



SEISMIC RESPONSE OF SATURATED SAND DEPOSITS WITH SILT INTERLAYERS

Murat TONAROĞLU^{1*}, S. Ümit DİKMEN²

¹*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL*

²*İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Ataköy-İSTANBUL*

Received/Geliş: 11.03.2011 Accepted/Kabul: 30.04.2011

ABSTRACT

The saturated loose fine sands are known to be the soil with the highest susceptibility to liquefaction under cyclic loads such as earthquakes. Yet, both the laboratory studies and the field observations after various earthquakes have indicated ground conditions with silt inclusions or silt layers without plastic characteristics can also have high risk of liquefaction. In this respect, in this study the effect of the existence of silt interlayers in the saturated sand deposits with different relative density has been investigated parametrically through the use of the LASS-IV code, capable to perform effective stress analysis.

Keywords: Silt interlayers, saturated sand deposits, liquefaction, seismic loading.

SİLT ARA TABAKALI KUM ZEMİNLERİN SİSMİK DAVRANIŞI

ÖZET

Suya doymun gevşek ince kuamların deprem gibi titreşimli bir yük etkisi altında sıvılaşma riski en yüksek zeminler olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, gerek laboratuvar çalışmaları gerekse çeşitli depremler sonrası yerinde yapılan arazi gözlemleri neticesinde, plastik özellik taşımayan ve /veya plastisitesi düşük silt içerikli ve/veya silt ara tabakalı zemin koşullarında da sıvılaşma riski olabileceği görülmüştür. Bu amaçla, bu çalışmada efektif gerilme analizi yapabilen LASS IV bilgisayar yazılımı kullanılarak, farklı sıklık derecesine sahip suya doymun kum zeminlerde silt ara tabakası bulunması durumunun, zeminin sıvılaşma potansiyelini etkilemesi parametrik olarak incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Silt ara tabakaları, suya doymun kum zeminler, sıvılaşma, sismik yükler.

1. GİRİŞ

Deprem etkisi nedeniyle zeminlerde çeşitli problemler meydana gelmektedir. Bunlar arasında belki de en önemlisi olarak sıvılaşma gösterilebilir. Sıvılaşma, suya doymun kohezyonsuz zeminlerin, deprem gibi titreşimli bir yük etkisi altında kalması durumunda, boşluklardaki suyun drene olmak için yeterli zamanı bulamaması nedeniyle boşluk suyu basıncının hızla artması ve çevre basıncına eşit hale gelmesi durumunda efektif gerilmenin sıfır olması durumu olarak tanımlanmaktadır. Sıvılaşma nedeniyle zeminlerde kum fişkrması, taşıma gücü kaybı, aşırı ve/veya farklı oturma ve şev kayması gibi çok çeşitli problemler meydana gelebilmektedir.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: tonar@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 52 30

Bu nedenle sıvılaşma etkilerinin ilk olarak fark edilmeye başlandığı 1960'lı yıllardan bu yana bir çok araştırmacı konu üzerinde çalışmıştır. Bu konudaki araştırmaların ilk aşamalarında sıvılaşma riskinin sadece gevşek ince kumlarda meydana geldiği düşünülmüştür. Ne var ki, 1971 San Fernando, 1976 Tangshan, 1985 Chile, 1987 Superstition Hills, 1989 Loma Prieta, 1994 Northridge, 1999 Chi Chi, 1999 Gölcük depremleri gibi çeşitli depremler sonrası yapılan arazi gözlemleri ve konu üzerinde gerçekleştirilen çeşitli laboratuvar çalışmaları, kum zemin içerisinde plastik özellik taşımayan ve/veya düşük plastisiteli silt içeriği ve/veya silt ara tabakası bulunması durumunun, sıvılaşma riski üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir.

Bu deneysel çalışmalar arasında en dikkat çekici olanları arasında gösterilebilecek olan Erken ve Ansal tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek plastisiteli silt içeren kumlu zeminlerin düşük plastisiteli silt içerikli kumlu zeminlere göre sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu gösterilmiştir [1]. Benzer bir başka çalışmada, Kokusho tarafından laboratuvarda gerçekleştirilen 1 ve 2 yönlü sarsma tablası deneylerinde, zemin profilinde silt tabakası bulunması durumunda silt tabakasının altında ince bir su tabakası oluştuğu ve bu durumun özellikle yatay yüzeyli olmayan zeminlerde gerek sıvılaşmanın meydana gelme süresi gerekse oluşacak yanal deformasyonun yaygınlığı üzerinde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [2]. Konuyla ilgili bir başka deneysel çalışmada, Tohumcu vd. kum tabakası içerisinde yer alan silt ara tabakası altında ince bir su filmi meydana geldiğini gözlemlemiştir [3]. Bu nedenle, çevrimli bir yüklem etkisi altında, içerisinde bulunduğu zeminin sahip olduğu geçirimsizlikten daha düşük bir geçirimsizliğe sahip, düşük plastisiteli ve/veya plastik özellik taşımayan bir silt tabakasının varlığının suyun hareketini zorlaştırdığı, bunun sonucu olarak artık boşluk suyu basıncının arttığı ve bu durumun sıvılaşma üzerinde önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

