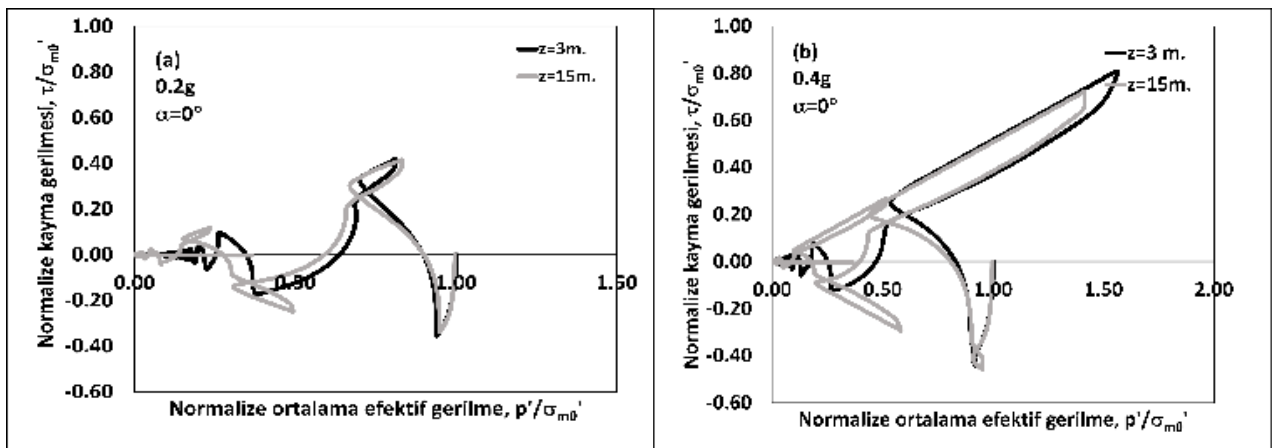
Şekil 6. (a) $\alpha=0^\circ$ için 0.2g ve (b) $\alpha=0^\circ$ için 0.4g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmeleri için yanıl ivme-zaman ilişkilerinin derinliğı bağılı değışimleri.



Şekil 7. Aşırı boşluksuyu basıncı oranlarının derinliğe bağlı değişimleri (a) 0.2 g (b) 0.4g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmeleri için.



Şekil 8. Kayma gerilmesi-kayma birim değişimlerini derinliğe bağlı değişimleri (a) 0.2 g (b) 0.4g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmeleri için.

