

YAPI YÜKÜ ETKİSİ ALTINDA SIVILAŞMAYA BAĞLI OTURMALARIN ANALİTİK VE NÜMERİK OLARAK HESAPLANMASI: ADAPAZARI ÖRNEĞİ

INVESTIGATION INTO THE SETTLEMENT OF A CASE STUDY BUILDING ON LIQUEFIABLE SOIL IN ADAPAZARI TURKEY

Sadık Öztoprak¹, Sinan Sarğın², Mostafa Al-Masraf³,
M. Kubilay Keleşoğlu⁴, İlknur Bozbey⁵, Cihan Öser⁶

ÖZET

Günümüzde yapılarda gözlenen sıvılaşma kaynaklı deplasmanların üç ana mekanizma ile oluştuğu bilinmektedir. Bunlar; (1)Kum kaynaması ve/veya fıskırması ile oluşan zemin deformasyonu (ejecta-induced ground deformation), (2)Taneli zeminin yerleşmesi ile ortaya çıkan hacimsel zemin deformasyonu (volumetric-induced ground deformation) ve (3)Kayma gerilmeleri ile tetiklenen ve üst yapının zımbalama etkisi ile oluşan zemin deformasyonları (shear-induced ground deformation) olarak tanımlanabilir. Literatürdeki mevcut sıvılaşma kaynaklı deplasman hesap yöntemleri, serbest alan analizlerinde çalışmakta ve hacimsel zemin deformasyonlarını belirlemede kullanılmaktadır. Kocaeli 1999 $M_w=7.4$ depreminde Adapazarı'nda meydana gelen sıvılaşma kaynaklı yer hareketlerinin bugün itibari ile 3. tür sıvılaşma kaynaklı zemin deformasyonlarına (yani zımbalama etkisi ile oluşan zemin deformasyonlarına) ait olduğu anlaşılmıştır. Bu gerçekten yola çıkarak, uzun yıllar süren çalışmalarının sonucunda 2017 yılında önemli bir çalışma yayınlanmış ve Adapazarı'ndaki yapılar altında deplasmanları hesap edebilen bir yöntem tanıtılmıştır. Bununla birlikte, Adapazarı'nda oluşan zemin deformasyonlarını belirleyen henüz nümerik bir çalışma bulunmamaktadır. Buradan yola çıkarak bu çalışmada, bir sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS'te kullanıcı tanımlı modellerden biri olan UBCSAND bünye modeli kullanarak Adapazarı'nda sıvılaşma kaynaklı zemin deformasyonu oluşan ve çok fazla arazi/laboratuvar verisi olan bir vakanın nümerik modelleme ile analizi yapılmıştır. Yazılımla elde edilen yatay ve düşey deplasmanlar arazide ölçülen gerçek deplasmanlarla uyumludur. *Anahtar Kelimeler:UBC-Sand, Sıvılaşma, Yapısal Hasar, Oturma, Boşluk Suyu Basıncı*

¹ Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, oztoprak@istanbul.edu.tr (Sorumlu Yazar)

² Araş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ssargin@istanbul.edu.tr

³ İnş. Müh., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, m.luay87@gmail.com

⁴ Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, kelesoglu@istanbul.edu.tr

⁵ Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ibozbey@istanbul.edu.tr

⁶ Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, oser@istanbul.edu.tr

ABSTRACT

This paper investigates the key parameters that influenced the settlement of a case study building on liquefiable soil in Adapazarı (Turkey) during the 1999 Kocaeli earthquake. Ground movements in Adapazarı caused large devastation, largely attributed to liquefaction of low plasticity silty soil layers underneath buildings on shallow foundations. The case study soil profile was well characterized by in-situ testing as well as laboratory tests from the Adapazarı area. This allowed several different estimates of the building settlement to be obtained through different methods and through a variation in upper and lower bound estimates of the soil parameters. The different methods and different soil properties caused scattered estimates for the building settlement, compared to the in-situ value of 0.9 m. Even though the results were varied, the estimation of the liquefied strength of the soil appeared to be a key parameter for the settlement of the case study of building. A detailed study with the PLAXIS finite-element software and UBCSAND constitutive model, provided a consistent estimate of the final settlement of 0.9 m compared to the in-situ value. However, the limitation due to the enforced “undrained” conditions during the dynamic phase of the analyses may have resulted in an inaccurate simulation of the pore water pressure and subsequently could have influenced the estimation of settlement. The modeling of the liquefaction settlements under free-field conditions was also considerably less than the re-consolidation settlements that were obtained through simplified procedures, suggesting that the re-consolidation settlement under the foundation was not modeled accurately. The present paper focuses on the assessment of the settlements due to earthquake-induced liquefaction as part of the research being conducted within the European project LIQUEFACT.