Silt tabakası varlığının sıvılaşma üzerindeki etkisi ile ilgili olarak önemli arazi gözlemleri de vardır. Bray vd. tarafından yapılan çalışmalarda, Adapazarı'ndaki bir çok yapının, sıvılaşma nedeniyle düşeyden saporak yana yattığı, hasar gördüğü veya çöktüğü gözlemlenmiş ve oluşan sıvılaşma üzerinde zemindeki silt ara tabakaların varlığının önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır [4]. Ishihara madenlerden çıkan artıkların biriktirildiği barajlarda plastik özellik taşımayan silt varlığının sıvılaşmaya neden olduğunu öne sürmüştür [5]. Youd ve Holzer ile Youd ve Bartlett ise Superstition Hills depremi sırasında, Wildlife Sıvılaşma Arazi'sinde yer alan (Wildlife Liquefaction Array) siltli kumlu zeminlerin sıvılaşması sonucu zemin yüzünde kum koniler - çatlaklar ve yanal zemin hareketleri meydana geldiğini gözlemlemiştir [6, 7].

Bu çalışmanın amacı silt ara tabakalı suya doymuş kum zeminlerin analitik olarak sismik davranışının incelenmesidir. Bu amaçla değişik derinliklerde silt tabakası bulunduğu düşünülen parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. ANALİZ YÖNTEMİ

Zemin içindeki bütün değişikliklerin efektif gerilme değişimleri nedeniyle meydana geldiği, efektif gerilme değişimlerinin ise zeminin boşluklarında yer alan suyun basınç değişimlerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Benzer şekilde, sıvılaşma oluşum mekanizmasını tetikleyen en önemli faktör, boşluk suyu basıncının, suyun drene olmak için yeteri kadar süre bulamaması nedeniyle hızla artması ve bunun sonucu olarak zeminin efektif gerilmesinin sıfır veya sıfıra yakın bir mertebeye gerilemesidir. Bu nedenle sahada çalışan araştırmacılar, deprem nedeniyle oluşma ihtimali olan sıvılaşma durumunu gözlemleyebilmek amacıyla, zemin içerisine çeşitli derinliklere piezometreler yerleştirilerek boşluk suyu basıncı ölçmeye çalışmaktadır. Bununla birlikte piezometreler sarsıntı etkisiyle kırılabilen, deformasyona uğrayabilen ve/veya yanlış ölçüm yapabilmektedir.

Ayrıca sıvılaşma sırası ve sonrası zeminlerde oluşan hacimsel ve kayma deformasyonlarının çarpıcı şekilde önemli mertebelere ulaşması, dolayısıyla zeminin bir sıvı gibi davranması nedeniyle oluşması muhtemel deformasyonların tahmin edilmesi, sıvılaşma üzerine yapılan çalışmalar açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, geçmiş yıllarda araştırmacılar,

tekrarlı yükler etkisi altındaki zeminlerde oluşacak gerek hacimsel gerekse kayma deformasyonlarını belirleyebilmek için çeşitli yöntemler önermişlerdir. Bu önerilerin bir kısmı doğrudan uç değerlerin hesaplanmasına yönelik geliştirilen yöntemler diğer bir kısmı da deprem süresince oluşan değerlerin hesaplanmasına yönelik bir bilgisayar yazılımını gerektiren yöntemlerdir. Hacimsel deformasyonların tahmini için geliştirilen yöntemler, ağırlıklı olarak tek boyutlu konsolidasyon teorisinden faydalanılarak geliştirilen ve klasik konsolidasyon oturması hesabında sabit yük etkisi altındaki zeminler için kullanılan sıkışma indisi (C_c) parametresinin, dinamik yükler etkisi altında nasıl hesaplanabileceğine yönelik tahminleri artık boşluk suyu basıncı oranını da kullanarak belirlemeye yönelik çalışmaları içermektedir. Doğrudan uç değerlerinin hesaplanması ile ilgili yöntemlerin geniş bir değerlendirmesi Bilge ile Çetin ve Bilge'nin yayınladıkları iki çalışmada detaylı olarak yapılmıştır [8, 9]. Diğer yandan deprem süresince oluşan değerlerin hesaplanması için eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan malzeme modelleri ile çözümler yapan yazılımlar uzun yıllardan bu yana geliştirilmiştir [10 - 16]. Bu yazılımların bir kısmı içerdikleri malzeme modellerine bağlı olarak zaman tanım alanında çözüm yaparken, bir kısmı frekans tanım alanında çözüm yapmaktadır. Bu yöntemlerin değerlendirilmesi ile ilgili yayınlar literatürde yer almaktadır [17, 18].

Bu çalışmada analizlerin yapılması için, LASS-IV yazılımı seçilmiştir [16]. Bu yazılımın tercih edilmesinin temel nedeni, LASS-IV'ün sismik yüklemeye etkisi altında doğrusal olmayan efektif gerilme analizi yapabilmesidir. Yazılım gerek hacimsel deformasyonları gerekse kayma deformasyonlarını, programın girdisi olan ve oturma hesaplarında en çok kullanılan parametrelerden bir tanesi olan hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değeri için gerekli hacimsel modül (M) ve kayma modülü (G) parametrelerinden yararlanarak çevrimli yüklemenin başlamasıyla birlikte zemin profili boyunca hesaplayabilmektedir. Zemin kayma modülünün, düşen efektif gerilmelere bağlı olarak düştüğü bilinen bir gerçektir. LASS-IV yazılımı tüm bu değişimleri dikkate aldığı için bu çalışma açısından uygun bulunmuş ve tercih edilmiştir.

