



ÇEVİRİMSSEL HAREKETLİLİK DAVRANIŞINA BAĞLI YANAL ZEMİN DEFORMASYONLARININ EFEKTİF GERİLME TABANLI SAYISAL ANALİZİ

(EFFECTIVE STRESS BASED NUMERICAL ANALYSIS OF LATERAL DEFORMATIONS DUE TO CYCLIC MOBILITY)

Devrim ERDOĞAN*

ÖZET/ABSTRACT

Çevrimsel hareketlilik, dinamik yükler altındaki suya doymun kum zeminlerde, sıvılaşma meydana geldikten sonra kayma deformasyonlarının birikmesi sonucunda yüksek düzeylerde yanıl yerdeğıştirmelerin oluşmasına neden olan dinamik bir zemin davranışdır. Bu çalışmada, çevrimsel hareketlilik davranışının oluşum sürecini sayısal olarak ortaya koymak amacı ile orta sıkı ve çok sıkı suya doymun kum tabakalarına uygulanan sinüzoidal yanıl yer ivmesi altında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda sayısal analiz yöntemi olarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi, çevrimsel hareketlilik davranışının temsil edilebilmesi için ise efektif gerilme tabanlı bir zemin modeli olan PDMY (Pressure Dependent Multi-Yield Surface) plastisite modeli kullanılmıştır. Analizler OPENSEES sonlu eleman açık kod ortamında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kum zeminin sıklığı, başlangıç efektif gerilme durumu, dinamik yükleme öncesinde maruz kaldığı statik kayma gerilmeleri, rezidüel kayma dayanımı ile dinamik yüklemenin süresi, frekansı ve genliğinin çevrimsel hareketlilik davranışı üzerinde büyük ölçüde etkili oldukları görülmüştür.

Cyclic mobility is a dynamic soil behaviour observed in saturated cohesionless soils under dynamic loads in which large amounts of shear deformation is accumulated after initial liquefaction and gives way to great lateral displacements. In this paper, one dimensional site response analyses are carried out on medium and verd dense sand profiles under sinuzoidal lateral acceleration in order to investigate numerically the development of cyclic mobility. The analyses are performed by using the nonlinear finite element method in OPENSEES framework and the cyclic mobility behaviour is represented by an effective stress based model called PDMY (Pressure Dependent Multi-Yield Surface Plasticity) model. The results of the study showed that the development of cyclic mobility behaviour is strongly dependent on the relative density and initial effective stress conditions of the sand stratum, driving shear stresses, residual strength and the duration, frequency and the amplitude of the dynamic load.

ANAHTAR KELİMELEK/KEYWORDS

Sıvılaşma, Akma sıvılaşması, Çevrimsel hareketlilik
Liquefaction, Flow liquefaction, Cyclic mobility

* Ege Ün., İnşaat Müh. Böl., Bornova 35100, İZMİR

1. GİRİŞ

Sıvılaşma, dinamik yükler altındaki suya doymun kumlu zeminlerde, yüklemenin hızlı olması ve drenajın gerçekleşmemesine bağlı hacim değişimi eğilimlerine bağlı olarak gelişen boşluk suyu basıncı değişimlerinin yönlendirdiği bir olaydır. Sıvılaşma sonucunda meydana gelen kayma dayanımı ve rijitlik değişimleri, zeminde yüksek düzeylerde göçme ve deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Geçmiş depremlerde büyük ölçüde hasar meydana getirmiş olan akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik davranışları oluşum süreçleri açısından birbirinden farklı iki sıvılaşma türüdür.

Şev kaymaları, taşıma gücü kayıpları ve oturmalar, yatay zemin yüzeyi durumunda gözlenen zemin salınımları ve bu sırada boşluk suyunun kum zemin yüzeyine doğru hareketi sırasında meydana gelen kaynama, hafif eğimli arazilerde gözlenen yanal yayılma ve kuvvetli deprem hareketi sona erdikten sonra boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sırasında oluşan düşey yöndeki oturmalar sıvılaşmaya bağlı deformasyonların çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Bu deformasyonların temel nedeni, dinamik yükleme süresince ve sonrasında boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimlerdir.

1964 yılında meydana gelen Niigata ve Alaska depremleri, sıvılaşmaya bağlı yerdeğiştirmelerin tasarım açısından önemini ortaya koyan ilk depremlerdir. Bu depremlerde, yapılar genellikle yapısal elemanların göçmesi sonucunda değil, sıvılaşma sonucunda meydana gelen kayma dayanımı kayıplarına bağlı yan yatmalar (tilt) sonucunda hasar görmüşlerdir. Ayrıca yer altı boru hatları ve kazıklı temellerin de sıvılaşmaya bağlı yanal deformasyonlar nedeni ile hasar gördükleri, o dönemde sıvılaşma konusundaki bilgi eksikliği nedeni ile depremden uzun bir süre sonra yapılan incelemelerde ortaya çıkmıştır. Nihonkai-Chibu 1983 depremi hafif eğimli arazilerde sıvılaşmaya bağlı yüksek yanal yerdeğiştirmelerin (1 m'den fazla) dikkat çekmeye başladığı ilk depremlerden bir tanesidir. (Towhata, 2005).

1920 yılında yönetmeliklere girerek geoteknik deprem mühendisliği sismik tasarım uygulamalarında da kullanılmaya başlanan sismik katsayı yöntemi, özellikle dayanma yapıları (Mononobe-Okobe Yöntemi), şevler, toprak dolgu barajlar ve temel sistemlerinin deprem yüklerine karşı tasarımında uygulanarak geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Sano, 1916). Kuvvet tabanlı bir yaklaşım olan bu yöntemde tasarım, hareket eden kütle ağırlığı ile sismik katsayının çarpımı sonucunda elde edilen eşdeğer deprem yüküne göre yapılmaktadır. Geçmiş büyük depremlerde meydana gelmiş olan yüksek deformasyonlar, sismik tasarımda kuvvet tabanlı yaklaşımların iflas etmeye başladığını göstermiştir. Nitekim, bu yaklaşımlarda dinamik yükleme boyunca, boşluk suyu basıncı değişimlerinin izlenmesi mümkün değildir. Dolayısı ile bu değişimlere bağlı dayanım ve rijitlik kayıpları nedeni ile meydana gelen deformasyonların belirlenmesi de mümkün olamamaktadır. Bu bağlamda, geoteknik deprem mühendisliği alanında, kuvvete göre tasarım yaklaşımlarından deformasyona göre tasarım yaklaşımlarına doğru bir geçiş gözlenmektedir.

Sıvılaşmaya bağlı deformasyonların belirlenmesi, bir sıvılaşma analizinin en önemli aşamalarından bir tanesi olmakla birlikte hiç de kolay bir iş değildir. Bu deformasyonların belirlenmesinde önceki depremlerden geri analiz yolu ile üretilmiş olan ampirik yöntemler, statik limit denge yöntemleri ve doğrusal olmayan efektif gerilme tabanlı sonlu eleman veya sonlu fark yöntemleri kullanılmaktadır (Seed vd., 2003). Efektif gerilme tabanlı analizler, boşluk suyu basıncındaki ve dolayısı ile zeminin efektif gerilme durumundaki değişimlerin kuvvetli yer hareketi süresince ve sonrasında izlenebilmesi nedeni ile, sıvılaşmaya bağlı deformasyonların belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Böyle bir analiz başarılı olabilmesi için öncelikle detaylı bir zemin araştırması yapılarak, dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Sonrasında ise, dinamik yükleme süresince meydana gelecek olan boşluk suyu basıncı gelişimi ve sönümlenme davranışını gerçeğe

uygun bir şekilde temsil edebilen bir model ile sayısal analizler gerçekleştirilmektedir (Towhata, 2005; Seed vd.,2003, Marcuson, 2007).

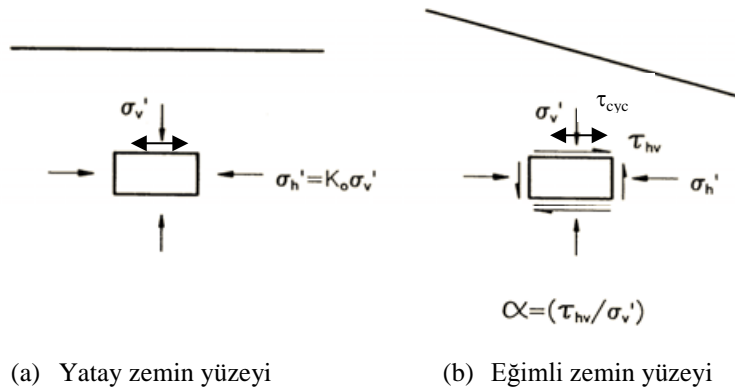
Bu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, dinamik yükler altındaki suya doymuş kum zemin tabakasında çevrimsel hareketlilik davranışının gelişimi sayısal olarak incelenmiştir. Analizler OPENSEES açık kod ortamında, PDMY (Pressure Dependent Multi-Yield Surface Plasticity) modeli kullanılarak yapılmıştır. Farklı sıklıklardaki suya doymuş kum zemin profili tabanında sinüs eğrisi şeklinde uygulanan yatay yer ivmesi altında gerçekleştirilen bir boyutlu zemin tepkisi analizlerinde, özellikle statik kayma gerilmelerinin çevrimsel hareketlilik davranışına bağlı yanal deformasyonların oluşumu üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, eşdeğer doğrusal model ile PDMY modelinin bir karşılaştırmasını yapabilmek amacı ile kum tabakasının kuru olması durumunda, hem EERA hem de OPENSEES ortamlarında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları kuru (veya drenajlı durumda) EERA ile PDMY modellerinin birbirlerine yakın sonuçlar üretme beklentisini karşılamıştır.

2. AKMA SIVILAŞMASI VE ÇEVİRİMSSEL HAREKETLİLİK DAVRANIŞLARI

2.1. Akma Sıvılaşması ve Çevrimsel Hareketlilik Davranışlarında Etkili Olan Parametreler

Zeminin sıklığı, başlangıç efektif gerilme durumu (başlangıçtaki ortalama efektif gerilmeler ve statik kayma gerilmeleri), rezidüel kayma dayanımı, kuvvetli yer hareketinin genliği, frekansı ve süresi akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik davranışlarına bağlı deformasyonların meydana gelmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Bu noktada özellikle statik kayma gerilmelerinin etkisinden kısaca söz etmek aydınlatıcı olacaktır.

Yatay ve eğimli zemin yüzeyi durumlarında bir zemin elemanının maruz kaldığı statik kayma gerilmeleri sırası ile Şekil 1a ve Şekil 1b'de verilmiştir. Şekil 1a'da K_0 durumu geçerli olduğu için zemin elemanında herhangi bir yanal deformasyon eğilimi görülmemektedir. Dolayısı ile eleman içerisinde, düşey ve yatay normal gerilmelerin eşit olmamasından kaynaklanan bir kayma gerilmesi olsa bile eleman yüzeyinde hareketi tetikleyici kayma gerilmeleri bulunmamaktadır. Şekil 1b'de ise eleman yüzeyinde eğimli zemin yüzeyinden kaynaklanan ve dinamik yüklemenin çevrimsel hareketlilik aşamasında elemanı şev eğimi yönünde yerdeğiştirmeye zorlayan kayma gerilmeleri bulunmaktadır. (Seed vd., 2003).

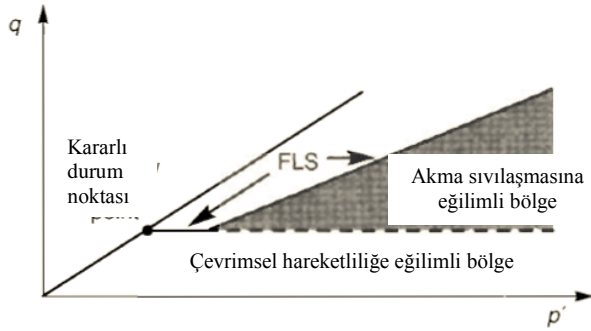


Şekil 1. Tekrarlı yükler altında zemin ortamında meydana gelen gerilme durumu (a) Yatay zemin yüzeyi durumu (b) Eğimli zemin yüzeyi durumu (Seed vd., 1979)

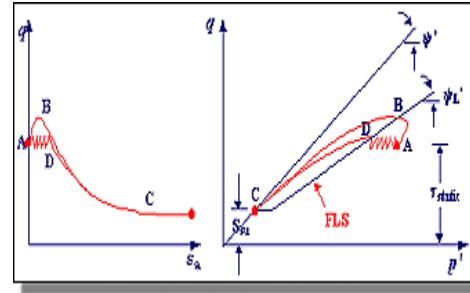
2.2. Akma Sıvılaşması

Akma sıvılaşması dinamik yükler altındaki suya doymun gevşek kumlarda gözlenen bir göçme türüdür. Şekil 2'deki efektif gerilme izinde akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik davranışlarına eğilimli bölgeler görülmektedir. Akma sıvılaşmasının meydana gelebilmesi için, dinamik yükleme öncesindeki efektif gerilme durumunun akma sıvılaşmasına eğilimli bölge içerisinde olması gerekmektedir.

Suya doymun gevşek kumlu zemin ortamını akma sıvılaşmasına taşıyan süreci iki aşamada özetlemek mümkündür. İlk aşamada, statik veya dinamik bir yükleme etkisi altında boşluk suyu basıncı artarak efektif gerilme izi akma sıvılaşması çizgisine (FLS) doğru yaklaşır. Bu aşamadaki kayma birim şekil değiştirmeleri düşük seviyelerdedir. Efektif gerilme izi akma sıvılaşması çizgisine ulaşan bir zeminde stabilite bozularak kayma dayanımı sıvılaşmış durumdaki rezidüel kayma dayanımı değerine düşer. Bu noktada, ikinci aşama başlar, boşluk suyu basıncı oldukça yüksek seviyelere ulaşır ve statik kayma gerilmeleri, rezidüel kayma dayanımı değerine düşüncüye ve yeni bir denge konumu sağlanıncaya kadar zemin ani ve sınırsız deformasyon yapar (Şekil 3). Geçmiş büyük depremlerde, akma sıvılaşması örneklerine özellikle toprak dolgu barajlarda çok fazla rastlanmıştır, zira, sıvılaşmaya bağlı deformasyonların analizi ile ilgili yöntemlerin geliştirilmesi, ilk olarak akma sıvılaşması şeklindeki deformasyon modunun incelenmesi ile başlamıştır (Özkan, 1998).