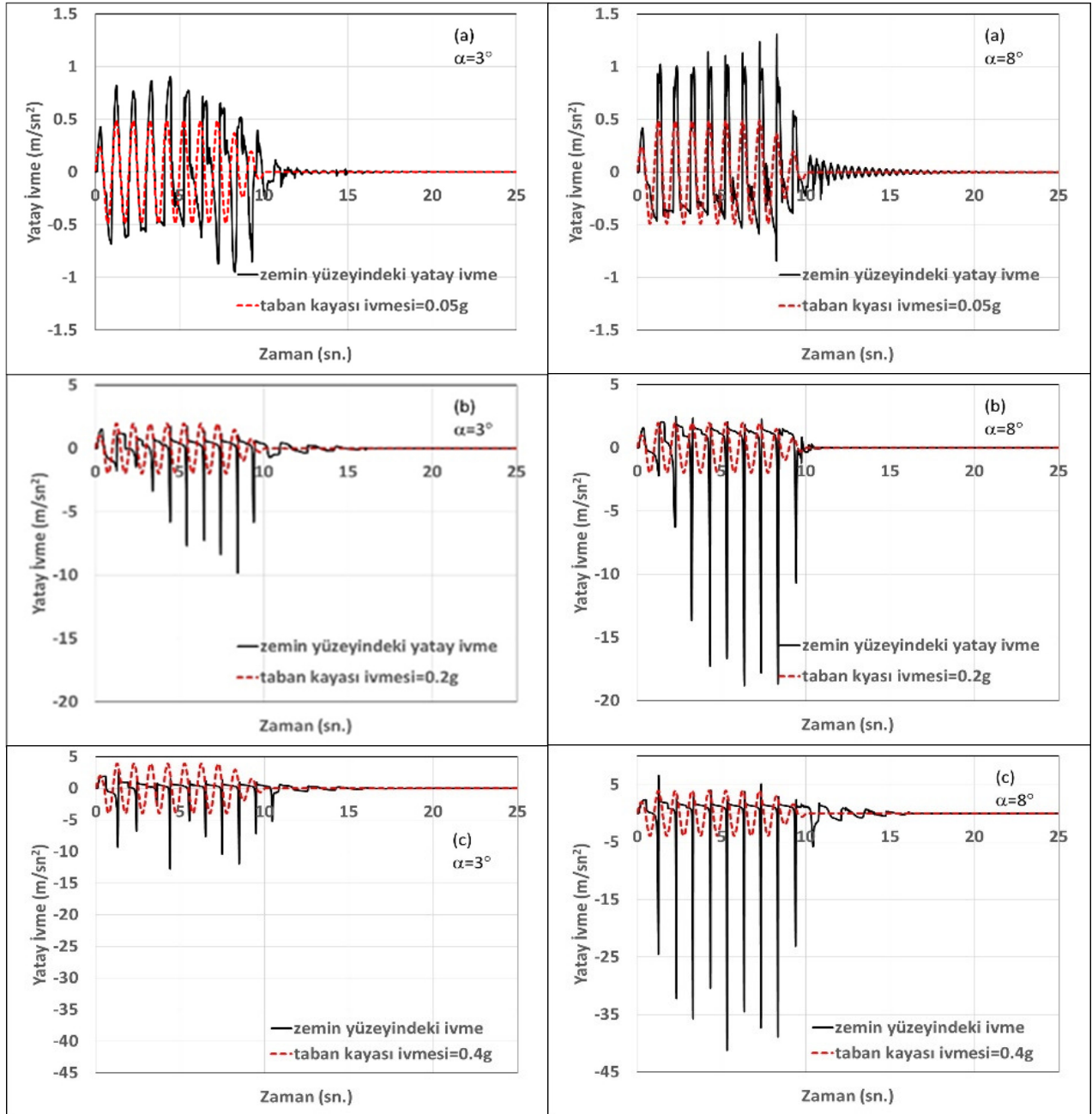


Şekil 9. 3m ve 15 m derinlikler için drenajsız efektif gerilme izi ilişkileri (a) 0.2 g (b) 0.4g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmeleri için.

Eğimli Zemin Yüzeyine Sahip Zemin Profili Durumu ($\alpha = 3^\circ$ ve $\alpha = 8^\circ$)

Şekil 10'da taban kayasından uygulanan 0.05g, 0.2g ve 0.4g genlikli sinüzoidal taban kayası ivmeleri için zemin yüzeyinde elde edilen yanal ivme-zaman ilişkileri $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ yüzey eğimi