Yazılımda kullanılan yöntem gereği zemin yatay alt tabakalara ayrılmakta ve sistemin hareketi nodal düzlemlerin yerdeğiştirme serbestlik dereceleri ile tanımlanmaktadır. Deprem süresince yatay olarak kaldığı ve sadece paralel yer değıştirmelere maruz kaldıkları kabulü yapılan her bir düzlem, 2 zemine ve 1 boşluk suyuna ait olmak üzere toplam 3 serbestlik derecesine sahiptir. Bu duruma karşılık gelen gerilmeler, düşey normal gerilme (σ), yatay kayma gerilmesi (τ) ve boşluk suyu basıncıdır (u). Yöntem, çevrimli yükler altında, kumlu zeminlerdeki gerilme-deformasyon davranışını analiz etmek için modifiye edilmiş Masing malzeme modeli kullanılmaktadır. Yöntem içsel olarak histeretik ve boşluk suyuna bağlı iki farklı sönüm mekanizması içermektedir. Bu nedenle ayrıca bir sönüm mekanizması kullanılmamıştır [15, 16].

3. ANALİZ MODELİ

Türkiye deprem yönetmeliğinde (TDY-2007) zeminler Z1, Z2, Z3 ve Z4 olmak üzere 4 sınıfa ayrılmıştır. Z1, kayma dalgası hızı 1000 m/sn üzerinde olan sağlam kaya veya kayma dalgası hızı 700 m/sn değerinin üzerinde olan çok sıkı kum veya çok sert kil olarak tanımlanırken; Z2, kayma dalgası hızının 400-700 m/sn olduğu, 15 m den daha az kalınlıklı, sıklık derecesinin %65-85 arasında olduğu bir zemine, Z3, kayma dalgası hızının 200-400 m/sn olduğu, 15-50 m kalınlıklı, sıklık derecesinin %35-65 arasında olduğu bir zemine, Z4, ise kayma dalgası hızının 200 m/sn'den daha düşük olduğu gevşek kum veya yumuşak kil zemine karşılık gelmektedir [19]. Benzer şekilde Eurocode-8 zeminleri 5 farklı sınıfa ayırmakta (A-E) ve 2 özel koşul (S_1 ve S_2) tanımlanmaktadır [20]. İki özel koşul olarak tanımlanmış S_1 ve S_2 sınıflaştırılabilir zeminleri temsil etmektedir. A, kayma dalgası hızı 800 m/sn üzerinde olan kaya gibi bir zemin olarak tanımlanırken; B, kayma dalgası hızının 360-800 m/sn olduğu, çok sıkı kum veya çakıl veya çok sert bir kil zemine; C, kayma dalgası hızının 180-360 m/sn olduğu, oldukça derinlere kadar devam edebilen, SPT darbe sayılarının 15-50 arasında değıştiği sıkı-orta sıkı kum veya çakıl veya katı kil zemine; D, kayma dalgası hızının 180 m/sn'nin ve SPT darbe sayılarının 15'in altında

olduğu zeminlere ve E ise yüzeye yakın alüvyon tabakalarına karşılık gelmektedir. Ortalama kayma hızları ise yüzeyden itibaren 30.0 m derinliğe kadar olan tabakaların kayma hızlarının ağırlıklı ortalaması ile elde edilmektedir.

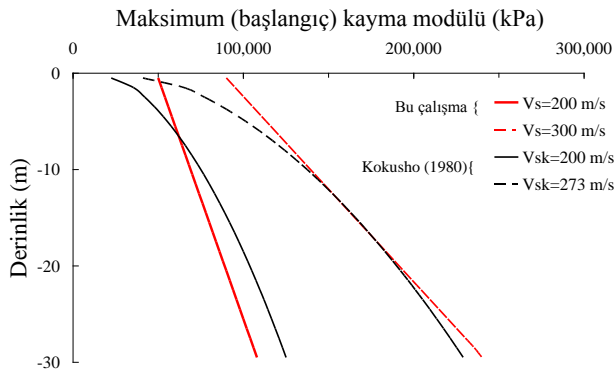
Her iki yönetmelik dikkate alındığında, TDY-2007'ye göre özellikle Z4; Eurocode-8'e göre ise özellikle D tipi zeminler sismik yükleme etkisi altında yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler olarak görülmektedir [20]. Bu nedenle, bu çalışma için, TDY-2007'ye göre Z3 veya Eurocode-8'e göre C tipi zemine uygun olarak, kayma dalgası hızları farklı, 30 m derinliğe sahip 2 adet zemin kesiti seçilmiştir. K1 ve K2 olarak adlandırılan bu kesitler Eurocode-8'e uygun olarak sırasıyla ortalama 200 m/sn ve 300 m/sn kayma dalgası hızına sahiptir. Bu kesitlerin özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Zemin Özellikleri

	K1	K2
Başlangıç kayma modülü, (kPa)	50000	90000
Derinlikle kayma modülündeki artış miktarı, (kPa)	2000	5200
Toplam birim hacim ağırlık, (kN/m ³)	20.4	20.4
Permeabilite katsayısı, (m/s)	3x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶
Başlangıç boşluk oranı	0.80	0.65
Sıklık derecesi (%)	33	58
Ortalama kayma dalgası hızı, m/sn	200	300