Keywords: UBC-Sand, Liquefaction, Structural Damage, Settlement, Pore Water Pressure

1. GİRİŞ

17 Ağustos 1999, sabaha karşı çok şiddetli bir deprem Türkiye'nin kuzey batısını etkilemiştir. Daha sonradan, Kocaeli depremi olarak literatüre geçen bu depremin moment manyetüdü, $M_w=7.4$ olarak belirlenmiştir. Deprem sonrası yapılan araştırmalara dayanan raporlarda zemin göçmelerinin büyüklüğü ve ağır yapısal hasarların fazlalılığı, bu depremi mühendislik ve yerbilimleri camiasının ilgi odağı haline getirmiştir (Bay & Cox, 2001). Şehir merkezinde yapılan araştırmalar neticesinde, yapılardaki hasarlar oluşum sebeplerine göre sınıflandırılmış; buna göre yapısal eksikliklerin yanında zemin sıvılaşmasının birçok noktada ağır hasara sebep olduğu tespit edilmiştir. Yüzlerce bina sıvılaşmaya ve zemin yumuşamasına bağlı olarak oturmuş, yanal ötelenmiş, dönmüş ve sonuç olarak yıkılmıştır (Bray ve diğerleri, 2011). Sıvılaşmaya bağlı hasarın büyük kısmı Sakaya nehri tarafından yaklaşık 7000 yıldır taşınarak çökelen düşük plastisiteli veya plastik olmayan silt zeminin yüzeye yakın tabakalandığı sahalarda gözlemlenmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu tür düşük plastisiteli veya plastik olmayan ince taneli zeminlerin, tıpkı kumlu zeminlerde olduğu gibi, yüksek sıvılaşma potansiyeli olduğu ortaya konmuştur ve bu tür zeminlerin yüzeye yakın derinliklerde bulunduğu Adapazarı'nda 1999 Marmara depreminde sıvılaşmaya bağlı oturmalara sebep olduğu tespit edilmiştir (Arel & Önalp, 2012).

UBC3D-PLM bünye modeli sismik yükler altında kumlu ve plastik olmayan siltli zeminlerin sıvılaşma tetiklenmesini nümerik olarak modellenmesine imkan veren basit ama güçlü bir araçtır. Bu bünye modeli, ilk olarak Puebla ve diğ. (1997) tarafından iki boyutlu modeller

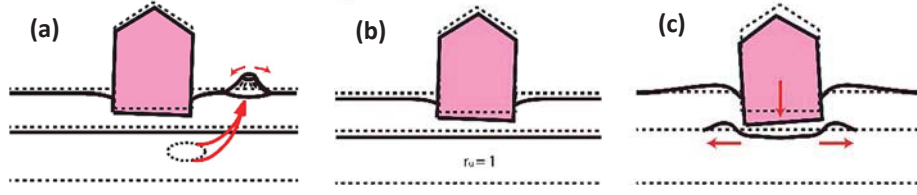
için tanımlanan UBCSAND bünye modelinin üç boyutlu modellemede kullanılması için önerilen versiyonudur. Bu yapısal nümerik model bir sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS yazılımına kullanıcı tanımlı bir arayüz ile aktarılmıştır (2017).UBC3D-PLM bünye modeli, drenajsız tekrarlı yükleme koşulları altında isotropik gerilme durumunu, basitleştirilmiş kinematik pekleşme yasaının birinci ve ikinci akma yüzeylerini; ve zeminlerin sıkışmasını hesaba katıp, buna bağlı olarak oluşan ilave boşluk suyu basıncının neden olduğu zemin sıvılaşmasını ve sıvılaşmaya bağlı oturmaları tahmin edebilmektedir(Galavi ve diğ.,2013).

Bu çalışma kapsamında, PLAXIS yazılımında kullanıcı tanımlı olarak bulunan UBCSAND bünye modeli kullanılarak, sismik yer hareketi esnasında sıvılaşmanın ve sıvılaşma sonrası oluşan serbest sahada ve yüzeysel temellerde gözlemlenen oturmaların makul bir biçimde modellenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, 1999 Kocaeli depreminde, sıvılaşma kaynaklı oturmaya ve hasara maruz kalmış bir vaka PLAXIS sonlu elemanlar yazılımı ve bu yazılımın içinde kullanıcı tanımlı olarak hazır bulunan UBCSAND zemin bünye modeli yardımı ile nümerik olarak modellenmiş; sonuçlar literatürdeki analitik çözüm yöntemleri ve sahadaki ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Bünye modelinin performansını etkileyen temel parametreler(örn. kayma mukavemeti açısı, zemin tabakasının düzeltilmiş batma direnci, kuvvetli yer hareketi şiddeti)nümerik analizlerde değiştirilerek her birinin sismik etkiden ve sıvılaşmadan kaynaklanan son oturma miktarına ve ilave boşluk suyu basıncının oluşumuna etkisi incelenmiştir.