Şekil 2. Akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik davranışlarına eğilimli bölgeler (Kramer, 1996)



Şekil 3. Akma sıvılaşması durumunda tipik bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve efektif gerilme izi (Kramer, 1996)

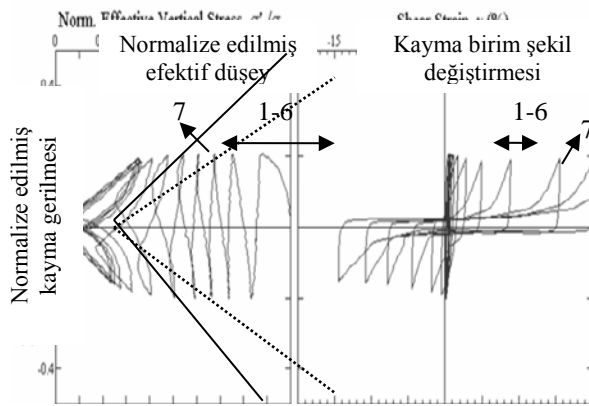
2.3. Çevrimsel Hareketlilik

Çevrimsel hareketlilik, genellikle orta sıkı ve sıkı kumlarda yaygın olarak görülmesine rağmen gevşek kumlarda da meydana gelmektedir. Geçmişte yaşanmış büyük depremlerde yanal yayılmaya bağlı hasarların ana nedenlerinden bir tanesi çevrimsel hareketlilik davranışıdır. Zemini çevrimsel hareketlilik kaynaklı yüksek deformasyonların olduğu konumuna taşıyan aşamaları, Şekil 4'deki dinamik üç eksenli deney verisi ve Şekil 5'deki teorik gösterimi dikkate alarak aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

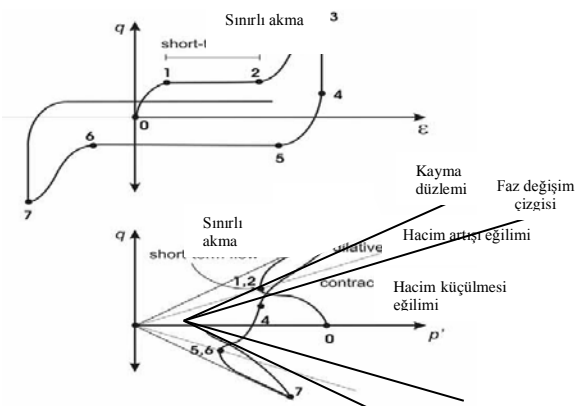
1. Başlangıç efektif gerilme durumu altındaki suya doymun kum zemin ortamı dinamik yüklemelere maruz kaldığında hacim azalması eğilimi göstermesi sonucunda boşluk suyu basıncında artış ve ortalama efektif gerilmelerde de azalmalar meydana gelmektedir. Bu aşamada efektif gerilme izi faz dönüşüm çizgisinin altında olup, kayma deformasyonları henüz çok yüksek seviyelerde değildir (Şekil 4'de efektif gerilme izinde 7.çevrime kadar olan kısım).

2. Ortalama efektif gerilmelerin çok düşük seviyelere indiği belli bir çevrim sayısından sonra (Şekil 4'de 7.çevrimden sonra) zeminin kayma deformasyonlarında hızlı bir artışla birlikte kayma dayanımı ve rijitliğinde de azalmalar meydana gelmektedir. Bu durumda kum zeminin sıvılaştığını söylemek mümkündür. Literatüre göre boşluk suyu basıncı oranının 0.7-1 değerlerine veya kayma deformasyonunun yaklaşık olarak 3% değerlerine ulaştığı zaman sıvılaşmanın başlayabileceği kabulü yapılabilmektedir (Naesgaard ve Byrne, 2007; Seed vd., 2003).

3. Sıvılaşma meydana geldikten sonra, sıvılaşma sonrası (post-liquefaction) davranış hakim olmaya başlamaktadır. Bu aşamada boşluk suyu basıncı oranı yaklaşık olarak 1 değerinde olup, efektif gerilme izi faz transformasyon çizgisine çok yaklaşmıştır. Dinamik yüklemenin ilerleyen safhalarında efektif gerilme izi, yükleme sırasında faz dönüşüm çizgisinin üzerine çıkmakta ve hacim artması eğilimine bağlı boşluk suyu basıncı azalmaları ve kayma dayanımı ve rijitlik artışları gözlenmektedir (Şekil 5, 2-3). Boşaltma sırasında (Şekil 5, 3-4,4-5) ise, faz dönüşüm çizgisinin altına inerek, hacim azalması eğilimine bağlı boşluk suyu basıncı artışları ve kayma dayanımı ve rijitlik azalmaları gözlenmektedir (Bynes, 2005). Efektif gerilme izinin faz dönüşüm çizgisinden geçişleri sırasında (Şekil 5'de 1-2, 5-6) sabit kayma gerilmeleri ve ortalama efektif gerilmeler altında yüksek kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Çevrimsel hareketliliğe bağlı kayma deformasyonları dinamik yükleme süresince birikmeye devam etmekte ve dinamik yükleme sonunda oldukça yüksek değerlere (>10%) ulaşmaktadır. Çevrimsel hareketlilik davranışının temsil edilmesi amacı ile üretilen sıvılaşma modellerinde, davranışın sayısal modelleme açısından en çok problem yaratan bölümü, efektif gerilme izinin göçme çizgisine çok yaklaştığı, sıvılaşma sonrası davranışı (post-liquefaction behaviour) temsil eden kısımdır ve davranışın bu kısmını iyileştirmeye yönelik çalışmalar halen devam etmektedir (Iai vd., 1990; Bardet vd., 1999; Elgamal vd., 2003).



Şekil 4. Wu (2002) tarafından $D_r = 43\%$ sıklığındaki Monterey kumu üzerinde yapılmış bir tekrarlı üç eksenli basınç deneyi (Bynes, 2005)



Şekil 5. Tekrarlı yükler altındaki bir zeminin gerilme izi ve faz transformasyon çizgisinden geçişi sırasındaki gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Lenart, 2008)

3. DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ SUYA DOYGUN ZEMİN ORTAMININ EFEKTİF GERİLME TABANLI SAYISAL ANALİZİNDE TEMEL İLKELER

Suya doygun kum zemin ortamında, dinamik yükleme süresince meydana gelen kayma dayanımı ve rijitlik değişimleri zemin ortamının efektif gerilme durumu, başka bir deyişle

boşluk suyu basıncı değişimleri tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle, boşluk suyu basıncı değişimlerinin izlenebildiği efektif gerilme tabanlı analizler, sıvılaşma potansiyelinin ve sıvılaşmadan sonra meydana gelecek olan deformasyonların belirlenmesinde kullanılan en etkin analiz teknikleridir. Dinamik yükler altındaki suya doygun bir kum zemin ortamında, sıvılaşma davranışının ortaya konması amacı ile gerçekleştirilen efektif gerilme tabanlı dinamik doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinin üç temel bileşeni vardır:

1. Dinamik yükler altındaki suya doygun zemin ortamında, zemin daneleri ile boşluk suyu arasındaki etkileşimi ifade eden diferansiyel denklem takımı (Biot Denklemleri).
2. Sıvılaşma sürecini tüm aşamaları (zemini sıvılaşmaya taşıyan süreç ve sıvılaşma sonrası) ile ele alan bir sıvılaşma modeli. Bu model, sıvılaşma kaynaklı tüm göçme ve deformasyon türlerinin oluşum koşullarını modelleme kapasitesine sahip olmalıdır.
3. Dinamik doğrusal olmayan sonlu eleman denklem takımının zaman tanım alanında çözümü için etkin algoritmalar.

Dinamik yükler altındaki suya doygun zemin ortamını kontrol eden denklem sistemi (u-w-p form) Biot tarafından geliştirilmiştir. Deprem yükleri altındaki zemin ortamları için bu denklem sisteminin basitleştirilmiş şekli olan u-p formu kullanılmaktadır. Sonlu eleman formülasyonlarına dönüştürülmüş u-p yaklaşımı Eşitlik 1'de görülmektedir. u-p eşitlik takımındaki birinci eşitlik dinamik yükler altında zemin hareketini, ikinci eşitlik ise dinamik yükler altındaki boşluk suyunun hareketini temsil etmektedir. Bu bağıntılarda M kütle matrisi, B birim-şekil değiştirme-deplasman matrisi, σ' efektif gerilme vektörü, Q, zemin deplasmanları ile boşluk suyu akışı davranışını birleştiren bir matris, p boşluk suyu basıncı vektörü, H permeabilite matrisi, S sıkışabilirlik matrisi, $f^{(1)}$ ve $f^{(2)}$ sınır koşullarından kaynaklanan kuvvet vektörleriydi.

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{u}\} + \int_V [B^T]\{\sigma'\}dV - [Q]\{p\} - \{f^{(1)}\} &= 0 \\ [Q^T]\{\dot{u}\} + [H]\{p\} + [S]\{\dot{p}\} - \{f^{(2)}\} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

u-p denklem takımının sıvılaşma modeli göz önüne alınarak çözümü sonucunda, dinamik yükleme süresince sıvılaşma davranışını ortaya koyan bir çözüm elde edilmektedir. Sıvılaşma sürecini tüm aşamaları ile ele alan bir sıvılaşma modeli aşağıdaki temel bileşenleri içermelidir:

1. Sıvılaşma modelinde doğrusal olmayan kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirme davranışını temsil eden bir iskelet eğrisi (backbone curve) modeli bulunmalıdır. İskelet eğrisini hiperbolik model ile temsil etmek mümkündür.
2. Sıvılaşma modelinde çevrimli yükler altında histeresis ilmiğini temsil eden bir model (örneğin Masing Rule) bulunmalıdır.
3. Sıvılaşma modelinde iskelet eğrisi bozunum modeli (Backbone Degredation Model) bulunmalıdır. Bu model, dinamik yükleme süresince, zeminin efektif gerilme durumundaki değişimlere bağlı zeminin iskelet eğrisinin ne şekilde değiştiğini ifade etmektedir.
4. Sıvılaşma modeli, dinamik yükleme altındaki suya doygun zemini sıvılaşmaya taşıyan süreci (pre-liquefaction) temsil edebilmelidir.
5. Sıvılaşma modeli, suya doygun zeminde sıvılaşma sonrasında meydana gelen çevrimsel hareketlilik (post-liquefaction) davranışını temsil edebilmelidir.
6. Sıvılaşma modelinde, zeminin başlangıç durumunda mevcut olan belli bir yöndeki statik kayma gerilmelerinin, bu yönde meydana getirecekleri yüksek düzeylerdeki kayma deformasyonu birikimleri dikkate alınmalıdır.
7. Sıvılaşma modelinde, akma sıvılaşması durumu da göz önüne alınmalıdır.

8. Sıvılaşma modelleri dinamik yükleme boyunca boşluk suyu gelişimini modellemek üzere üretilmişlerdir. Kuvvetli yer hareketi sona erdikten sonra, boşluk suyunun sönümlenmesi sonucunda meydana gelebilecek oturmalar ise u-p formülasyonunda boşluk suyunun hareketini kontrol eden ikinci denklem yolu ile belirlenebilmektedir (Kramer ve Elgamel, 2001). Dolayısı ile sıvılaşma analizlerinde, u-p denklem takımını iki şekilde kullanmak mümkün olmaktadır:

1. u-p denklem takımının sıvılaşma modeli ile birlikte kullanılması durumu (Coupled Form): Bu durumda, zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik sonlu eleman analizleri sonucunda, gerek kuvvetli yer hareketi süresince, drenajsız durumda meydana gelen boşluk suyu basıncı gelişimine bağlı yanal deformasyonlar ve gerekse kuvvetli yer hareketi sona erdikten sonra boşluk suyu basıncının sönümlenmesine bağlı düşey deformasyonlar belirlenebilmektedir.

2. u-p denklem takımında zemin hareketini ilgilendiren ilk denklemin bir sıvılaşma modeli ile birlikte kullanılması durumu (Uncoupled form) : Bu durumda ise, yalnızca kuvvetli yer hareketi süresince, drenajsız durumda meydana gelen boşluk suyu basıncı gelişimi problemi ele alınmış olur. Dolayısı ile kuvvetli yer hareketi sona erdikten sonra boşluk suyunun sönümlenmesine bağlı oturmalar belirlenmemektedir (Taiebat vd., 2007).

4. PDMY (PRESSURE DEPENDENT MULTI-YIELD SURFACE) MODELİ

Bu çalışma kapsamında çevrimsel hareketlilik davranışının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen parametrik sonlu eleman analizlerinde PDMY zemin plastisite modeli kullanılmıştır. PDMY modeli efektif gerilme tabanlı bir sıvılaşma modelidir (Parra, 1996; Yang, 2000; Elgamel vd., 2002; Elgamel vd., 2003; Yang vd., 2003). Literatürde, akma sıvılaşması ve/veya çevrimsel hareketlilik davranışlarını modellemek amacı ile üretilmiş olan efektif gerilme tabanlı sıvılaşma modelleri ve bu modellerin uygulanmış olduğu program kodları mevcuttur ve çeşitli araştırmacılar tarafından da bu çalışmalara referans verilmiştir (Iai, 1991; Arulanandan vd., 1994; Smith., 1994; Cooke, 2000; Kramer ve Elgamel, 2001; Yang vd., 2003; Tonaroğlu, 2006).

PDMY modeli, hem kumlu ve hem de killi zeminler için OPENSEES sonlu elemanlar açık kod ortamında programlanmış bir şekilde bulunmaktadır. Modeli hem kuru, hem de suya doymun drenajsız yükleme koşulları altında kullanmak mümkündür. PDMY modelinin u-p elemanları ile birlikte kullanımı (coupled form) sonucunda, dinamik yükler altındaki suya doymun kum zemin ortamında boşluk suyu basıncı gelişimi ve sönümlenmesi davranışları modellenmektedir. Öte yandan, PDMY modelinin FluidSolidPorous Malzeme ile birlikte kullanımı (uncoupled form) yalnızca boşluk suyu basıncı gelişiminin modellenmesine olanak vermektedir.