Tüm analizlerde, yeraltı su seviyesinin yüzeyden 1.0 m aşağıda olduğu ve kum zeminin altında ortalama 750 m/sn kayma dalgası hızına sahip bir kaya tabakası olduğu varsayılmıştır. Başlangıç kayma modülü Kokusho tarafından kumlar için önerilen aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 1) ile hesaplanmıştır [21].

$$G_0 = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0.5} \quad (1)$$

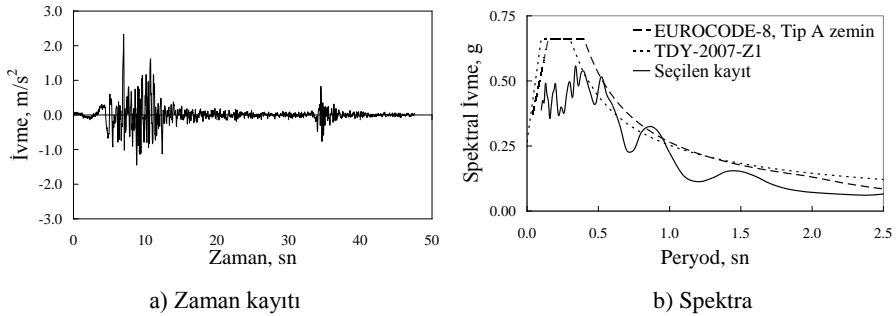


Şekil 1. Çalışmada kullanılan kayma modülü değerleri

Ayrıca elde edilen kayma modülü değerleri hem pratiklik açısından hem de özellikle zemin yüzüne yakın kesimlerde konsolidasyon meydana gelme olasılığı gözönüne alınarak linearize edilmiştir (Şekil 1).

4. ANALİZLERDE KULLANILAN DEPREM KAYDI

Çalışmada yapılacak analizler için, ESD veritabanında bulunan 1999 Gölçük depremi sırasında, depremin merkez üstünden yaklaşık 40 km uzakta bulunan Gebze'deki TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde kaydedilmiş olan ivme kaydının düzeltilmiş NS bileşeni seçilmiştir [22]. Kayıt sahasındaki zemin, B sınıfı bir zemin veya kaya olarak tanımlanmakta ve zemin koşulları TDY-2007'ye göre Z1 ve NEHRP tarafından B sınıfı bir zemin veya kaya olarak kabul edilmektedir [23]. Toplam kayıt süresi 47.62 sn olup; hesaplamalarda 0.005 sn aralıklı olarak alınmış ivme değerleri kullanılmıştır. Bu kayıta maksimum ivme 2.3339 m/s^2 'dir. Kaydın ivme-zaman değişimi Şekil 2a'da sunulmuştur. Şekil 2b'de ise, bu kaydın %5 sönüm için ivme davranış spektrumu hesaplanmış ve TDY-2007'de Z1 tipi ve Eurocode-8'de A tipi zemin için önerilen tasarım spektraları ile birlikte karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği gibi seçilen kaydın spektrumu, tasarım spektraları ile oldukça uyumludur.