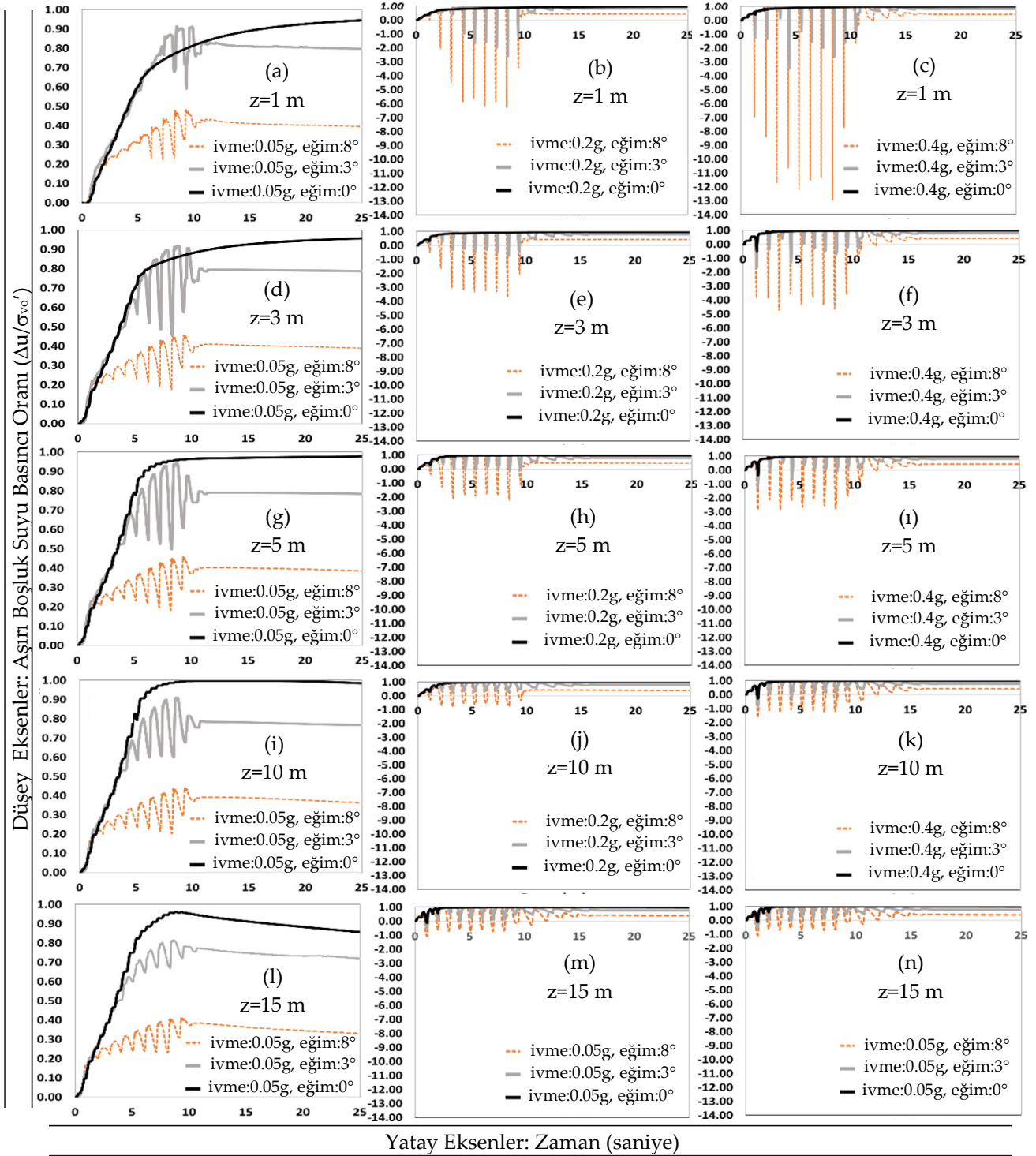
değerleri için verilmiştir. Bu şekillerde, zemin yüzeyi eğimi arttıkça, zemin yüzeyinde elde edilen ivme genliklerinin eğim yönünde anlık artışlar ve azalmalar gösterdiği belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu davranış, yüzey eğiminden kaynaklanan başlangıç statik kayma



Şekil 10. $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ zemin yüzeyi eğimleri durumunda zemin yüzeyinde elde edilen yanal ivme –zaman ilişkileri (a)0.05g, (b) 0.2g, (c) 0.4g. genliğindeki sinüzoidal taban kayası ivmeleri için.

gerilmelerinin, kayma deformasyonlarını yüzey eğimi yönünde artırmakta, böylece suya doygun granüler zeminin genişleme yönünde hacim değişimi eğilimine girmesini sağlamaktadır. Bu

eğilim, aşırı boşluksuyu basınçlarının da her çevrimde anlık olarak düşmesine neden olmaktadır (Şekil 11). Aşırı boşluksuyu basınçlarındaki düşüşler, ortalama efektif gerilmeleri artırmakta ve