4.1. PDMY Modelinin Ana Bileşenleri

PDMY modeli çoklu-akma yüzeyi plastisitesi (multi-yield surface plasticity) kapsamında ele alınması gereken bir sıvılaşma modelidir (Elgamel vd., 2002). Çevrimsel hareketlilik suya doymun kum zemin ortamında sıvılaşma meydana geldikten sonra oluşan bir davranıştır. Çevrimsel hareketliliğin olduğu düşük seviyelerdeki gerilme durumunda meydana gelen kayma deformasyonlarını gerilme uzayı tabanlı formülasyonlar ile sağlıklı bir şekilde belirlemek pek mümkün değildir. Dolayısı ile, yüksek deformasyonlardaki bu davranışı temsil edebilmek için, PDMY modelinde, gerilme uzayı ve deformasyon uzayı formülasyonlar birlikte kullanılmıştır. (Yang vd., 2003).

Plastisite teorisi, akma fonksiyonu, pekleşme kuralı (yumuşama/sertleşme kuralları) ve plastik fonksiyon-akma kuralı üzerine kurulmuştur. Akma fonksiyonu üç boyutlu uzayda malzemenin akmaya başladığı (plastik deformasyonların başladığı) gerilme durumunu gösteren noktaların oluşturduğu sınırı ifade eden yüzeyin matematiksel ifadesidir. Dinamik yükler altındaki gerilme durumunun bu yüzeyin altında kalması halinde elastik deformasyonların oluştuğunu, gerilme durumunun bu yüzeyin üzerinde herhangi bir noktada olması durumunda ise elastik deformasyonlarla birlikte plastik deformasyonların da oluştuğunu söylemek mümkündür (Tonaroğlu, 2006). PDMY modelinde kullanılan konik akma yüzeyleri Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 6'da en içteki konik yüzey akmanın yani plastik deformasyonların ilk meydana geldiği yüzeydir. En dıştaki konik yüzey göçme yüzeyini, arada kalan farklı boyutlardaki yüzeyler de sertleşme bölgesini (hardening zone) ifade etmektedirler.

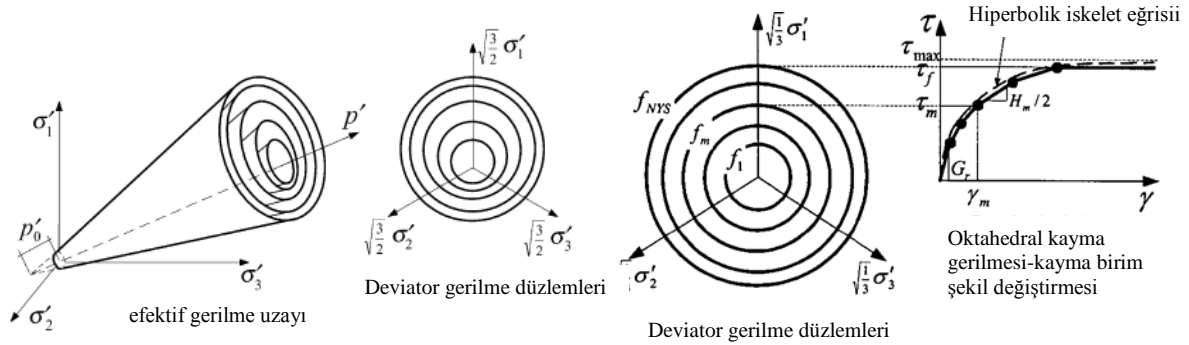
PDMY modelinde, kayma deformasyonu-kayma gerilmesi ilişkisi gerilme uzayı formülasyonları yardımı ile oluşturulmaktadır. Zeminin herhangi bir ortalama efektif gerilme değerindeki hiperbolik iskelet eğrisi, referans kayma birim şekil değiştirmesi (γ_{sr}) ve kayma dayanımı (τ_s) ifadeleri sırası ile Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te görülmektedir. Bu bağıntılarda görülen τ octahedral kayma gerilmelerini, γ ise octahedral kayma birim şekil değiştirmelerini ifade etmektedir (Eşitlik 4 ve Eşitlik 5). Şekil 7'de herhangi bir ortalama efektif gerilme durumundaki iskelet eğrisinin çoklu akma yüzeyi plastisitesi kapsamında nasıl ifade edildiği görülmektedir.

$$\tau = \frac{G_{s0}\gamma}{1 + \frac{G_{s0}\gamma}{\tau_s}} \quad (2)$$

$$\gamma_{sr} = \frac{\tau_s}{G_{s0}} \quad \tau_s = \frac{2\sqrt{2}\sin\phi}{3-\sin\phi} p_s' \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} [(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + 6\gamma_{xy}^2 + 6\gamma_{yz}^2 + 6\gamma_{xz}^2]^{(1/2)} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{3} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{xz}^2]^{(1/2)} \quad (5)$$



Şekil 6. Konik akma yüzeylerinin asal efektif gerilme uzayında ve deviator düzleminde gösterimi (Parra, 1996; Yang, 2000).

Şekil 7. Hiperbolik iskelet eğrisi ve çoklu-yüzey plastisitesi kapsamında gösterimi (Parra, 1996)

Dinamik yükler altındaki suya doygun zemin ortamında ortalama efektif gerilmeler zamana bağlı olarak değişmektedir. Referans ortalama efektif gerilme değerindeki (p_r'), başlangıç kayma modülü (G_{r0}) ve başlangıç hacimsel modül (B_{r0}) değerlerinin bilinmesi durumunda, dinamik yükleme boyunca değişen ortalama efektif gerilme değerlerindeki (p_s') kayma modülü (G_s) ve balk modülü (B_s) değerlerini bulmak mümkündür. Bu bağıntılarda d parametresi kumlar için 0.5 alınmaktadır. Böylece dinamik yükleme boyunca,

efektif gerilmelerdeki değişimle birlikte başlangıçtaki iskelet eğrisinin nasıl bozulmaya uğradığını izlemek mümkün olmaktadır. Drenajsız durumda, iskelet eğrisinde meydana gelen bu bozulma, boşluk suyu basıncındaki değişimlere bağlı olduğu için boşluk suyu basıncı gelişimi modeli davranışı yönlendiren en temel öğedir.

$$G_s = G_{r0} \left(\frac{p_s'}{p_r'} \right)^d \quad B_s = B_{r0} \left(\frac{p_s'}{p_r'} \right)^d \quad (6)$$

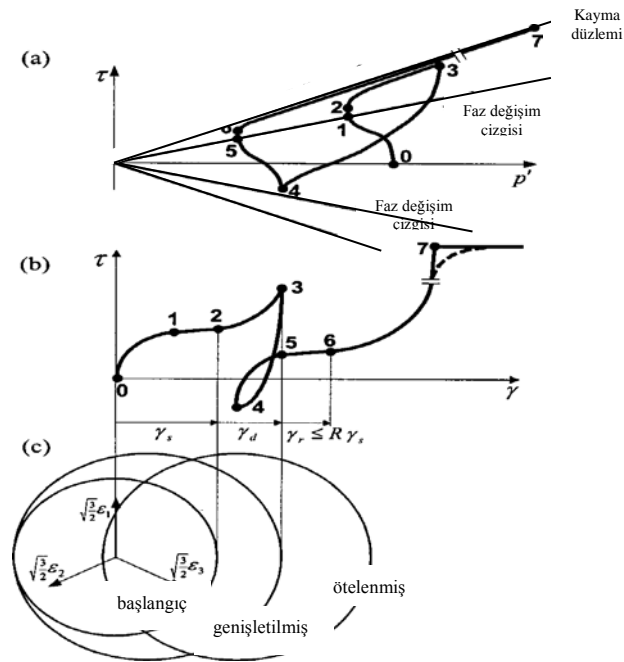
Plastisite teorisinde akma yüzeyinin hareket yeteneği, başka bir deyişle genişleme, daralma ve yerdeğiştirmesi, pekleşme kuralları (yumuşama/sertleşme kuralları) ile tanımlanmaktadır. PDMY modelinde, zeminin histeresis davranışı, Parra tarafından geliştirilen kinematik sertleşme kuralları yardımı ile oluşturulmuştur (Parra, 1996; Elgamel vd., 2003). Plastik şekil değiştirme adımlarının büyüklüğü ve yönünü tanımlamak için plastik fonksiyon ve akma kuralı kavramları geliştirilmiştir (Tonaroglu, 2006). PDMY modelinde, drenajsız durumdaki efektif gerilme izi ve meydana gelen plastik kayma deformasyonları arasındaki ilişkiler akma kuralları çerçevesinde tanımlanmıştır. Bu akma kuralları deformasyon uzayı formülasyonları yardımı ile oluşturulmuştur (Şekil 8). PDMY modelinde efektif gerilme izinin faz dönüşüm çizgisine göre konumunu dikkate alarak aşağıdaki akma kurallarını tanımlamak mümkündür. Bu akma kuralları ile ilgili formülasyonlar literatürde detaylı bir şekilde verilmiştir (Yang vd., 2003, Baynes, 2005).

1. Hacim azalması eğilimlerinin hakim olduğu bölgeler: Şekil 8a'da drenajsız durumdaki efektif gerilme izinin 0-1, 3-4 ve 4-5 ile tanımlanmış parçalarında hacim azalması eğilimi sonucunda boşluk suyu basıncının arttığı ve ortalama efektif gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Burada vurgulanması gereken nokta, yükleme sırasında meydana gelen hacim artışı eğilimleri ne kadar yüksek düzeyde olursa (2-3), boşaltma sırasındaki hacim azalması eğilimlerinin (3-4) ve dolayısı ile boşluk suyu basıncı artışlarının da o kadar yüksek düzeylerde olacağı gerçeğidir. 0-1 bölgesinde γ_s olarak adlandırılan kayma deformasyonu başlangıçtan itibaren ilk akmanın olduğu ana akadar olan kayma deformasyonunu göstermektedir.

2. Hacim artışı eğilimlerinin hakim olduğu bölgeler: Şekil 8a'da drenajsız durumdaki efektif gerilme izinin 2-3 ve 6-7 ile tanımlanmış parçalarında hacim genişlemesi eğilimi sonucunda boşluk suyu basıncının azaldığı ve ortalama efektif gerilmelerin arttığı gözlenmektedir. Ayrıca, Şekil 8b'de, 2-3 ve 6-7 bölgelerinde γ_d ile belirtilen kayma deformasyonlarının meydana geldiği ve kayma dayanımının arttığı görülmektedir.

3. Hacim değişimi eğiliminin gözlenmediği bölgeler: Şekil 8a'da drenajsız durumdaki efektif gerilme izinin 1-2 ve 5-6 bölgelerinde yani efektif gerilme izinin faz dönüşüm çizgisi üzerinden geçtiği kısımlarında hiçbir hacim değişimi eğilimi gözlenmemekte, dolayısı ile kayma gerilmeleri, boşluk suyu basıncı ve ortalama efektif gerilmelerde de belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Ancak, bu bölgelerde γ_r kayma deformasyonları meydana gelmektedir (Şekil 8b).

4. Kritik durum davranışının gözlendiği bölge: Şekil 8a ve 8b'de görüldüğü üzere 6-7 bölgesinde ciddi bir hacim artışı eğilimi meydana gelmiştir. 7 noktasından sonra ise zeminde kritik durum davranışı, başka bir deyişle, herhangi bir hacim değişimi eğilimi olmadan sabit kayma gerilmeleri altında yüksek deformasyonların gözlendiği durum hakimdir (Elgamel vd., 2002; Elgamel vd., 2003; Baynes, 2005; Yang vd., 2003; Mazzoni vd., 2005).



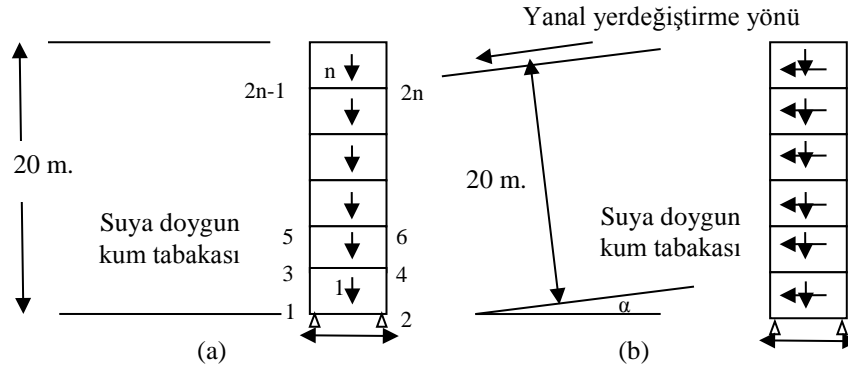
Şekil 8. PDMY modelinde drenajsız efektif gerilme izi, kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirmesi ve deformasyon uzayında tanımlanmış olan akma düzlemleri arasındaki ilişkiler (Elgamal, A., 2003)

5. PROBLEMİN SONLU ELEMANLAR MODELİ

Dinamik yükler altındaki suya doygun kum zeminlerde çevrimsel hareketlilik davranışını sayısal olarak incelemek üzere, yatay ve eğimli zemin yüzeyi durumları için oluşturulan sonlu eleman modelleri sırası ile Şekil 9'da görülmektedir. Her iki durumda da sistem 1 ve 2 düğüm noktalarında x ve y yönlerinde sabitlenmiştir. Sisteme bu düğüm noktalarında x yönünde sinüzoidal ivme uygulanmaktadır. Ayrıca bir boyutlu zemin tepkisi davranışının temsil edilebilmesi için aynı seviyede olan düğüm noktalarının x ve y yönlerindeki yerdeğiştirmeleri aynı olacak şekilde sınır koşulu uygulanmıştır. Sonlu eleman modellerinde zemin profili düzlem deformasyon dörtgen elemanlar ile temsil edilmiştir. Dörtgen elemanların boyutları, zemin profilindeki minimum kayma dalgası hızı ($V_{s,min}$) ve maksimum frekans (f_{max}) göz önüne alınarak $V_{s,min}/10.f_{max}$ ifadesine göre seçilmiştir (Kuhlmeyer ve Lysmer, 1973). Düğüm noktaları ile elemanların numaralandırılması Şekil 9'da görülmektedir.