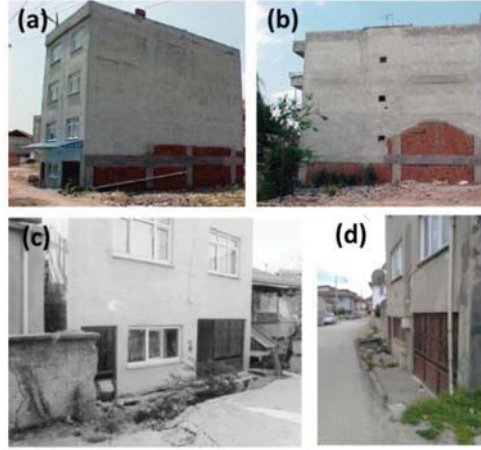
2. İNCELEME SAHASI VE VAKA ANALİZİ

Nümerik ve analitik analizlere esas teşkil eden yapı 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşma kaynaklı hasar ve oturmalara maruz kalmış; Adapazarı ili Yenigün caddesi Sönmez sokakta yer alan 4 katlı, betonarme bir yapıdır.Deprem sonrasında burada detaylı incelemeler yapan bazı araştırmacılar tarafından [(Sancio, 2003), (Bray & Macedo, 2017)] “F sahası” olarak adlandırılan arazide yer alan bu binanın uzunluğu 13 m., genişliği ise kuzey-güney doğrultusunda 7.7 m ve 7.3 m. arasında değişmektedir. Bununla birlikte yüksekliği 10.8 m. olarak verilmektedir. Adapazarı merkezde bulunan birçok yapıda olduğu gibi F sahasında bulunan bu yapının temeli 40 cm. Kalınlıkta betonarme radyedir; ayrıca 120 cm.lik bağ kirişleri ile güçlendirilmiştir (Sancio, 2003).

Sancio (2003) tarafından raporlanan saha gözlemlerine göre yapının sıvılaşmaya bağlı oturma miktarı bina etrafındaki kabaran kaldırımın üst kotundan temelin alt kotu arasındaki 90 cm.’lik kot farkı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yatay doğrultuda yapı 25 cm. batı yönünde; 30 ila 40 cm. arasında kuzey doğrultusunda deplasman yapmıştır (Sancio, 2003). Son zamanlarda yayınlanmış çalışmalarında Bray ve Macedo (2017) F sahasında bulunan bu yapının sıvılaşmaya bağlı oturmasının iki bileşeni olduğunu ortaya koymuşlar; bunlardan birincisi zeminin sismik yükleme altında sıkışarak hacimsel olarak küçülmesiyle oluşan oturma; ikincisi de sıvılaşan zeminin üstünde kalan zemin tabakalarının kayma dayanımlarını kaybetmesi ve yapı yükünden kaynaklanan zımbalama neticesinde oluşan oturmadır(Şekil 1). Günümüzde hala kullanımda olan bu binanın yanındaki kaldırıma göre 45-50 cm. oturmuş olduğu Şekil 2’de görülmektedir. Bray ve Macedo (2017) bu oturma miktarının büyük kısmının zımbalama türü oturmaya ait olduğunu iddia etmektedirler.



Şekil 1. Sıvılaşma kaynaklı oturma mekanizmaları (a) Zemin kaynaması (b) Hacimsel Oturma (c) Zımbalama oturması (Bray & Macedo, 2017)