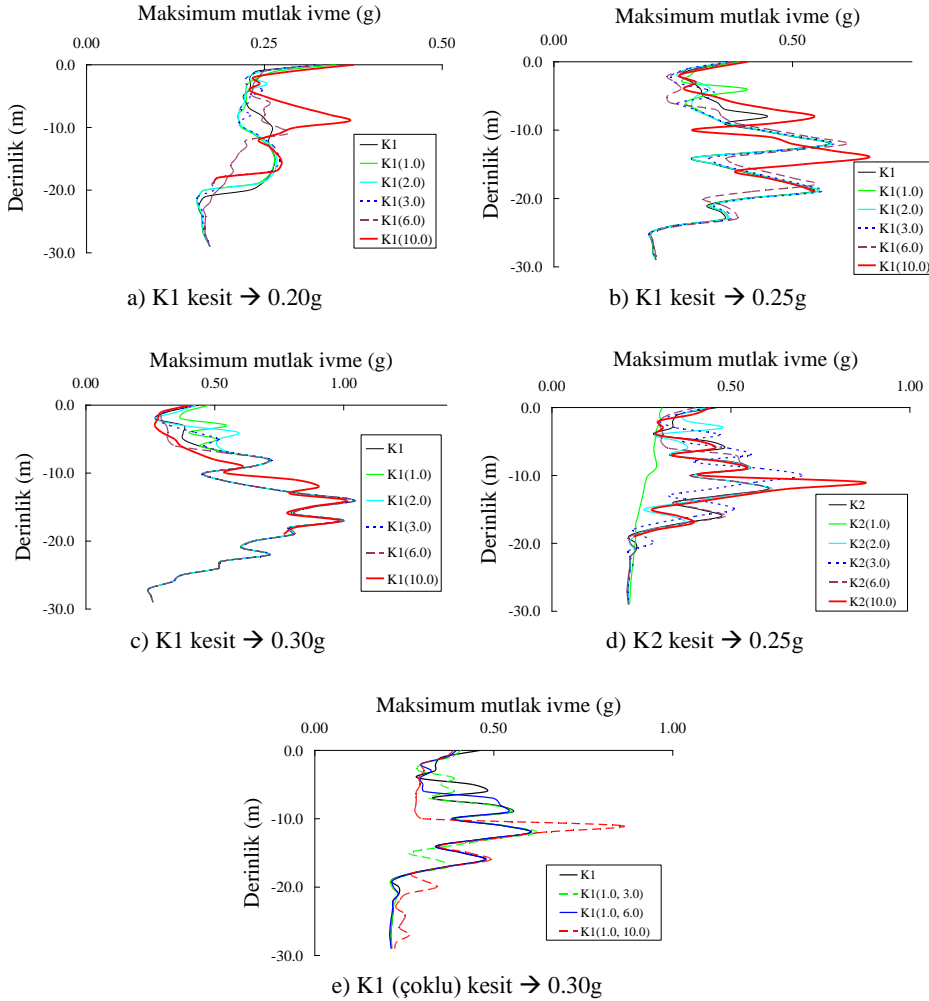


Şekil 2. Analizlerde kullanılan ivme kaydı

5. ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yukarıda da belirtildiği gibi, sismik yüklemeye maruz kalan silt ara tabakalı kum zeminlerde meydana gelebilecek sıvılaşma davranışı üzerinde silt tabakasının etkisini incelemek için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Silt ara tabakalarının kalınlığının 1.0 m; permeabilite katsayısının $3 \times 10^{-8} \text{ m/sn}$ ve kayma dalgası hızı değerinin 125 m/sn olduğu varsayılmıştır. Başlangıçta silt ara tabakası olmadan çözümler gerçekleştirilmiş; bu çözümler elde edildikten sonra zemin yüzünden itibaren 1.0m, 2.0m, 3.0m, 6.0m ve 10.0 m derinliklerde silt tabakası olduğu varsayılarak üretilen yeni profiller analiz edilmiştir. Ayrıca bir de silt ara tabakalarının çok katmanlı olması halindeki davranışın incelenmesi amacıyla ilk katmanın üst kotunun 1.0 m derinlikte olduğu ve diğer katmanın üst kotunun 3.0, 6.0 ve 10.0 m derinlikte olduğu 3 ayrı profil daha incelenmiştir. Yine tabaka kalınlıkları 1.0 m olarak kabul edilmiştir.

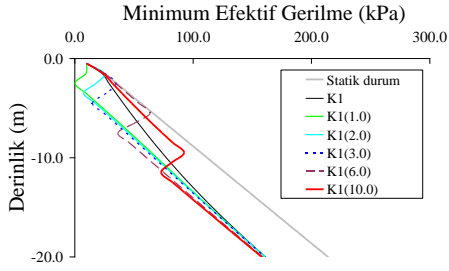
Seçilen deprem kaydının pik ivme değerleri 0.20g, 0.25g ve 0.30g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Şekil 3'te maksimum ivme değerlerinin derinlikle değişimi sunulmuştur. Şekillerde K1 ve K2 yukarıda bahsedilen kayma hızına bağlı olarak zemin kesitini, parantez içindeki değerler ise silt ara tabakasının üst kotunun yüzeyden olan mesafesini vermektedir. Çok tabakalı kesitlerde ise aynı şekilde her tabakanın üst kotunun yüzeyden olan mesafesi parantez içinde verilmiştir. Örneğin, K1 (6.0), üst kotu 6.0 m derinlikte olan 1.0 m'lik silt tabakasına sahip birinci tip zemin profilini tanımlamaktadır. K1 (1.0, 10.0) ise yine aynı tip zeminin hem 1.0 ve 10.0 m'de 1.0 m'lik silt tabakası içeren profilini tanımlamaktadır. Parantez içerisinde herhangi bir değer içermeyen tanımlar ise silt tabakası olmayan profilleri tanımlamaktadır.



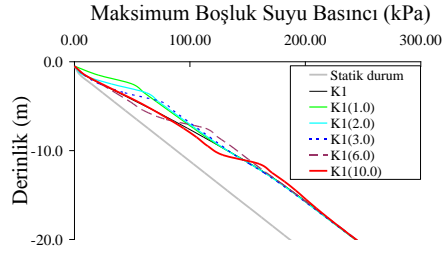
Şekil 3. Farklı maksimum taban ivmesine göre maksimum ivmenin derinlikle değişimi

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, silt tabakası içermeyen profillerde maksimum taban hareketi ivmesinin 0.20g ve 0.25g olduğu durumlarda sıvılaşma oluşmadığı; buna karşılık silt tabakasının hemen altındaki derinliklerde, maksimum ivme değerlerinde çarpıcı artışa neden olduğu görülmüştür. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte efektif gerilmelerde oluşan azalım nedeniyle kayma modülünde meydana gelen düşüş ile ilişkilendirilebilir.