Sonlu eleman analizleri, OPENSEES sonlu eleman açık kod ortamı kullanılarak yapılmıştır. OPENSEES, performans tabanlı deprem mühendisliği problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile programlanarak çözülebileceği bir ortamdır. Bu ortamda, çoğu eleman, malzeme modeli ve çözüm algoritmalarının programlanmış ve birer komut haline getirilmiş durumdadır. OPENSEES ortamında analizler Tcl Script dili ile programlanan kaynak dosyalarının çalıştırılması yolu ile gerçekleştirilmektedir. Yeni elemanlar, malzeme modelleri ve çözüm algoritmaları C veya Fortran programlama dilleri kullanılarak OPENSEES ortamına eklenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan standart kaynak dosyasında, model parametreleri ve dinamik yükleme ile ilgili veriler girildikten sonra uygun eleman boyutu hesaplanıp düğüm noktası koordinatları belirlenmekte ve sınır koşulları da girildikten sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır. Sonraki aşamada ise malzeme modelinin elemanlara atanması işlemi gerçekleştirilmektedir. Dinamik yükleme altında her bir elemanda drenajsız durumdaki efektif gerilme izini elde edebilmek için FluidSolidPorous malzeme modeli ve

PDMY modeli birlikte kullanılmıştır. Bu yaklaşım, dinamik yükleme süresince yalnızca boşluk suyu basıncı gelişimine bağlı kayma deformasyonlarının izlenmesine olanak verecektir. Dolayısı ile boşluk suyu basıncının sönümlenmesine bağlı düşey yöndeki deformasyonların bu tür bir analizde izlenmesi mümkün değildir. Bunun için dörtgen elemanlar yerine u-p elemanlarının kullanılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan orta sıkı ve çok sıkı kum için model parametreleri Çizelge 1’de görülmektedir (Baynes 2005; Mazzoni vd., 2004). Kaynak dosyasında, problemin sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra, sistem kendi ağırlığı altında statik olarak analiz edilerek dinamik yükleme öncesindeki başlangıç gerilme durumunun oluşması sağlanır. Bu analiz yardımı ile hafif eğimli zemin yüzeyi durumunda başlangıç statik kayma gerilmelerinin oluşumuna olanak sağlanmış olur. İzleyen aşamada, dinamik yük sisteme uygulanarak dinamik doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmektedir. Doğrusal olmayan sonlu eleman denklemlerinin çözümü için Newton-Raphson ve BFGS algoritmaları, zaman tanım alanında integrasyon için ise Newmark algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen her bir analizin toplam çalışma süresi yaklaşık olarak yarım saattir. OPENSEES ortamında elde edilen analiz sonuçları, yorumlanmak üzere MATLAB ortamına aktarılmaktadır.



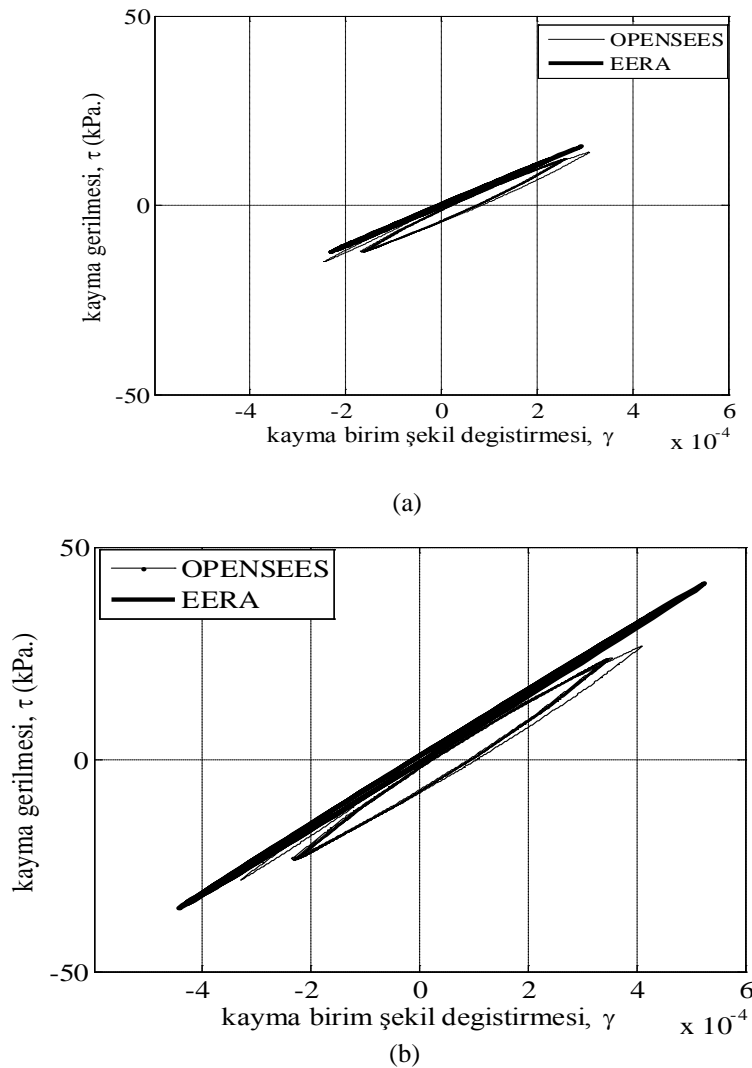
Şekil 9. Problemin sonlu elemanlar modeli a) Yatay zemin yüzeyi durumu b) Eğimli zemin yüzeyi durumu

Çizelge 1. Orta sıkı ve çok sıkı kum için model parametreleri (Mazzoni vd., 2004)

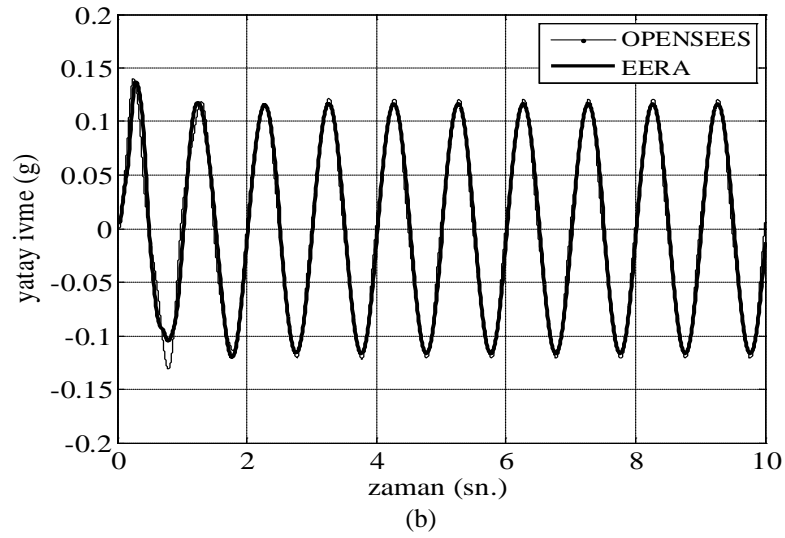
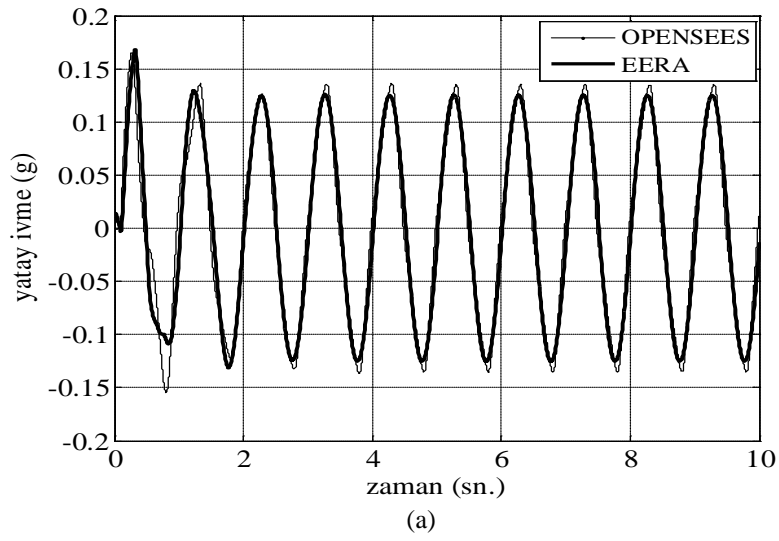
	Orta Sıkı Kum $D_r=35\%-65\%$	Çok Sıkı Kum $D_r=85\%-100\%$
Yoğunluk (ρ , t/m ³)	1.9	2.1
Referans Kayma Modülü, G_r (kPa) ($p_r'=80$ kPa'da)	7.5×10^4	1.3×10^5
Referans Hacimsel Modül, B_r (kPa)($p_r'=80$ kPa'da)	2.0×10^5	3.9×10^5
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ	33	40
Max. kayma birim şekil değiştirmesi, γ_{max} ($p_r'=80$ kPa'da)	0.1	0.1
Referans ortalama efektif gerilmesi (kPa.)	80	80
d parametresi	0.5	0.5
Faz transformasyon açısı	27	27
Hacim azalması eğilimini kontrol eden parametre, c	0.07	0.03
Hacim artışı eğilimini kontrol eden parametre, d1	0.4	0.8
Hacim artışı eğilimini kontrol eden parametre, d2	2	5
Kayma deformasyon birikimini kontrol eden parametre, l1	10	0
Kayma deformasyonu birikimini kontrol eden parametre, l2	0.01	0
Kayma deformasyonu birikimini kontrol eden parametre, l3	1	0
Boşluk oranı, e	0.7	0.45

6. ORTA SIKI KURU KUM DURUMUNDA EŞDEĞER DOĞRUSAL VE PDMY MODELLERİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN BİR BOYUTLU ZEMİN TEPKİSİ ANALİZLERİ

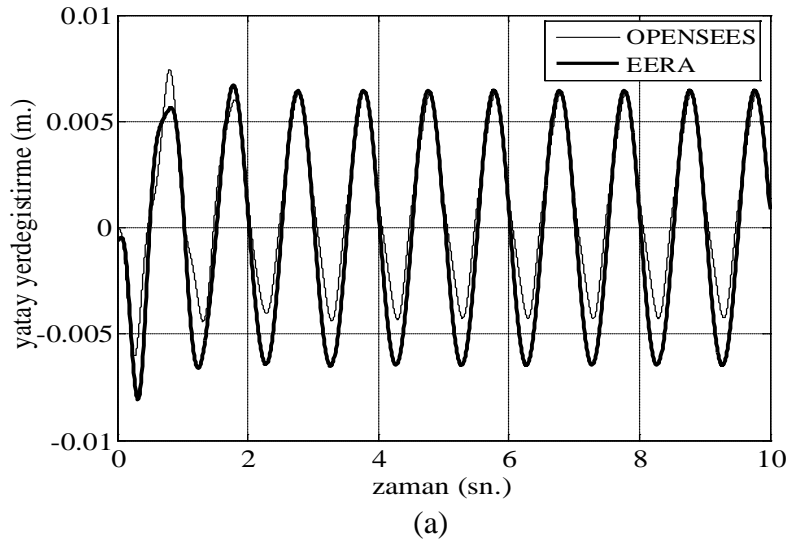
Eşdeğer doğrusal model ile PDMY modelinin bir karşılaştırmasını yapabilmek amacı ile zemin yüzeyi yatay olan 20 m. kalınlığındaki orta sıkı ($D_r = \% 35 - \% 65$) kuru kum tabakasında (Şekil 9a), hem EERA hem de OPENSEES ortamlarında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zemin profili tabanında yatay yönde genliği 1 m/sn^2 ($0.1g$), frekansı 1 Hz ve süresi 40 sn olan sinüs eğrisi şeklinde yatay ivme uygulanmıştır. Çevrimli yüklemenin 10 sn'lik (10 çevrimlik) kısmı için, 5 m ve 15 m derinliklerdeki kayma birim şekil değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkileri de Şekil 10'da, zemin yüzeyi ile 10 m derinliğindeki yatay ivme ve yanal yerdeğiştirme değerlerinin zamana bağlı değişimleri ise sırası ile Şekil 11 ve Şekil 12'de görülmektedir.

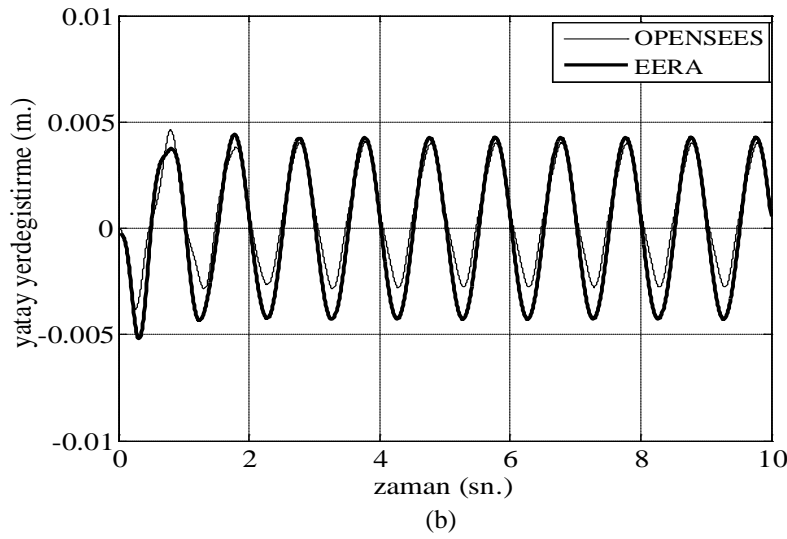


Şekil 10. Çevrimli yüklemenin 10 sn'lik kısmı için (a) 5 m ve (b) 15 m derinliklerinde elde edilen kayma birim şekil değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkileri



Şekil 11. Çevrimli yüklemenin 10 sn'lik kısmı için (a) zemin yüzeyi ve (b) 10 m derinliklerdeki yatay ivme değerlerinin zamana göre değişimleri





Şekil 12. Çevrimli yüklemenin 10 sn'lik kısmı için (a) zemin yüzeyi ve (b) 10 m derinliklerindeki yanal yerdeğiştirme değerlerinin zamana göre değişimleri

Kuru veya drenajlı analiz yapılması durumlarında boşluk suyu basıncının gelişimine izin verilmediği için EERA ile PDMY modellerinin birbirlerine yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir. Gerçekleştirilen analiz sonuçları bu beklentiye karşılık gelmiştir. Özellikle, Şekil 10'daki 5 m ve 15 m'lere ait olan kayma birim şekil değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkileri incelendiğinde, boşluk suyu basıncı gelişimi olmamasından dolayı, davranışın çevrim sayısından bağımsız olarak meydana geldiği ve yalnızca kayma birim şekil değiştirmesine bağlı olarak geliştiği görülmektedir. Kuru durumda yapılmış olan analizlerde, Çizelge 1'de orta sıkı kum durumu için verilmiş olan 80 kPa referans ortalama efektif gerilmesindeki maksimum kayma modülü değeri (G_{max}) kullanılmıştır. Bu değer farklı derinlikler için başlangıç ortalama efektif gerilmelerindeki değişime bağlı olarak bağıntı Eşitlik 6'ya göre hesaplanması gerekmektedir. Bu işlem OPENSEES ortamında PDMY modeli içinde kendiliğinden yapılmaktadır. EERA'da ise bu G_{max} değerlerinin derinliğe bağlı olarak hesaplanıp programa girilmesi gerekmektedir.