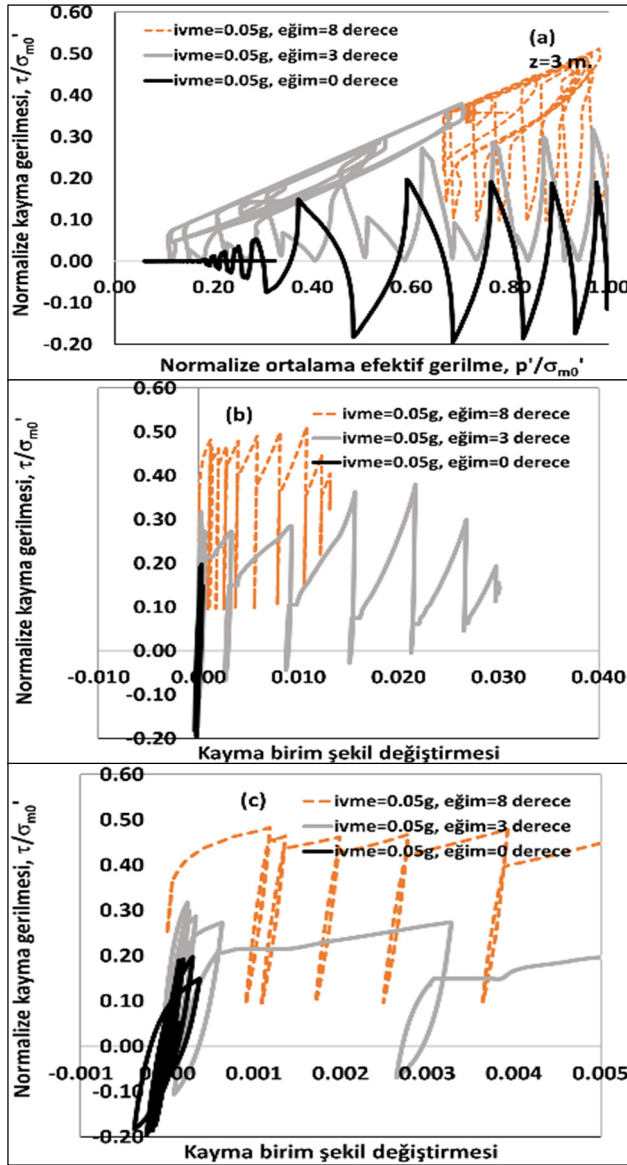


Şekil 11. $\alpha=0^\circ$, $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ zemin yüzeyi eğimleri için aşırı boşluksuyu basıncı oranlarının derinliğe bağlı değişimleri: (a), (d), (g), (i), (l) 0.05g; (b), (e), (h), (j), (m) 0.2g; (c), (f), (i), (k), (n) 0.4g. genliğindeki sinüzoidal taban kayması ivmeleri için.

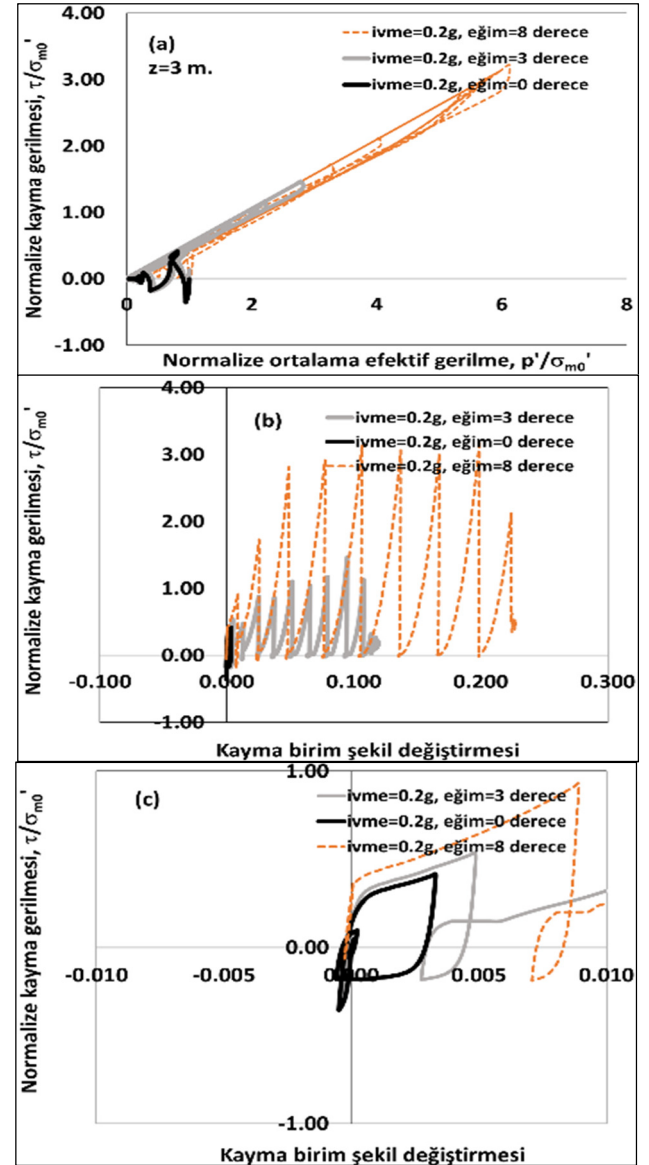
dolayısı ile zeminin kayma dayanımı ve rijitliğinin de artmasını sağlamaktadır. Her çevrimde meydana gelen rijitlik ve kayma dayanımı artışları, yüzey eğimi yönündeki deformasyonların bir anda ve yüksek düzeylerde meydana gelmesini önlemektedir. Dolayısı ile her çevrimde,