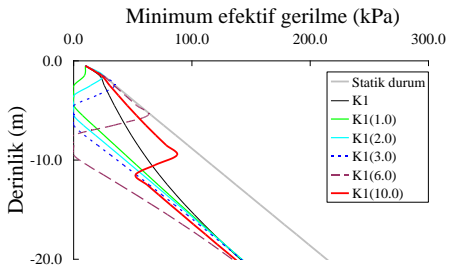
Silt ara tabakasının, efektif gerilmelerdeki değişimin üzerindeki etkisi Şekil 4'te sunulmuş olup, sismik yükleme nedeniyle derinlik boyunca efektif gerilmelerde meydana gelen azalım bu şekilde çok açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca zemin yüzeyinden itibaren ilk 10.0 m içerisinde, zeminde gözlenen sıvılaşma davranışının silt tabakasının derinliğine bağlı olduğu da açık bir şekilde anlaşılmaktadır.



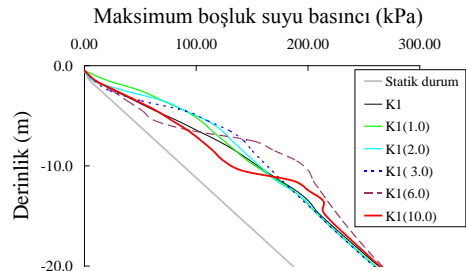
a) Efektif gerilme, K1 → 0.20g



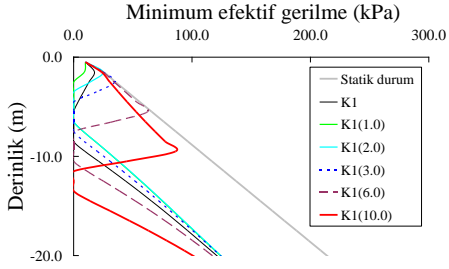
b) Boşluk suyu basıncı, K1 → 0.20g



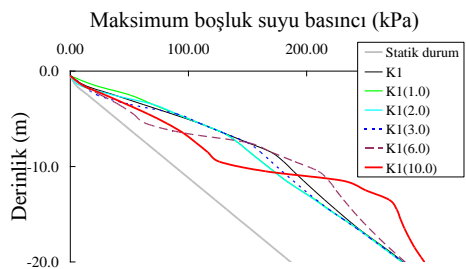
c) Efektif gerilme, K1 → 0.25g



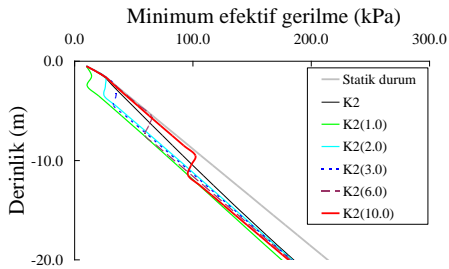
d) Boşluk suyu basıncı, K1 → 0.25g



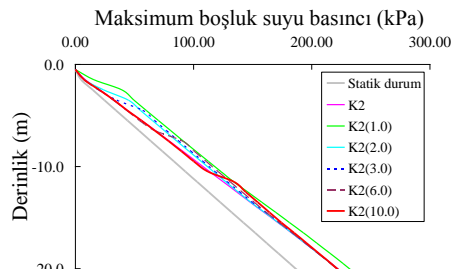
e) Efektif gerilme, K1 → 0.30g



f) Boşluk suyu basıncı, K1 → 0.30g

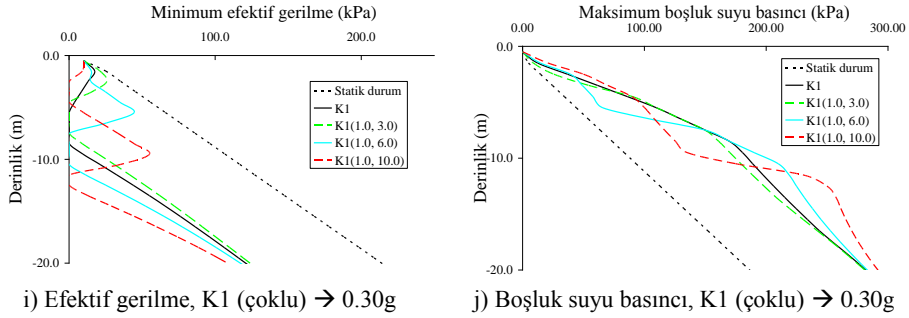


g) Efektif gerilme, K2 → 0.25g



h) Boşluk suyu basıncı, K2 → 0.25g

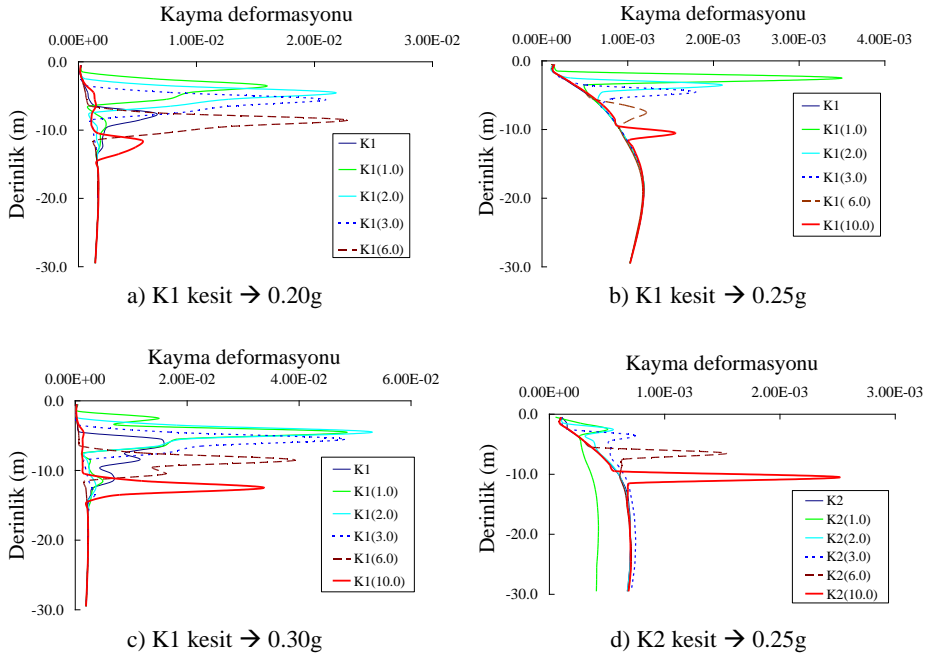
Şekil 4. Efektif gerilme ve boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi



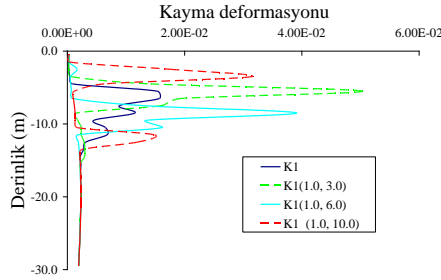
Şekil 4. (Devam) Efektif gerilme ve boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi

Yine, Şekil 4'te görüldüğü gibi, silt tabakasının hemen altındaki derinliklerde, silt tabakasının varlığı nedeniyle oluşan yüksek boşluk suyu basıncı değerleri efektif gerilmelerin çarpıcı şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum 0.25g ve üzeri maksimum taban ivmesine ölçeklendirilmiş yer hareketine maruz kalan profile silt tabakalarının hemen altında sıvılaşma meydana gelmesine sebep olmuştur (Şekil 4 c, e ve i).

Derinlik boyunca hesaplanan maksimum kayma deformasyonları Şekil 5'te gösterilmiştir. Özellikle silt ara tabakasının hemen altındaki derinliklerde yine azalan efektif gerilmelere bağlı olarak kayma modülünde meydana gelen azalma neticesinde, kayma deformasyonlarında önemli bir artış meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5. Maksimum kayma deformasyonu değerlerinin derinlikle değişimi



e) K1 (çoklu) kesit → 0.30g

Şekil 5. (Devam) Maksimum kayma deformasyonu değerlerinin derinlikle değişimi

Çizelge 2’de ise 0.30g maksimum ivmeli taban hareketi sonucunda oluşan sıvılaşma zamanları sunulmuştur. Bu çizelgeden de görüleceği üzere silt tabakasının olmadığı durumda sıvılaşma önce bir noktadan başlamakta, daha sonra ise aşağıya ve yukarıya doğru yayılmaktadır. Silt tabakasının olduğu durumlarda ise sıvılaşma öncelikle hemen silt tabakasının altında başlamakta ve aşağıya doğru yayılmaktadır.

Çizelge 2. K1 kesitlerinin 0.30g maksimum ivmeli taban hareketi için sıvılaşma zamanları (sn)

Üst kot (m)	Alt kot (m)	K1	K1(1.0)	K1(2.0)	K1(3.0)	K1(6.0)	K1(10)	K1(1.0, 3.0)	K1(1.0, 6.0)	K1(1.0, 10.0)
0.0	-1.0									
-1.0	-2.0		Silt					Silt	Silt	Silt
-2.0	-3.0		10.60	Silt						10.62
-3.0	-4.0		10.74	10.51	Silt			Silt		12.04
-4.0	-5.0		12.26	12.26	10.70			10.63		35.78
-5.0	-6.0	35.0	14.03	13.54	11.84			12.27		
-6.0	-7.0	14.0	35.63	35.62	13.92	Silt		13.54	Silt	
-7.0	-8.0	12.0			35.20	10.78		35.2	10.78	
-8.0	-9.0	35.3				11.85			12.04	
-9.0	-10.0					14.03			14.31	
-10.0	-11.0					36.06	Silt		35.62	Silt
-11.0	-12.0						11.28			12.29
-12.0	-13.0						12.28			35.62
-13.0	-14.0						34.96			
-14.0	-15.0									

Çoklu silt tabakasının olduğu durumlarda ise biraz farklılık gözlenmektedir. Bu durumlarda silt tabakalarının derinliklerine ve de aralarındaki mesafeye bağlı olarak sıvılaşma ya derindeki tabakanın hemen altında ya da her iki tabakanın da altında oluşmaktadır. Ayrıca Çizelge’de gözlenen diğer önemli nokta ise silt ara tabakaları arasındaki mesafe azaldığında iki silt tabakası arasında sıvılaşmanın oluşmadığıdır. Bu sonuç, bir anlamda altta bulunan tabakanın düşük kayma modülüne sahip olması nedeniyle sismik izolatör vazifesi gördüğü ve sonuç olarak iki tabaka arasındaki mesafe belli bir sınırın altına düştüğünde sıvılaşmanın oluşmasına yol açacak mertebede kayma deformasyonlarının oluşmadığı şeklinde yorumlanabilir. Bu durum