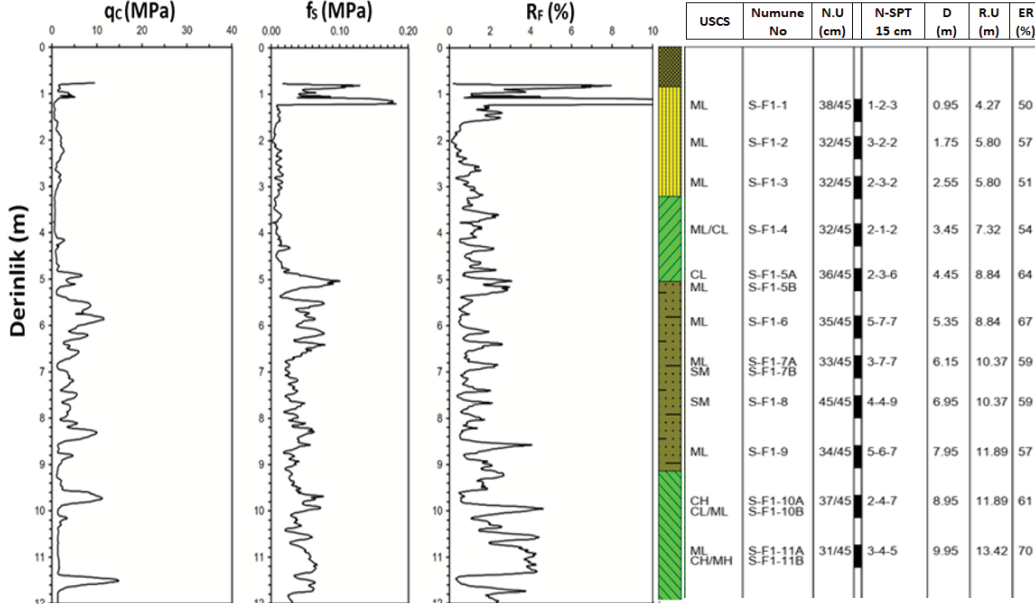
Şekil 2. F sahasındaki yapının görünüşleri; (a) 2000 yılı Sönmez Sokak'tan (b) 2000 yılında sahanın güney doğusundan (Sancio, 2003) (c) 1999 yılı depremden hemen sonra (d) Sönmez Sokak'tan günümüz

İnceleme alanında depremden bir sene sonra, Temmuz 2000'de, Berkeley Üniversitesi tarafından iki adet konik penetrasyon (CPT), bir adet boşluk suyu basıncının derinlikle değişimini ölçmeye olanak sağlayan sismik konik penetrasyon (SCPTU), bir adet standart penetrasyon deneyi(SPT) ve zeminlerin indeks özellikleri ile sıkışabilirliğini saptamak için laboratuvarında birçok deney yapılmıştır. Tüm bunların yanında dinamik yüklemeler altında daha sonradan literatüre Adapazarı Silti olarak geçen zemininin tekrarlı yükler altında sıvılaşma davranışını belirlemek için tekrarlı basit kesme ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmış; bina altındaki zemin profili tanımlanmıştır (Sancio,2003). Buna göre, CPT verilerinden elde edilen sonuçlar sahada yüzeyden 1.5 ila 5.5 m. derinlikleri arasında çok gevşek Adapazarı silti bulunduğunu göstermiştir (Şekil 3).

3. SIVILAŞMAYA BAĞLI OTURMANIN ANALİTİK OLARAK ÇÖZÜMÜ

Bu çalışma kapsamında ilk olarak, yapı altında bulunan zemin profilinin sıvılaşma potansiyelini belirlemek amacı ile CPT saha verilerini kullanan, Boulanger ve Idriss (2015) tarafından önerilen sıvılaşma potansiyelini tahmin edebilen yöntemi esas alan bir MS-Excel çalışma sayfası oluşturulmuştur (Şekil 4). Bununla birlikte, güncel literatürü kapsayarak detaylı analiz yapabilen bu çalışma sayfasında, likit limit (LL) ve plastitiste indisinin (PI) değerlendirildiği ince daneli zeminler için sıvılaşma potansiyelinin basitçe belirlendiği Idriss ve diğ. (2003) tarafından güncellenen Çin Sıvılaşma Kriteri ile Adapazarı Kriteri (Önalp ve diğ. 2012) her tabakanın potansiyelinin belirlenmesinde yardımcı araç olarak kullanılmıştır. Çalışma sayfasının önemli özelliklerinden birisi de sıvılaşma hasar görülebilirlik indekslerini

(LPI,LSI,LSN) zemin özelliklerine ve kuvvetli yer hareketinin maksimum ivmesine göre belirleyebilmesidir. Son olarak, çalışma sayfasının ilgili alanına girilen üç farklı maksimum ivme seviyesine göre Ishihara (1985) tarafından önerilen yöntem ile zemin profiinin sıvılaşabilirliği irdelenebilmektedir. Çalışma sayfasının oluşturulmasındaki diğer formüller ve detaylı bilgiler ilgili kaynaktan elde edilebilir (Al-Masraf,2018).