kayma deformasyonları eklenik olarak meydana gelmektedir.

Şekil 12 ve Şekil 13’de sırası ile 0.05g ve 0.2g genliğindeki sinüzoidal taban kayası ivmelerinin uygulanması durumlarında 3 m derinlikte ve



Şekil 12. 0.05g. genlikli sinüzoidal taban kayası ivmesi altında, $\alpha=0^\circ$, $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ zemin yüzeyi eğimleri için, z=3 m. derinlikte elde edilen (a) drenajsız efektif gerilme izi, (b) gerilme deformasyon ($\gamma=0-0.04$ arası) (c) gerilme-deformasyon ilişkileri ($\gamma=0-0.005$ arası).



Şekil 13. 0.2g. genlikli sinüzoidal taban kayası ivmesi altında, $\alpha=0^\circ$, $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ zemin yüzeyi eğimleri için, z=3 m. derinlikte elde edilen (a) drenajsız efektif gerilme izi, (b) gerilme deformasyon ($\gamma=0-0.3$ arası) (c) gerilme-deformasyon ilişkileri ($\gamma=0-0.01$ arası).

$\alpha=0^\circ, 3^\circ$ ve 8° olması durumlarındaki gerilme deformasyon ve drenajsız gerilme izi diyagramları görülmektedir. Drenajsız gerilme izi diyagramlarında, $\alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ yüzey eğimlerinde granüler zeminin ortalama efektif gerilme düzeyindeki artışların $\alpha=0^\circ$ durumundan çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Başlangıç durumundaki statik kayma gerilmeleri, boşluk suyu basınçlarının sürekli olarak artışını engellemiştir. Bu durum gerilme deformasyon diyagramlarında kendini artımlı deformasyon yapabilme kabiliyeti olarak ortaya koymaktadır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, çevrimsel hareketlilik (sınırlı sıvılaşıma) davranışının ortaya çıkış ve gelişim süreci, 20 m derinliğindeki orta sıkı, suya doymuş kum zemin profilinde, taban kayasından uygulanan 0.05g, 0.2g. ve 0.4g genliklerindeki sinüzoidal ivmeler altında ve $\alpha=0^\circ, \alpha=3^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ zemin yüzeyi eğimleri için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zeminde dinamik yükleme öncesi gerilme durumunun çevrimsel hareketlilik davranışının gelişiminde büyük rol oynadığını göstermektedir. Özellikle başlangıç durumundaki statik kayma kayma gerilmelerinin (zemin yüzeyinin eğimli olması durumu) mevcut olması durumunda, zeminin genişleme yönünde hacim değişimi eğilimi gösterme kabiliyeti artmaktadır. Bu durum, boşluksuyu basınçlarının çevimsel olarak sıçramalar şeklinde azalması ve artması sırasında zeminin kayma dayanımı ve rijitlik kazanmasını (boşluksuyunun azalması sırasında) sağlamaktadır.