İzleyen bölümde, drenajsız durumda PDMY modeli kullanılarak gerçekleştirilen efektif gerilme tabanlı analizlerde, çevrim sayısındaki artış ile birlikte gözlenmeye başlayan hacim değişimi eğilimleri (genellikle kayma birim şekil değiştirmesinin % 0.01%- % 0.1'den yüksek değerlerinde ortaya çıkmaya başlamaktadır) ve buna paralel olarak gelişen boşluk suyu basıncı değişimleri ve iskelet eğrisinin bozulmaya başlaması ile meydana gelen yüksek yanal deformasyonlar açık bir şekilde gözlenebilecektir. İskelet eğrisinin hacim değişimi eğilimlerinin başladığı yaklaşık olarak % 0.01%- % 0.1 kayma birim şekil değiştirmesi değerlerine kadar olan kısmı hem drenajlı hem de drenajsız yükleme koşullarında benzer davranış göstermektedir.

7. SUYA DOYGUN DURUMDA PDMY MODELİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

7.1. Zemin Yüzeyi Yatay Olan Suya Doymun Orta Sıkı Kum Durumu

Sonlu elemanlar modelinde 1 ve 2 nolu düğüm noktalarında x yönünde, genliği 1 m/sn^2 (0.1 g), frekansı 1 Hz. ve süresi 40 sn olan sinusoidal yatay ivme uygulanarak gerçekleştirilen

bir boyutlu zemin tepkisi analizlerinde, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, ve 19 m derinliklerinde sırası ile 96, 76, 51, 25 ve 5 no'lu elemanlardaki normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (I), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (II), boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (III), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı (IV) ilişkileri Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13'deki farklı derinliklere ait olan efektif gerilme izleri (I) ve boşluk suyu basıncı değişimleri (III) incelendiğinde, boşluk suyu basıncı oranlarındaki artış ile birlikte ortalama efektif gerilmelerin de azaldığı ve yükleme boyunca tüm derinliklerdeki efektif gerilme izlerinin genellikle faz transformasyon çizgisinin altında kaldığı gözlenmektedir. Buna göre yükleme boyunca zemin profilinde hacim azalması yönünde bir eğilimin hakim olduğunu söylemek mümkündür. Derinlik boyunca kayma deformasyonu-kayma gerilmesi davranışları incelendiğinde (Şekil 13'de II no'lu şekiller) boşluk suyu basıncındaki artışlara paralel olarak özellikle 5 m. derinlikten itibaren zemin iskelet eğrisinin bozulmaya uğradığı ve zemin kayma dayanımı ve rijitliğinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir.

Ayrıca, tabaka boyunca maksimum % 0.8 kayma birim şekil değiştirme değeri gözlenmiştir. Ancak çevrimsel hareketlilik için gerekli olan hacim artışı eğilimleri yüksek deformasyonlarda meydana gelmektedir (Bonilla vd., 2005). Dolayısı ile % 0.8 düzeyindeki kayma birim şekil değiştirmeleri çevrimsel hareketlilik davranışının oluşabilmesi için yeterli olamamıştır.

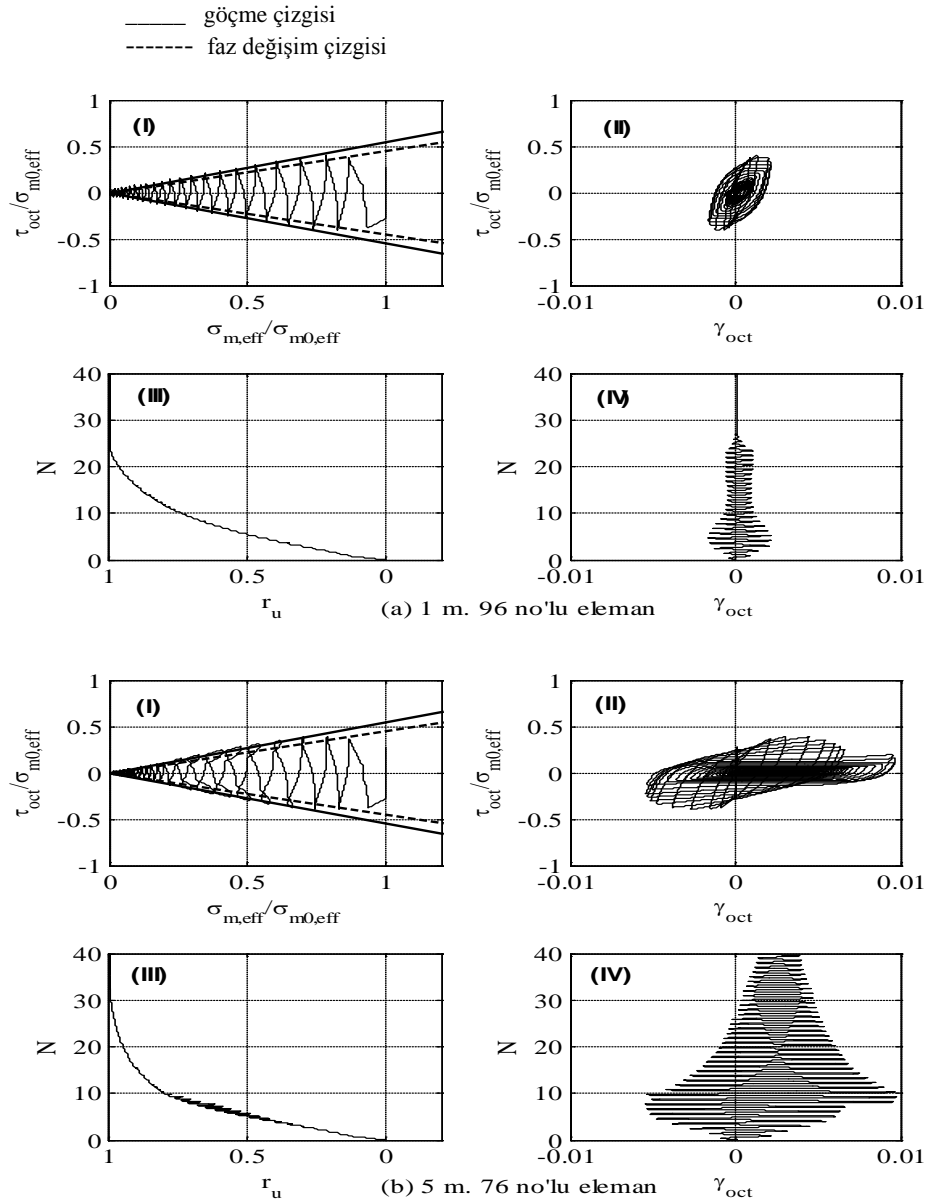
Şekil 14a, b ve c'de sırası ile yanal ivme, yanal yerdeğiştirme ve boşluk suyu basıncı oranlarının farklı derinliklerde zamana göre değişimleri görülmektedir. Şekil 14a ve c'de özellikle boşluk suyu basıncı oranının 1'e yaklaşması ile birlikte yanal ivme değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. Bunun nedeni boşluk suyu basıncı artışına bağlı olarak zemin rijitliğindeki düşme ile birlikte zemin tabakalarının yanal ivme dalgalarını zemin yüzeyine iletme kapasitesinin azalmasıdır. Şekil 14b'de zemin yüzeyindeki maksimum yanal zemin yerdeğiştirmesinin 5 cm.'in altında olduğu görülmektedir.

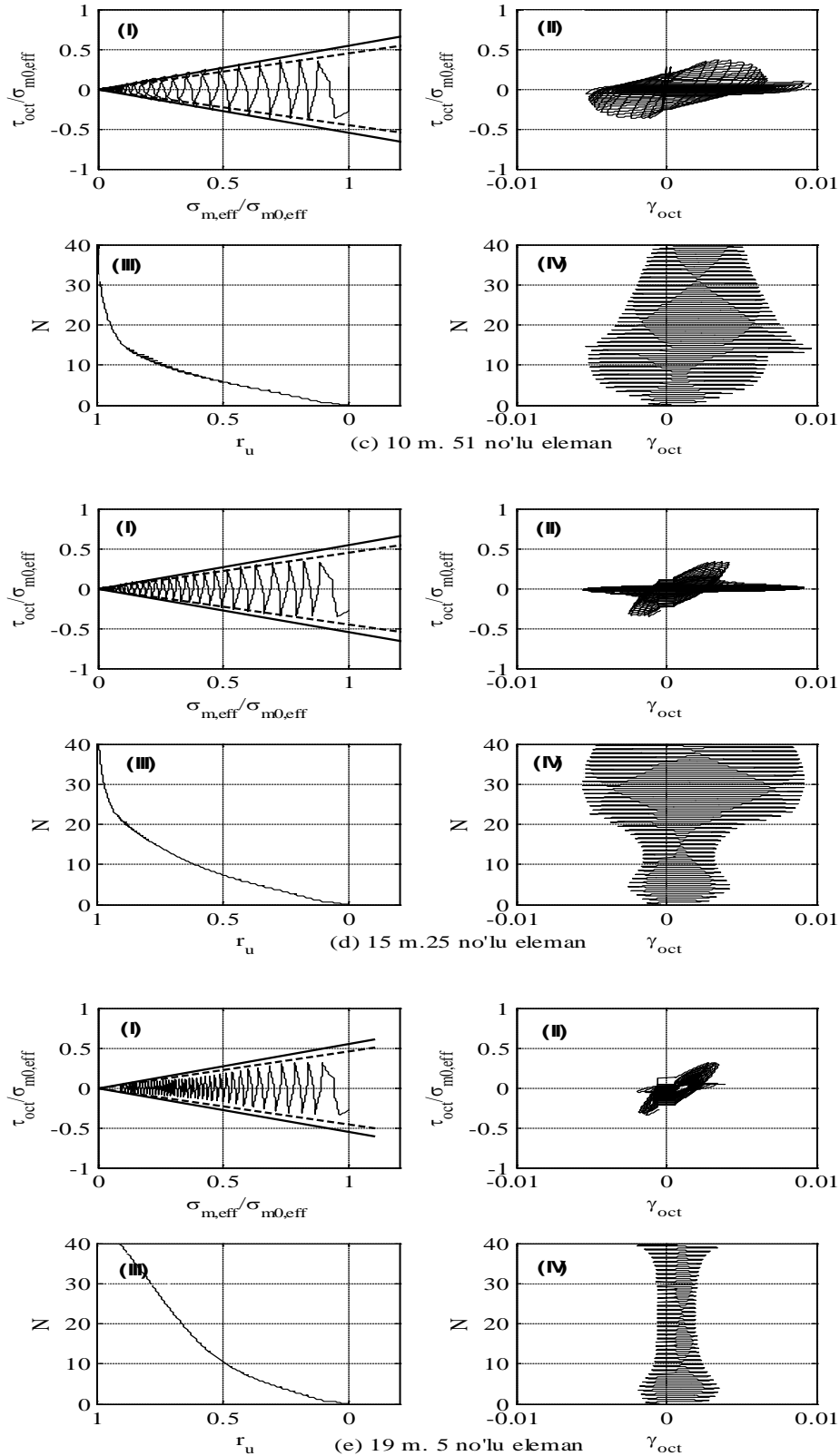
7.2. Zemin Yüzeyi 3° Eğimli Olan Suya Doygun Orta Sıkı Kum Durumu

Zemin yüzeyinin 3° eğimli olduğu durumda, profil tabanındaki 1 ve 2 nolu düğüm noktalarında x yönünde, genliği 1 m/sn^2 (0.1 g), frekansı 1 Hz. ve süresi 40 sn olan sinusoidal yatay ivme uygulanarak gerçekleştirilen bir boyutlu zemin tepkisi analizlerinde, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, ve 19 m derinliklerinde sırası ile 96, 76, 51, 25 ve 5 nolu elemanlardaki normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (I), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (II), boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (III), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı (IV) ilişkileri Şekil 15'de verilmiştir.

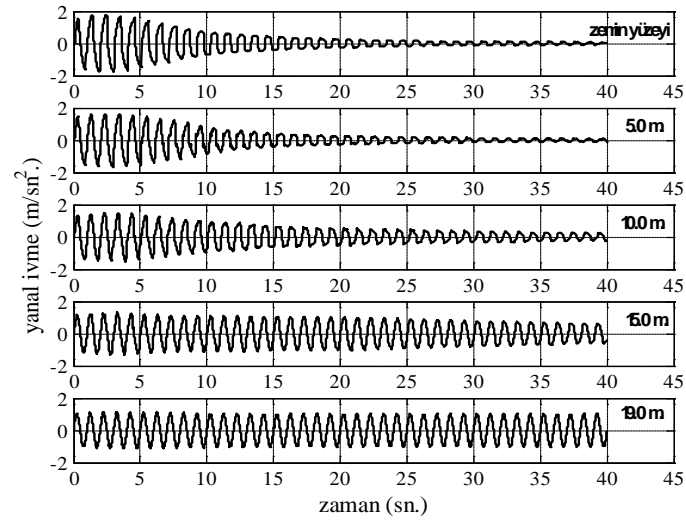
Şekil 15'de farklı derinliklerdeki boşluk suyu basıncı oranlarının çevrim sayısına göre değişimleri (III) incelendiğinde, yaklaşık olarak 1 m, 5 m, 10 m, 15 m'lerdeki boşluk suyu basıncı oranlarının sırası ile 18 çevrim (18sn), 20 çevrim (20 sn), 30 çevrim (30 sn), 40 çevrim (40 sn)'de 1 değerine ulaşmış olduğu ($r_u=1$) görülmektedir. 19 m'de ise boşluk suyu basıncı oranı yükleme sonunda 0.8 civarındadır. Dolayısı ile zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 18-19 m derinliğine kadar sıvılaşmanın meydana geldiğini söylemek mümkündür. Şekil 15'deki normalize edilmiş efektif gerilme izleri (I no'lu şekiller) incelendiğinde, sıvılaşma sonrasında, özellikle 15 m'ye kadar olan derinliklerde, belirgin bir çevrimsel hareketlilik davranışının meydana geldiği görülmektedir. Bu davranış, 3°'lik eğimin yarattığı statik kayma gerilmeleri yönünde bir yanal hareketin oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile yükleme sonunda özellikle 5-10 m arası derinliklerde kayma birim

şekil değiştirmeleri % 60 değerine kadar ulaşmıştır (Şekil 15 IV no'lu şekiller). Farklı derinliklerdeki yanal ivme, yanal yerdeğiştirme ve boşluk suyu basıncı oranlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 16a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 16a ve c'de özellikle boşluk suyu basıncı oranının 1'e yaklaşması ile birlikte yanal ivme değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. Şekil 16b'de zemin yüzeyindeki maksimum yanal yerdeğiştirme değerinin 5 m civarında olduğu görülmektedir.