aynı bağlamda üstte bulunan tabaka içinde geçerlidir. Bu durumda da yüzeyden derine doğru ilk silt tabakasının derinliği önem kazanmaktadır. Diğer yandan silt tabakalarının varlığı, K(6.0), K(10.0), K(1.0, 6.0) ve K(1.0, 10.0) kesitlerinde gözlemlendiği gibi silt ara tabakası olmayan duruma (K1) nazaran daha derinlerde sıvılaşmanın oluşmasına yol açabilmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, silt ara tabakalı suya doymuş zeminlerin sismik yükler altındaki davranışı doğrusal olmayan efektif gerilme analizi yazılımı olan LASS-IV kullanılarak parametrik olarak incelenmiştir. Bu amaçla 30.0 m kalınlıklı bir kum tabakası seçilmiş ve profil içerisine çeşitli derinliklerde 1.0 m kalınlıklı silt ara tabakası veya tabakaları yerleştirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar silt tabakasının varlığının kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu durum özellikle silt tabakasının hemen altındaki derinliklerde, boşluk suyu basıncı, efektif gerilme ve kayma deformasyonu değişimleri ile gösterilmiştir. Bu bağlamda analitik olarak yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların, daha önce çeşitli araştırmacılarca yapılmış deneysel olan çalışmaların sonuçları ile de uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. [1 - 3].

Acknowledgments / Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya yapmış olduğu değerli katkılarından ve esirgmeden paylaştığı düşünce ve bilgilerinden dolayı Prof. Dr. Kutay Özyayın'a en derin saygı ve şükranlarını sunar.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Erken, A., Ansal, A., (1994). "Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands, Performance of Ground and Soil Structures", 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 165-170.
- [2] Kokusho, T. (1999). "Formation of Water Film in Liquefied Sand and Its Effect on Lateral Spread", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.125, No.10, 817-826.
- [3] Tohumcu, P.Ö., Berilgen, M., Özyayın, K. (2006). "Investigation of Liquefaction in Layered Sands By Means of Shaking Table Tests", The 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 1, 475-480.
- [4] Bray, J.D., Sancio, R.B., Youd, T.L., Durgunoglu, H.T., Önalp, A., Çetin, K.Ö., Seed, R.B., Seed, Stewart, J.P., Christensen, C., Baturay, M.B., Karadayılar, T., Emrem, C., (2003). "Documenting Incidents of Ground Failure Resulting From The August 17, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake", Geoenvironmental Research Report No. UCB/GE-03/02
- [5] Ishihara, K. (1985). "Stability of Natural Deposits During Earthquakes", XI International Conference Soil Mechanics, San Fransisco, California, 321-376.
- [6] Youd, T.L., Bartlett, S.F., (1989). "US Case Histories of Liquefaction-Induced Ground Displacement", Proceedings, First U.S. - Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, US National Center for Earthquake Engineering Research, pp. 22-31.
- [7] Youd, T.L., Holzer, T.L., (1994). "Piezometer Performance at the Wildlife Liquefaction Site", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.120, No.6, 975-995.
- [8] Bilge, H.T., (2010). "Cyclic Volumetric and Shear Strain Responses of Fine-Grained Soils", Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [9] Çetin, K.Ö., Bilge, H.T., (2010). "Zeminlerin Sismik Yükleme Altında Deformasyon ve Mukavemet Davranışlarına Kritik Bakış", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, İstanbul, pp. 19 - 46

- [10] Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). "SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley.
- [11] Liou, C.P., Streeter, V.L., Richart, F.E., Jr., (1976). "A Numerical Model for Liquefaction", ASCE Annual Convention and Exposition, Philadelphia.
- [12] Finn, W. D. L., Lee, K. W., & Martin, G. R. (1977). "An effective stress model for liquefaction", ASCE, 103 (GT6): 517-533
- [13] Hashash, Y. (2004). "DEEPSOIL - Tutorial and User Manual", University of Illinois at Urbana - Champaign, USA.
- [14] Yoshida, N., Kiku, H. and Towhata, I. (1999). "An Improvement of Effective Stress Dynamic Response Analysis Code YUSA-YUSA", Proc., The 34th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 2105-2106 (Japonca).
- [15] Ghaboussi, J., Dikmen, S.Ü., (1978). "Liquefaction Analysis of Horizontally Layered Sands", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE GT 104(3)
- [16] Ghaboussi, J., Dikmen, S.Ü., (1984). "Effective Stress Analysis of Seismic Response and Liquefaction: Theory", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.110, No.5, 628-644.
- [17] Yoshida, N., Iai, S., (1998). "Nonlinear Site Response and its Evaluation and Prediction", Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp. 71-90.
- [18] Dikmen, S.Ü., Ghaboussi, J., (1984). "Effective Stress Analysis of Seismic Response and Liquefaction: Case Studies", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE GT 110(5), 644 - 658
- [19] TDY-2007, (2007) "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik"
- [20] EUROCODE-8, "Design of Structures for Earthquake Resistance", 1998-1:2004
- [21] Kokusho, T. (1980). "Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range", Soils and Foundations, 20, pp. 45-60.
- [22] ESD, The European Strong-Motion Database, www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/frameset.htm
- [23] FEMA (368), Building Seismic Safety Council, 2001, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, 2000 edition, Part 1: Provisions