6. Referanslar

Beliceli, A. (2006). Eskişehir Yerleşim Yeri Zeminin Büyütme Etkisinin Makaslama Dalga Hızına Bağlı Olarak Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*. Balıkesir, Türkiye.

Bonilla, L., Archuleta, R., Lavalley D (2005). Hysteric and Dilatant Behaviour of Cohesionless Soils and their Effects on Nonlinear Site Response: Field Data

Observations and Modelling. *Bulletin of Seismological Society of America*, 95(6), 2373-2395.

Boulanger, R.W., Zioyopoulou, K. (2015). PM4SAND: A Sand Plasticity Model For Earthquake Engineering Applications. *UCD/CGM-15/01 Report, University OF California*. California, USA.

Bray, J., Boulanger, Cubrinovski. M., Tokimatsu, K., Kramer., S., O'Rourke, T., Rathje, E., Green, R., Robertson, P., Beyzaei, C. (2017). U.S.-NewZealand-Japan International Workshop On Liquefaction Induced Ground Movement Effects, *University of California, 2016. PEER Report2017*. California, USA.

Elgamal, A., Dobry, R., Parra, E., Yang, Z. (1998). Soil Dilation and Shear Deformations During Liquefaction. *Proceedings of the 4th. International Conference On Case Histories in Geotechnical Engineering*. Missouri University of Science and Technology.1238-1259.

Elgamal A., Yang, Z., Parra, E., Ragheb, A. (2003). Modelling of Cyclic Mobility in Saturated Cohesionless Soils. *International Journal of Plasticity*. 19, 883-905.

Elgamal, A. (2014). Site Liquefaction. Stress-Strain Response. Stress-Strain Models. Site Response. Lateral Deformation. *Course Notes. Universidad Nacionaonal de SanJuan, Argentina*.

Gingery, R. (2014). Effects of Liquefaction On Earthquake Ground Motions. *PhD.Thesis. University of California, SanDiego*.

Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992a). Strain space plasticity model for cyclic mobility. *Soils and Foundations*, 32(2), 1-15.

Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992b). Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation. *Soils and Foundations*. 32(2), 16-20.

Iai S, Ozutsumi O. (2005). Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 29(4), 417-442.

Iai S. (2005). International standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works – An overview. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 25, 605-615.

Iai S, Tobita T. (2006) Soil non-linearity and effects on seismic site response. *In Proc 3rd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*.

Grenoble, France, 21-46.

Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K. (2011). Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 35(3), 360-392.

Iai S, Tobita T, Ozutsumi O. (2013). Induced fabric under cyclic and rotational loads in a strain space multiple mechanism model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 37(2), 150-180.

Iai S, Tobita T, Ozutsumi O. (2013). Evolution of fabric in a strain space multiple mechanism model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 37(10), 1326-1336.

Ishihara, K. (1996). Soil Behaviour In Earthquake Geotechnics. Oxford University Press. P.350.

Kramer, S., Elgamal, A. (2001). Modelling Soil Liquefaction Hazards for Performance Based Earthquake Engineering. *PEER Report 13*.

Kramer, S., Hartvigsen, A., Sideras, S., Özener, P. (2011). Site Response Modelling in Liquefiable Soil Deposits. 4th. *IASPEI / IAEE International Symposium On Effects of Surface Geology On Seismic Motion*. University of California, Santa Barbara. 1-12.

Oral, S. (2014). Effective Stress Based Constitutive Modelling And Assesment of Seismic Pile-Soil Interaction In Liquefiable Soils, PhD Thesis. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Parra, E. (1996). Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems. *Ph.D. thesis*. Troy, N.Y.: Dept. of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute.

Yang, Z. (2000). Numerical Modeling of Earthquake Site Response Including Dilation and Liquefaction. *Doktora Tezi, Columbia Üniversitesi*.

Yang, Z., Elgamal, A., Parra, E. (2003). A Computational Model for Liquefaction and Associated Shear Deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(12).

Youd. T. L. (1977). Packing Changes and Liquefaction Susceptibility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, GT8, 918-923.