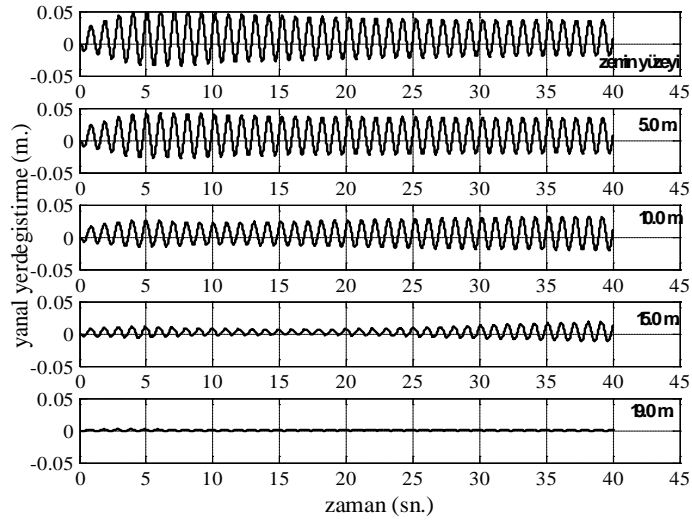




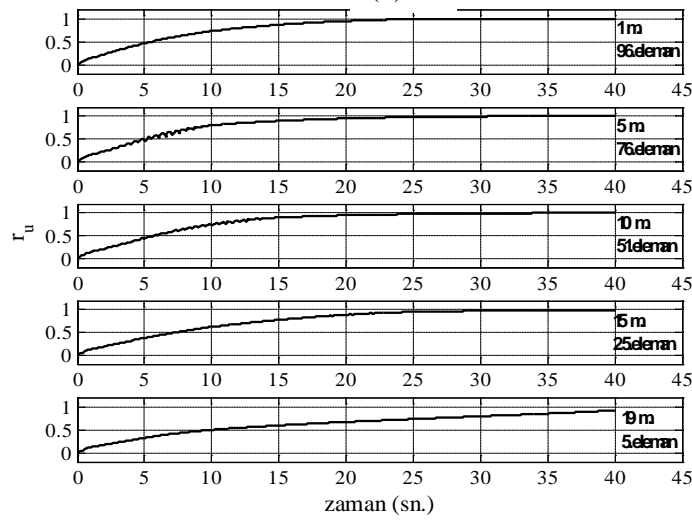
Şekil 13. Orta sıkı kum ve yatay zemin yüzeyi durumunda yaklaşık olarak (a) 1 m 96 nolu (b) 5 m 76 nolu (c) 10 m 51 nolu (d) 15 m 25 nolu (e) 19 m 5 nolu elemanlardaki (I) normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (II) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (III) boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı, (IV) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı ilişkileri



(a)

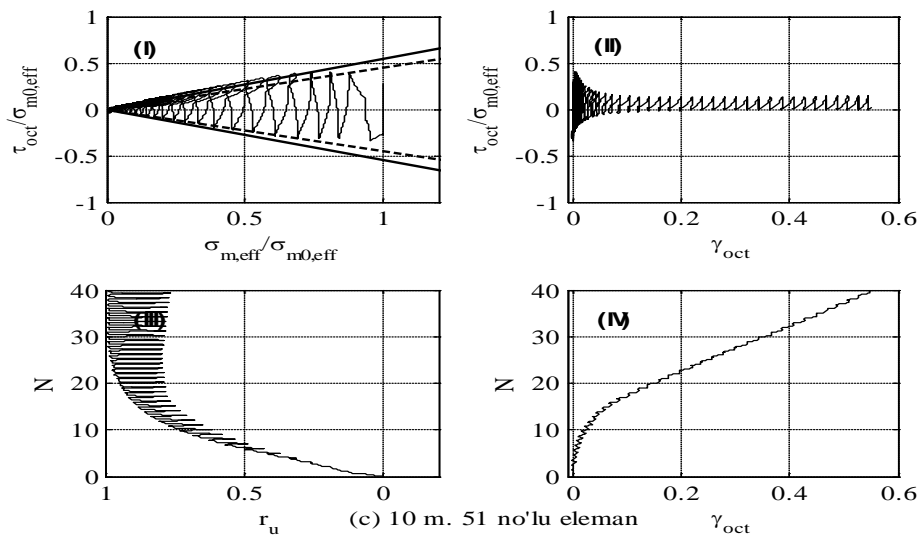
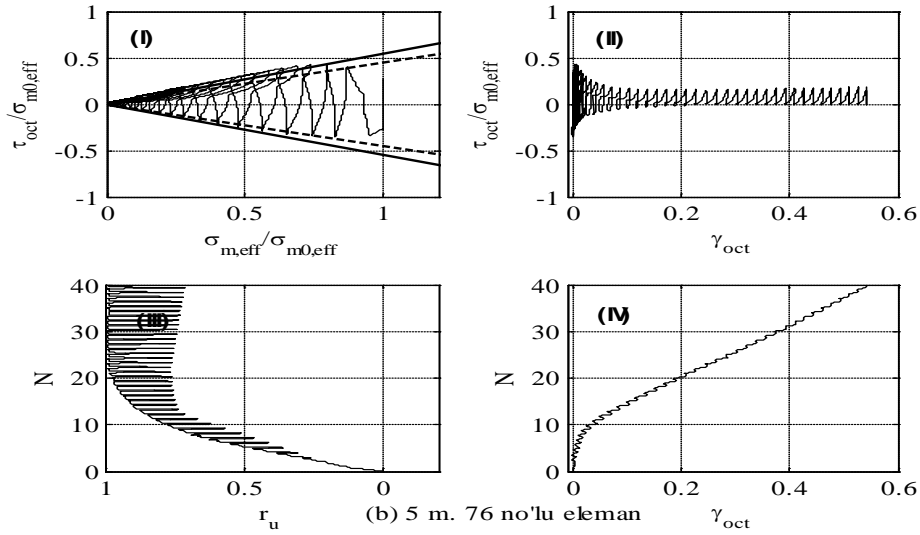
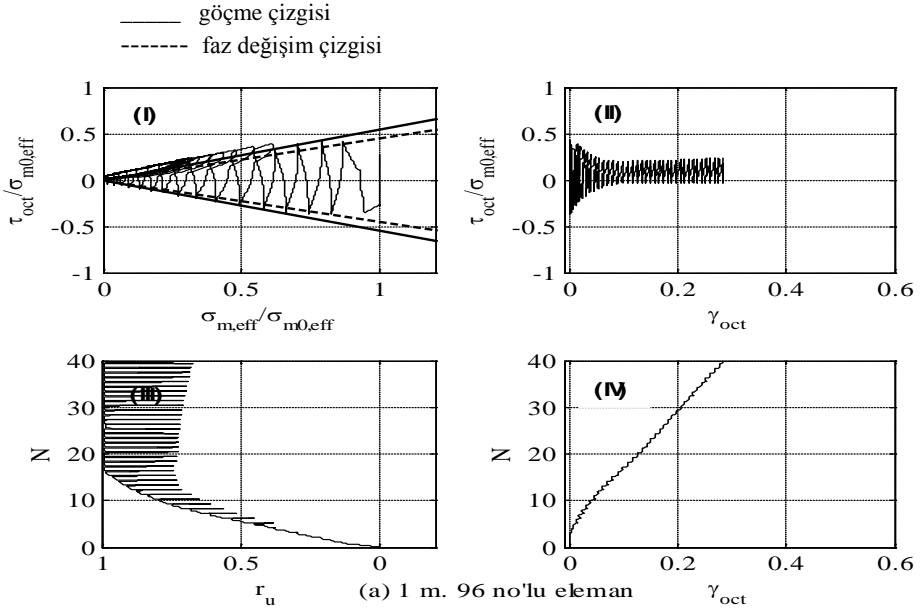


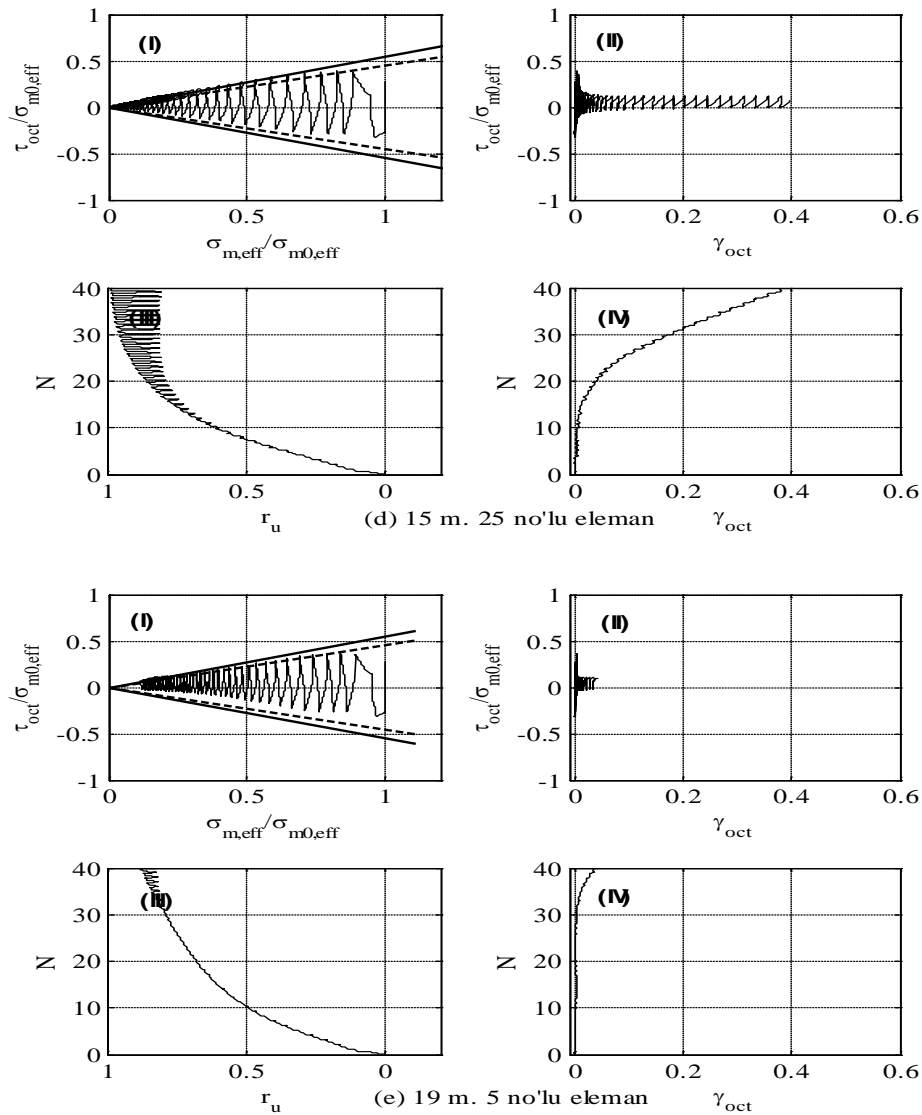
(b)



(c)

Şekil 14. Orta sıkı kum ve yatay zemin yüzeyi durumunda, zemin yüzeyi, 5 m, 10 m, 15 m ve 19 m derinliklerindeki (a) yanal ivmenin zamana göre, (b) yanal yerdeğiştirmenin zamana göre (c) boşluk suyu basıncı oranının (r_u) zamana göre değişimleri



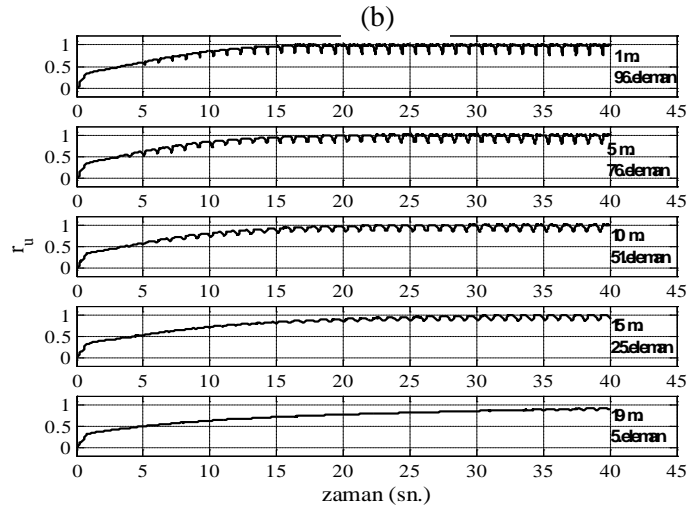
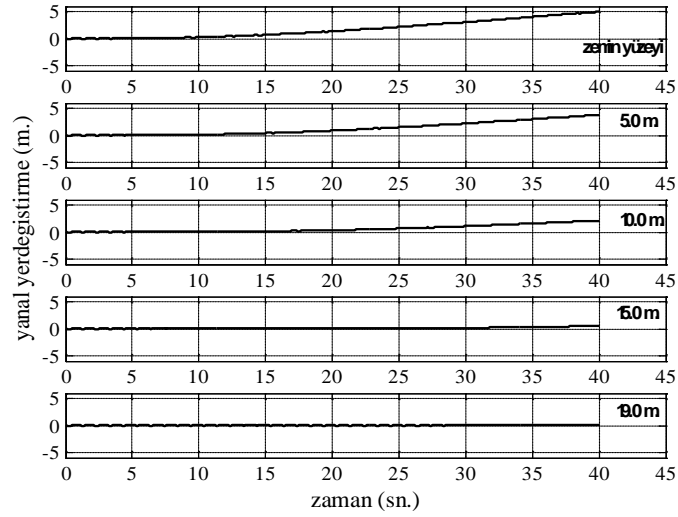
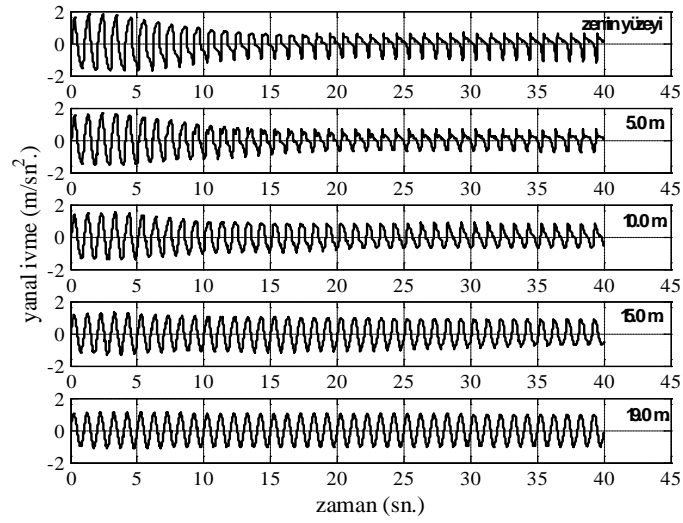