**N.U : Numune Uzunluğu; D:Numune Derinliği; R.U: Rod Uzunluğu; ER: Enerji Oranı; USCS: Birleştirilmiş Zemin Sınıfı

Şekil 3. F sahasında yapılan arazi deneyleri ve idealize zemin profili (Sancio, 2003)

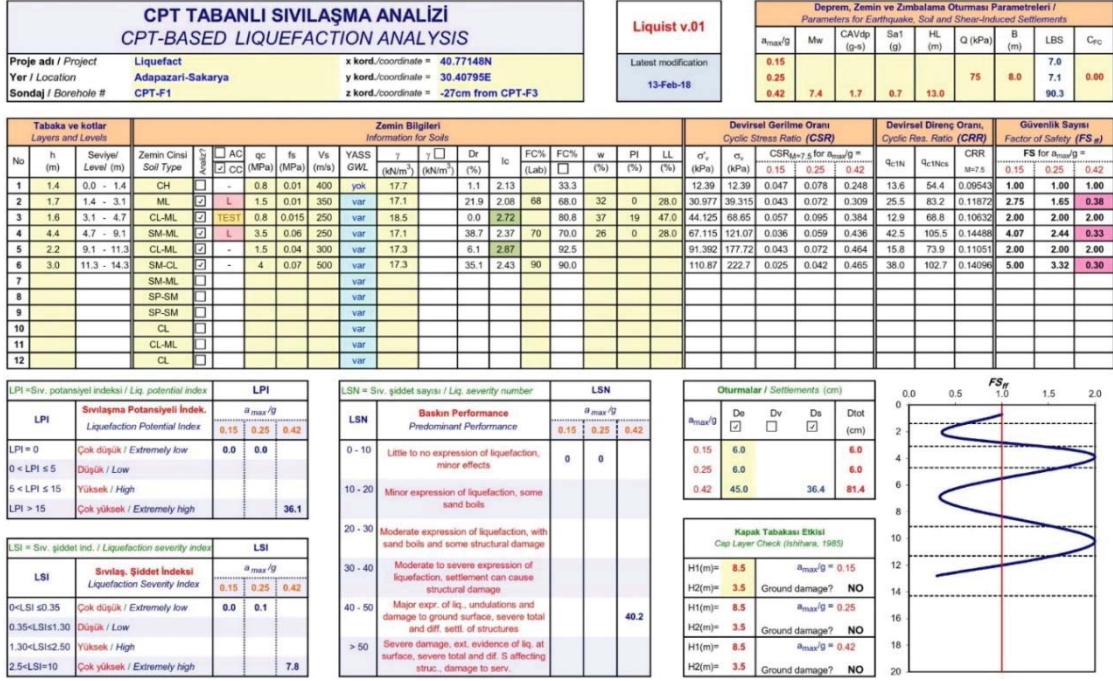
3.1. Serbest Saha Durumu

Sahada yapılan CPT verilerinin kullanıldığı çalışma sayfasında, serbest saha durumu için oturma tahmini yapılırken kuvvetli yer hareketi etkisinde zeminin daha sıkı duruma geçmesinden dolayı oluşan hacimsel oturmalar; ilk olarak Ishihara ve Yoshemine (1992) tarafından önerilen ancak Zhang ve diğ. (2002) tarafından güncellenen yöntem kullanılmıştır. Bu metoda göre, zemin profilinin yüzeyden ilk 20 metresi detaylı olarak tabakalara ayrılmış; her birisinin normalize edilmiş temiz kum eşdeğer uç dirençleri $(q_{c1N})_{CS}$ hesaplanmış ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (F_{SL}) 1'den küçük olduğu tabakalarda sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyon (ϵ_v) bulunmuştur. Hacimsel oturma (S_v) ise eşitlik 1 de verilen formül ile tahmin edilmiştir.

$$S_v = \sum_{i=1}^j \epsilon_{vi} \Delta z_i \quad (1)$$

Burada ϵ_{vi} i sayıdaki her alt tabakanın sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyonunu gösterirken Δz_i ise ilgili tabakanın kalınlığını belirtmektedir. Toplam tabaka sayısı ise "j" ile tanımlanmaktadır.

Kum kaynaması veya zemin fıçırmasına bağlı oluşan oturmalar (S_E) için literatürde henüz kabul edilen analitik hesap metodu olmadığından; ya gözlemsel veriler çalışma sayfasına manuel olarak girilmiştir ya da oturma miktarı yukarıda bahsedilen sıvılaşma hasar görebilirlik indeksleri göz önünde bulundurularak tahmin edilmiştir.