Şekil 15. Orta sıkı kum ve 3° eğimli zemin yüzeyi durumunda yaklaşık olarak (a) 1 m 96 nolu (b) 5 m 76 nolu (c) 10 m 51 nolu (d) 15 m 25 nolu (e) 19 m 5 nolu elemanlardaki (I) normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (II) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (III) boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı, (IV) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı ilişkileri

7.3. Zemin Yüzeyi 3° Eğimli Olan Suyu Doygun Çok Sıkı Kum Durumu

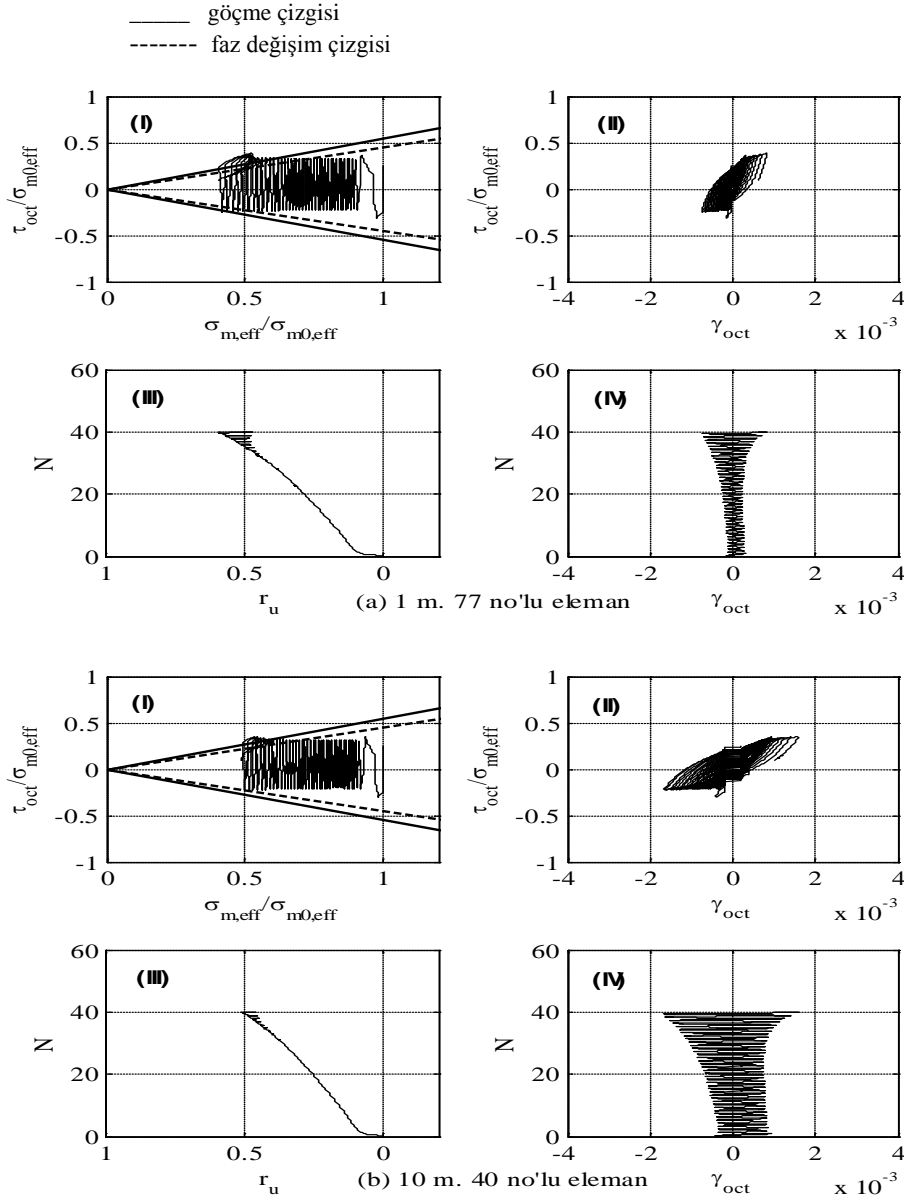
Çok sıkı kum durumunda sonlu eleman analizleri, 3° eğimli zemin yüzeyi için iki grup şeklinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta genliği 1 m/sn^2 (0.1 g), frekansı 1 Hz ve süresi 40 sn olan, ikinci grupta ise genliği 3 m/sn^2 (0.3 g), frekansı 1 Hz ve süresi 20 sn olan sinusoidal yatay ivmeler kullanılmıştır.

Birinci grup analizlerde, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 1 m, ve 10 m derinliklerinde sırası ile 77 ve 40 nolu elemanlardaki normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (I), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi (II), boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (III), oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı (IV) ilişkileri Şekil 17'de verilmiştir.

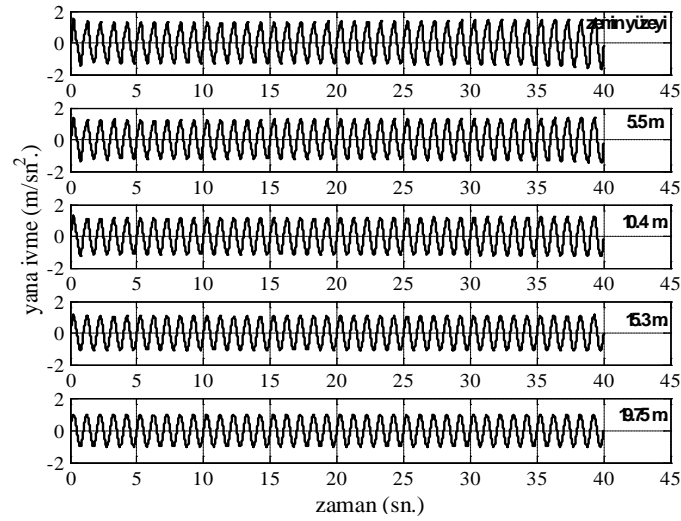


Şekil 16. Orta sıkı kum ve 3° eğimli zemin yüzeyi durumunda, zemin yüzeyi, 5 m, 10 m, 15 m ve 19 m derinliklerindeki (a) yan al ivmenin zamana göre, (b) yan al yerdeğiştirmenin zamana göre (c) boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimleri

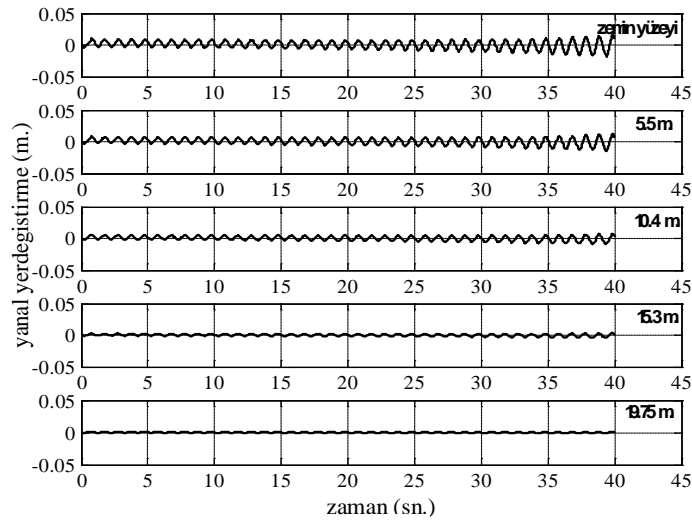
Şekil 17 (III) incelendiğinde, 1 ve 10 m'lerdeki boşluk suyu basıncı oranlarının tekrarlı yüklemeye sonunda ancak 0.5 değerinde ulaştığı ve dolayısı ile çok sıkı kum tabakasında sıvılaşmanın meydana gelmediğini söylemek mümkündür. Ayrıca tabaka içinde kayma deformasyonları yaklaşık olarak 0.002 değerinin altında seyretmektedir (Şekil 17). Farklı derinliklerdeki yanal ivme değerlerinin zamana göre değişimleri (Şekil 18a) incelendiğinde, ivme genliklerinin sabit değerlerde seyrettiği gözlenmektedir. Bu veri daha henüz belirgin bir rijitlik kaybının ve dolayısı ile sıvılaşmanın meydana gelmediğini desteklemektedir. Yüklemeye sonunda zemin yüzeyindeki maksimum yanal yerdeğiştirme miktarı yaklaşık olarak 2.5 cm'dir. (Şekil 18b).



Şekil 17. Birinci grup yüklemeye altındaki çok sıkı kum durumunda yaklaşık olarak (a) 1 m 77 nolu ve (b) 10 m 40 nolu elemanlardaki (I) normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (II) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (III) boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı, (IV) oktahedral kayma birim şekil değiştirmesi-çevrim sayısı ilişkileri



(a)

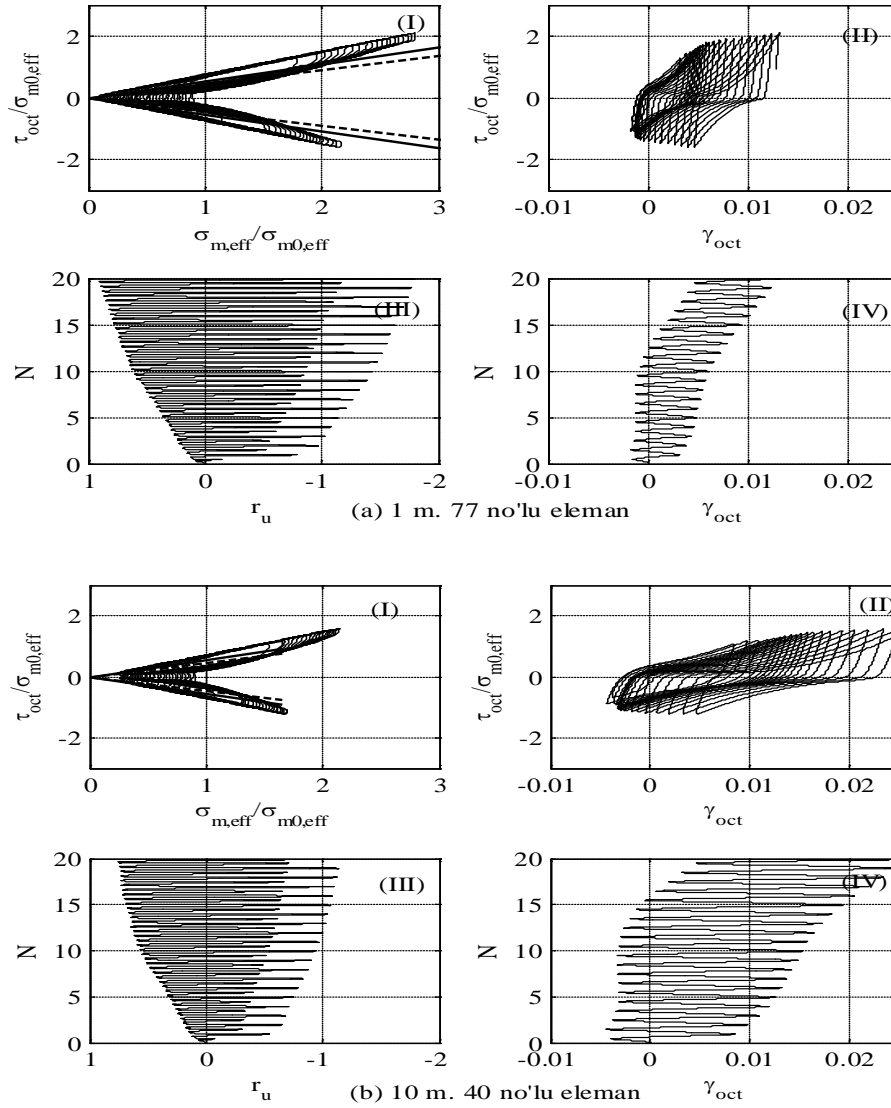


(b)

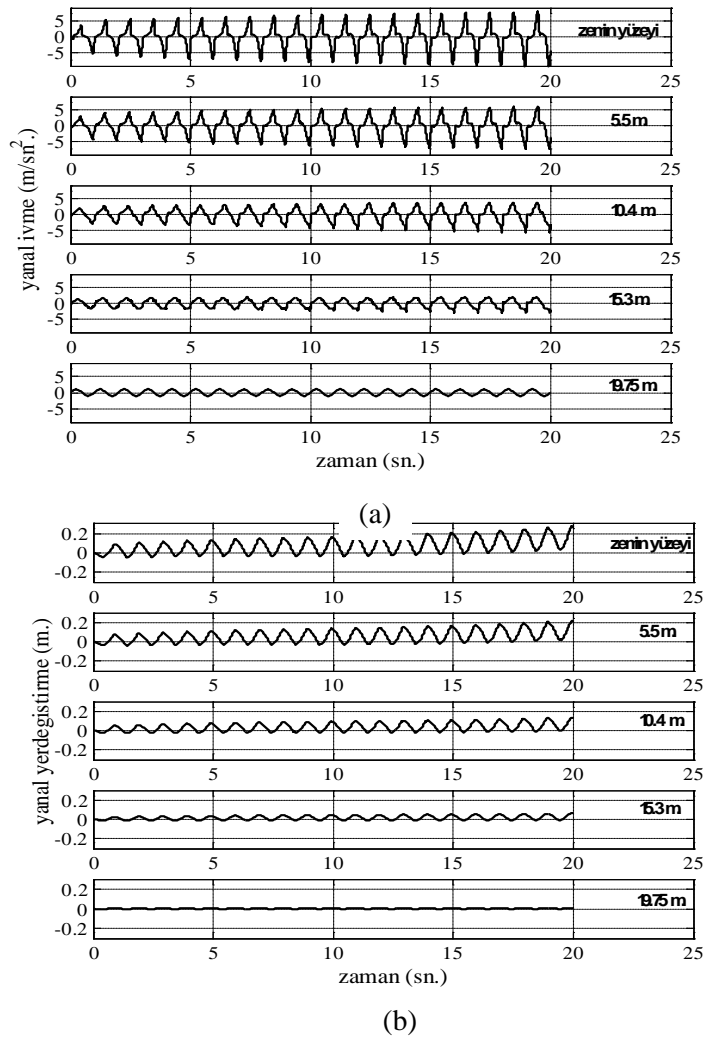
Şekil 18. Birinci grup yükleme altındaki çok sıkı kum durumunda, zemin yüzeyi, 5.5 m, 10.4 m, 15.3 m ve 19.75 m derinliklerindeki (a) yanıl ivmenin zamana göre, (b) yanıl yerdeğiştirmenin zamana göre değışimleri

İkinci grup analizlerde, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 1 m, ve 10 m derinliklerinde sırası ile 77 ve 40 nolu elemanlarda gözlenen tekrarlı yükler altındaki davranış Şekil 19’de verilmiştir. 1 ve 10 m’lerdeki efektif gerilme izleri (I) ve boşluk suyu basıncı oranlarının çevrim sayısı ile değışimleri (III) incelendiğinde, belirgin bir çevrimsel hareketlilik davranışının meydana geldiği görülmektedir. Özellikle, boşluk suyu basıncı oranlarındaki keskin sıçramalar çevrimsel hareketlilik davranışının bir sonucudur. Belirtilen derinliklerdeki normalize edilmiş oktahedral kayma deformasyonu-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi ilişkilerinde ise (II) faz transformasyon çizgisinden geçişler sırasında meydana gelen kayma deformasyonlarının ardından hacim artışı eğilimine bağlı olarak kayma dayanımı ve rijitlik artışlarının meydana geldiği gözlenmektedir. Tekrarlı yükleme genliğinin 0.3 g değerine yükselmesi ile birlikte maksimum yanıl zemin yerdeğiştirmeleri zemin yüzeyinde 25 cm değerine kadar ulaşmıştır. Zemin yüzeyindeki ivme değerlerinde gözlenen artışlar, zemin rijitliğinin arttığını ifade etmektedir (Şekil 20). Bu

durum dinamik yükler altındaki çok sıkı suya doymun kumlarda bile çevrimsel hareketlilik davranışına bağlı yüksek yanal yerdeğiştirmelerin meydana gelebileceğini göstermektedir.



Şekil 19. İkinci grup yükleme altındaki çok sıkı kum durumunda yaklaşık olarak (a) 1 m 77 nolu ve (b) 10 m 40 nolu elemanlardaki (I) normalize edilmiş ortalama efektif gerilme-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (II) oktahedral kayma birim şekil değıştirmesi-normalize edilmiş oktahedral kayma gerilmesi, (III) boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı, (IV) oktahedral kayma birim şekil değıştirmesi-çevrim sayısı ilişkileri



Şekil 20. İkinci grup yükleme altındaki çok sıkı kum durumunda, zemin yüzeyi, 5.5 m, 10.4 m, 15.3 m ve 19.75 m derinliklerindeki (a) yanal ivmenin zamana göre, (b) yanal yerdeğiştirmenin zamana göre değişimleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çevrimsel hareketlilik, dinamik yükler altındaki suya doymuş kum zeminlerde, sıvılaşma meydana geldikten sonra yanal deformasyonların birikmesi sonucunda yüksek düzeylerde yanal yerdeğiştirmelerin olduğu bir dinamik zemin davranışıdır. Bu çalışmada, çevrimsel hareketlilik davranışının oluşum sürecini sayısal olarak ortaya koymak amacı ile sinüzoidal yer ivmesi altında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda sayısal analiz yöntemi olarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi, çevrimsel hareketlilik davranışının temsil edilebilmesi için de PDMY (Pressure Dependent Multi-Yield Surface) plastisite modeli kullanılmıştır. Analizler OPENSEES sonlu eleman açık kod ortamında gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel hareketliliğe bağlı yanal deformasyonların oluşabilmesi için, suya doymuş kum zeminin, sıvılaştıktan sonra hacim artışı eğilimi geliştirebilmesi gerekmektedir. Kum zeminin sıklığı, başlangıç efektif gerilme durumu, dinamik yükleme öncesinde maruz kaldığı statik kayma gerilmeleri, rezidüel kayma dayanımı ile dinamik yüklemenin süresi, frekansı ve genliği bu davranışın oluşmasında büyük ölçüde etkili olan parametrelerdir. Çalışma kapsamında orta sıkı ($D_r = \% 35 - \% 65$) ve çok sıkı ($D_r = \% 65 - \% 85$) kum zeminleri için yapılmış çalışmalarda, çevrimsel hareketlilik davranışının oluşum sürecini sayısal olarak ortaya koymak amacı ile sinüzoidal yer ivmesi altında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda sayısal analiz yöntemi olarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi, çevrimsel hareketlilik davranışının temsil edilebilmesi için de PDMY (Pressure Dependent Multi-Yield Surface) plastisite modeli kullanılmıştır. Analizler OPENSEES sonlu eleman açık kod ortamında gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel hareketliliğe bağlı yanal deformasyonların oluşabilmesi için, suya doymuş kum zeminin, sıvılaştıktan sonra hacim artışı eğilimi geliştirebilmesi gerekmektedir. Kum zeminin sıklığı, başlangıç efektif gerilme durumu, dinamik yüklemenin süresi, frekansı ve genliği bu davranışın oluşmasında büyük ölçüde etkili olan parametrelerdir. Çalışma kapsamında orta sıkı ($D_r = \% 35 - \% 65$) ve çok sıkı ($D_r = \% 65 - \% 85$) kum zeminleri için yapılmış çalışmalarda, çevrimsel hareketlilik davranışının oluşum sürecini sayısal olarak ortaya koymak amacı ile sinüzoidal yer ivmesi altında bir boyutlu zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir.

85-% 100) ve derinliği 20 m olan suya doymuş kum zemin profillerinde gerçekleştirilen analizlerde, yatay zemin yüzeyi ile hafif eğimli (3°) zemin yüzeyi durumları için çevrimsel hareketlilik davranışının gelişimi sayısal olarak izlenmiştir.

Orta sıkı kum durumundaki bir boyutlu zemin tepkisi analizleri, genliği 0.1 g, frekansı 1 Hz ve süresi 40 sn olan ve yatay yönde tekrarlı olarak uygulanan yer ivmesi altında gerçekleştirilmiştir. Yatay zemin yüzeyi durumunda, kum tabakasının tümünün sıvılaştığını söylemek mümkündür. Ancak sıvılaşmanın meydana geldiği andaki kayma deformasyonları (<0.01) çevrimsel hareketlilik davranışının başlaması için yeterli olamamıştır. Sıvılaşma nedeni ile tüm derinliklerde zamana bağlı olarak meydana gelen boşluk suyu basıncı azalmaları, yanal ivme değerlerinin de azalmasına neden olmuştur. Ayrıca tekrarlı yükleme sonunda, zemin yüzeyinde yaklaşık olarak 5 cm. yanal yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 3° eğimli suya doymuş orta sıkı kum tabakası durumunda ise, dinamik yükleme öncesinde statik durumda mevcut bulunan kayma gerilmelerine bağlı olarak ilk sıvılaşmanın olduğu andaki kayma deformasyonları oldukça yüksek değerlere ulaşarak çevrimsel hareketlilik davranışının oluşumuna zemin hazırlamış ve bu davranışa bağlı kayma deformasyonlar (0.2-0.6) tekrarlı yükleme sonuna kadar artarak devam etmiştir. Kayma deformasyonlarının yönü statik kayma gerilmeleri yönünde olup çevrimsel hareketlilik sonucu zemin yüzeyinde yaklaşık olarak 5 m. yanal yerdeğiştirme meydana gelmiştir.

3° eğimli suya doymuş çok sıkı kum zemin profilinde, genliği 0.1 g, frekansı 1 Hz ve süresi 40 sn olan tekrarlı yanal ivme altında gerçekleştirilen analizlerde, yükleme sonundaki boşluk suyu basıncı oranının tüm tabaka boyunca en fazla 0.5 değerine ulaşması nedeni ile sıvılaşmanın meydana gelmediğini söylemek mümkündür. Ayrıca, kayma deformasyonları 0.002 değerinin altında seyretmiştir. Öte yandan, genliği 0.3g, frekansı 1 Hz ve süresi 20 sn olan bir tekrarlı ivme altında, belirgin bir çevrimsel hareketlilik davranışı meydana gelmiştir. Tekrarlı yükleme genliğinin 0.3 g değerine yükselmesi ile birlikte maksimum yanal zemin yerdeğiştirmeleri zemin yüzeyinde 25 cm değerine kadar ulaşmıştır. Bu durum dinamik yükler altındaki çok sıkı suya doymuş kumlarda bile çevrimsel hareketlilik davranışına bağlı yüksek yanal yerdeğiştirmelerin meydana gelebileceğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, düzlem deformasyon dörtgen elemanların PDMY modeli ile birlikte kullanımı, dinamik yükleme süresince zemin ortamındaki boşluk suyu basıncı değişimlerine bağlı olarak meydana gelecek olan yanal yerdeğiştirmelerin belirlenmesine olanak vermektedir. Ancak dinamik yükleme sonrasında boşluk suyu basıncının sönmelenmesi nedeni ile oluşan düşey yöndeki yerdeğiştirmelerinin de belirlenebilmesi için u-p elemanlarının kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- K. Arulanandan, R. F. Scott ed. (1994): "Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems", Cilt 1-2.
- J. P. Bardet, N. Mace, T. Tobita (1999): "Liquefaction-Induced Ground Deformation and Failure", Rapor PEER/PG&E, Task 4A-Faz 1, Southern California Üniversitesi.
- L. C. Baynes (2005): "An Evaluation of Free Field Liquefaction Analysis Using Opensees", Yüksek Lisans Tezi, Washington Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Müh. Bölümü.
- L. F. Bonilla, R. J. Archuleta, D. Lavalley (2005): "Hysteretic and Dilatant Behaviour of Cohesionless Soils and their Effects on Nonlinear Site Response: Field Data Observations and Modelling", Bulletin of the American Society of America, Cilt 95, No. 6, sf. 2373-2395.
- H. G. Cooke (2000): "Ground Improvement For Liquefaction Mitigation At Existing Highway Bridges", Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State Üniversitesi.

- A. Elgamal, Z Yang, E. Parra (2002): "Computational Modeling of Cyclic Mobility and Post-Liquefaction Site Response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 22, sf. 259-271.
- A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra, A. Ragheb (2003): "Modeling of Cyclic Mobility in Saturated Cohesionless Soils", *International Journal of Plasticity*, Cilt 19, sf. 883-905.
- S. Iai, Y. Matsunaga, T. Kameoka (1990): "Strain Space Plasticity Model For Cyclic Mobility", *Port and Harbour Research Institute Raporu*, Cilt 29, No. 4.
- S. Iai (1991): "A Strain Space Multiple Mechanism Model for Cyclic Behaviour of Sand and its Application", *Earthquake Engineering Research Note*, No:43, Earthquake Engineering Research Group Port And Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.
- S. L. Kramer, A. Elgamal (2001): "Modelling Soil Liquefaction Hazards for Performance-Based Earthquake Engineering", *PEER Raporu 2001/13*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, California Üniversitesi.
- S. L. Kramer (1996): "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey.
- R. L. Kuhlmeyer, J. Lysmer (1973): "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of the Soil Mech. and Foundation Division*, Cilt 99, No. 5, sf. 421-427.
- S. Lenart (2008): "The Response of Saturated Soils To A Dynamic Load", *Acta Geotechnica Slovenica*, No. 1.
- S. Mazzoni, F. Mc Kenna, G. L. Fenves (2004): "OpenSees Command Language Manual in Preparation", *OpenSees and NEESgrid Simulation Component User Workshop*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Richmond, CA., Pacific Earthquake Engineering Research Center Web Site, <http://opensees.berkeley.edu>.
- W. F. Marcuson, M. Hynes, A. G. Franklin (2007): "Seismic Analysis and Analysis of Embankment Dams: The State of Practice", *The Donald M. Bermister Lecture*, The Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia Üniversitesi.
- E. Naesgaard, P. M. Byrne (2007): "Flow Liquefaction Simulation Using A Combined Effective Stress-Total Stress Model", *60th. Canadian Geotechnical Conference*, Canadian Geotechnical Society, Ottawa, Ontario.
- M. Y. Özkan (1998): "A Review of Considerations on Seismic Safety of Embankments and Earth and Rock-Fill Dams", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 17, sf. 439-458.
- E. Parra, (1996): "Numerical Modelling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems", *Doktora Tezi*, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- T. Sano (1916): "Aseismic Design of Buildings (I)", *Report of Earthquake Disaster Prevention Investigation Council*, 83A.
- R. B. Seed, K. O. Çetin, R. Moss, A. Kammerer, J. Wu, M. Pestana, M. F. Riemer, R. B. Sancio, J. D. Bray, R. E. Kayen, A. Faris (2003) "Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering-A Unified and Consistent Framework", *26. Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation*, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California.
- I. M. Smith (1994): "An Overview of Numerical Procedures Used in the VELACS Project", *Proc. Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*, Cilt 2, sf. 1321-1328.
- M. Taiebat, H: Shahir, A. Pak (2007): "Study of Pore Pressure Variation During Liquefaction Using Two Constitutive Models For Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 27, No.1, sf. 60-72.
- M. Tonaroğlu (2006): "Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi", *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- I. Towhata (2005): “Development of Geotechnical Earthquake Engineering In Japan”, Heritage Lecture, 16. ICSMGE, Osaka, Japan.
- Z. Yang, A. Elgamal, E. Parra (2003): “A Computational Model for Liquefaction and Associated Shear Deformation”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Cilt 129, No. 12.
- Z. Yang (2000): “Numerical Modeling of Earthquake Site Response Including Dilation and Liquefaction”, Doktora Tezi, Columbia Üniversitesi.