Şekil 4. CPT verilerinin kullanıldığı sıvılaşma analizinin yapıldığı MS-Excel çalışma sayfası

3.2. Yapı Altında Oluşabilecek Oturmaların Tahmin Edilmesi

Deprem sırasında oluşan sıvılaşmaya bağlı, bina yükü etkisiyle oluşan zımbalama türü oturmaların hesaplanmasında Bray ve Macedo (2017) tarafından önerilen basitleştirilmiş ampirik metot kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından önerilen formül eşitlik (2)'de şu şekilde verilmiştir :

$$\ln(S_s) = c1 + 4.59 \cdot \ln(Q) - 0.42 \cdot \ln(Q)^2 + c2 \cdot LBS + 0.58 \cdot \ln \left[\tanh \left(\frac{HL}{6} \right) \right] - 0.02 \cdot B + 0.84 \quad (2)$$

$$\cdot \ln(CAVdp) + 0.41 \cdot (Sa1) + \varepsilon$$

Burada LBS sıvılaşmaya bağlı bina oturma indeksi olarak tanımlanmaktadır ve eşitlik (3) teki gibi hesap edilmektedir:

$$LBS = \int W \frac{\varepsilon_{shear}}{z} dz \quad (3)$$

Zemin yüzeyinden ilgili tabakanın orta noktasına kadar olan derinlik (z); yapı temeli ağırlık faktörü (W) ise temel derinliği (D_f) tabaka orta noktası derinliğinden (z) büyükse sıfır; diğer durumlarda 1 olarak hesaba dahil edilmektedir. Kayma deformasyonu (ε_{shear}) serbest yüzey analizlerinde kullanılan yöntem ile belirlenmektedir (Zhang ve diğ.,2002).

Bray ve Macedo (2017) önermiş oldukları ampirik ifadede kullandıkları c1 ve c2 katsayılarının belirlenmesinde Tablo 1'in kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bu formüldeki bir diğer önemli değişken süreye bağlı yer hareketi hasar potansiyelidir (CAVdp). Analize konu olan şiddetli yer hareketi ile ilgili yırtılma uzunluğu, moment manye-

Tablo 1. LBS'ye göre c1 ve c2 değerleri (Bray & Macedo,2017)

LBS	Sabit değeri	
	c1	c2
LBS ≤ 16	-8.35	0.072
LBS > 16	-7.48	0.014

tüdü ve fay tipi gibi deprem karakteristikleri ile sahaya ait ilk 30 m.'nin ortalama kayma dalgası hızı (V_{S30}) bilindiği zaman yazarların kişisel web sayfasında bulunan MS-Excel çalışma sayfasından bu değer kolaylıkla hesaplanabilir. Deprem ile ilgili karakteristiklerin bilinmemesi veya açık olmaması durumunda Campbell ve Bozorgnia (2010) tarafından önerilen standart kümülatif mutlak hız (CAV_{STD}) eşitlik (4) ile hesaplanarak CAV_{dp} yerine kullanılabilir.

$$CAV_{STD} = \sum_{i=1}^N \left(H(PGA_i) - 0.025 \int_{i-1}^i |a(t)| dt \right) \quad (4)$$

Burada N, 1 saniyelik her bir periyodun sayısını göstermekte iken; PGA_i maksimum yer ivmesini (g) biriminde ifade etmektedir. Denklem içindeki $H(x)$ parçalı, adım fonksiyonu eşitlik (5)'te verilmiştir.

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Eşitlik (2) içerisinde bulunan $Sa1$ ise 1 sn. periyoduna karşılık gelen spektral ivme değeridir. AFAD tarafından ulusal bazda hazırlanan haritadan bu değer belirlenebilmektedir. İstatiksel olarak normal dağılımdan elde edilen ϵ parametresi ise oturma hesabındaki belirsizliği azaltmak için 0 ila 1 arasında bir değer olarak kullanılmaktadır, varsayılan değer 0.50'dir. Bunun dışında formülde bulunan, HL sınıflandırılabilir toplam tabaka kalınlığını; Q temelden zemine aktarılan ilave gerilmeyi ve B ise temel genişliğini göstermektedir.

4. NÜMERİK ANALİZLER

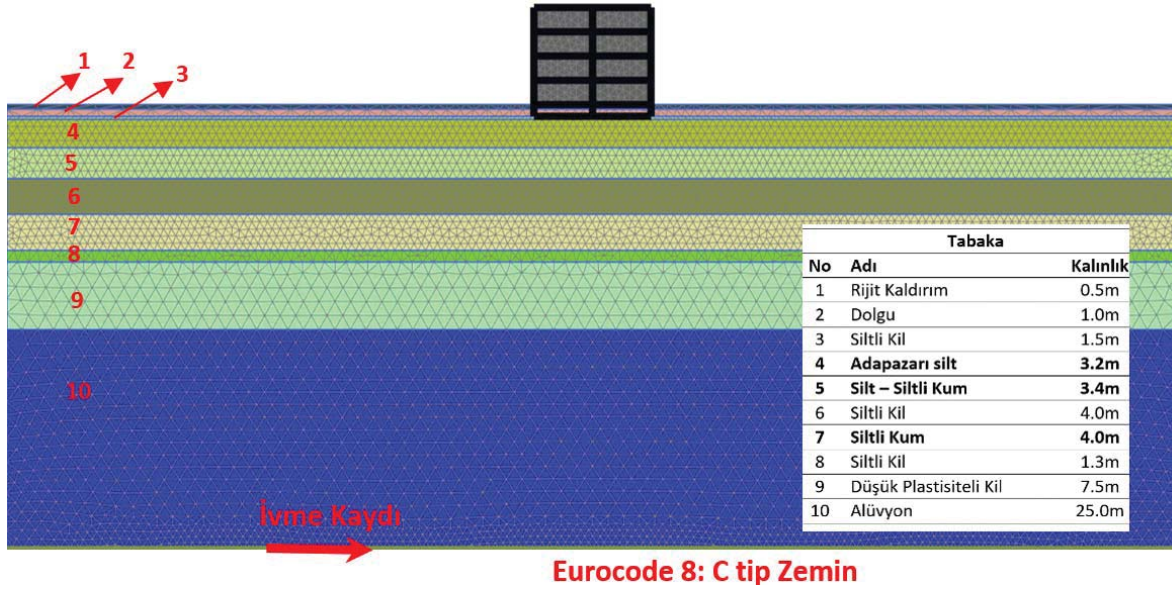
Çalışmaya konu olan F sahasındaki bina ve zemin profili PLAXIS 2017 sonlu elemanlar yazılımı içerisinde kullanıcı tanımlı olarak bulunan UBCSAND bünye modeli kullanılarak serbest saha ve yapı olması durumlarında meydana gelen oturmalar ve ilave boşluk suyu basıncının deprem süresi ve sonrasında değişimi incelenmiştir.

4.1. İki Boyutlu Nümerik Model

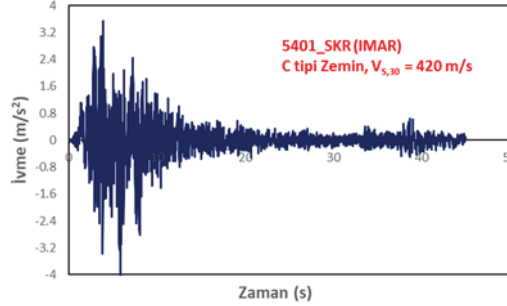
İnceleme sahasında ele alınan zemin profiline bakıldığında; üç baskın veya ayırt edici katman olduğu görülmektedir. Kumlu-siltli, siltli ve killi tabakalar toplamda yaklaşık 50 m. kalınlıkta olup Eurocode 8 yönetmeliğine göre "C sınıfı" bir zeminin üzerinde yer almaktadır (Şekil 5). Yüzeğe en yakın sınıflandırılabilir tabaka Şekil 5'te 4 no.lu tabaka olarak gösterilen Adapazarı siltidir ve kalınlığı 3.2 m.'dir. Verilen zemin profilindeki diğer sınıflandırılabilir tabakalar 5 ve 7 no.lu siltli kum tabakalar olup kalınlıkları sırasıyla 3.4 m. ve 4.0 m.'dir. Arazide yeraltı suyu seviyesi yüzeyden 1.5 m. aşağıda ölçülmüştür. Analitik çözüm yöntemleri ile sınıflandırmaya karşı güvenlikleri çok düşük olan 4,5 ve 7 no.'lu tabakaların dinamik yükler altındaki davranışı UBCSAND ile modellenirken, sınıflandırılabilir potansiyeli düşük olmayan killi zemin tabakaları için yazılım içerisinde gömülü bulunan HS-Small bünye modeli kullanılmıştır. Model derinliği 50 m. olarak belirlenirken, deprem dalgalarının model sınırlarından yansıma etkisini en aza indirmek için genişliği 200 m. olarak seçilmiştir.

Nümerik analize esas teşkil eden F sahasında bulunan 4 katlı yapı 10.8 m. yüksekliğe ve 8 metre genişliğe sahiptir. Ayrıca temel derinliği zemin yüzeyinden 1.3 metre olarak

saptanmıştır (Sancio,2003). Sahaya en yakın kuvvetli yer hareketi kaydı SKR-5401 no.lu istasyonda ve doğu-batı doğrultusunda maksimum ivme değeri yaklaşık $PGA = 0.4 g$ ($4.07 m/s^2$) olarak kaydedilmiştir. Bu kayıt yazılımında, Şekil 6a'daki gibi ivme-zaman tablosu olarak modele alt sınırdan uygulanmıştır. Ayrıca, Komazawa ve diğ. (2002) ve Özçep ve diğ. (2013)'nin Adapazarı için çıkarmış oldukları kayma dalgası hızı-derinlik profili de ivme kaydının yüzeyden 50 m. aşağıda başlayan "C tipi" zeminin üst sınırından verilmesinin doğru olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Nümerik analizlerde kullanılan modelin görünümü



Şekil 6. 1999 Kocaeli Depremi, 5401-SKR istasyonu doğu-batı ivme kaydı (kyh.gov.tr)

Nümerik model üzerinde oluşturulan sonlu elemanlar ağı temel kotu ve civarında küçük elemanlardan oluşurken; modelin kenarlarına ve derinlere inildikçe daha büyük elemanlar seçildi. Dinamik yüklemenin yapıldığı aşamada; modelin yatay sınırları "tied-degree of freedom" olarak tanımlanmış; buna paralel olarak nümerik analizin süresini kısaltmak ve aşağıdan gelebilecek dalga yansımalarını engellemek için model alt sınırı "compliant base" olarak seçilmiştir (PLAXIS,2017).

4.2. Yapıya Ait Bilgiler

Nümerik modeldeki yapısal elemanların davranışı doğrusal elastik seçilmiş ve rijitlikleri tanımlanmıştır. Kolon ve kiriş elemanlar Plaxis yazılımı içinde gömülü bulunan kiriş eleman seçeneğı ile tanımlanmıştır. Her kat döşemesi için modele 10 kPa; temel için 16 kPa'lık ilave yük girilmiştir. Yapının zeminle temas ettiği temel ile zemin elemanları arasında sürtünme

kuvvetlerinden kaynaklanan etkileşimi hesaplamalara daha gerçekçi aktarmak için arayüz (interface) elemanlar temel giriş elemanı boyunca tanımlanmıştır.

4.3. Zemin Parametreleri

PLAXIS (2017) doğrusal olmayan karmaşık modelleri sonlu elemanlar metodu ile analiz edebilen güçlü bir yazılımdır. Yapının modele dahil edildiği evre statik hesaplama adımı olarak programa tanıtılmıştır ve bu adımda tüm zeminlere çok küçük deformasyon seviyelerinde dahi zeminlerin doğrusal olmayan elastik davranışını göz önünde bulundurabilen “Pekleşen Zemin” bünye modeli atanmıştır (Tablo 2). Bu modelin önemli artlarından birisi de histerik sönüm davranışının zemin davranışına etki ettirilebilmesidir. Pekleşen zemin bünye modelinin kullanılabilmesi için gerekli olan birim hacim ağırlık, başlangıç boşluk oranı ve sıkışabilirlik değişkenleri Sancio (2003) ve Arel & Önalp (2012) tarafından literatüre kazandırılan çalışmaların deneysel veriler bölümünden alınmıştır.

Yazılımın içerisinde kullanıcı tanımlı olarak hazır bulunan UBCSAND zemin bünye modeli bu modelde daha önce analitik olarak sıvılaşma potansiyelinin çok yüksek olduğu ispatlanan 4,5 ve 7 no.lu tabakaların dinamik yükleme ve dinamik yükleme sonrası konsolidasyon safhalarında kullanılmıştır. UBCSAND zemin boşluklarında bulunan boşluk suyunun depremden dolayı tekrarlı drenajsız yüklemeye maruz kalması sonucu oluşan boşluk suyu basıncının oluşumunu tahmin etmek için önerilmiş doğrusal olmayan, elasto-plastik, efektif gerilme tabanlı bir bünye modelidir ve detayları ilgili kaynaklarda verilmiştir (Petalas ve diğ., 2012; Galavi ve diğ., 2013). Bu modelin en önemli parametreleri fiziksel olarak SPT vuruş sayıları ile ilişkilendirmiş; bir kısmının da eğri geçirme prosedürü ile elde edilmesi önerilmiştir. Tablo 3’te ilgili tabakalar için zemin UBCSAND başlangıç parametreleri gösterilmiştir. Sıvılaşma karakteristiği bakımından önemli olan ve tabaka 4 olarak tanımlanan “Adapazarı Silti”nin düzeltilmiş SPT değerleri değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Ayrıca arazide 1.5 m. derinlikte ölçülen su seviyesinin 2.1 m.’ye kadar indiği gözlemlenmiş olduğundan bir analizde bu durum için yapılmıştır.

Temel olarak, UBCSAND bünye modeli düzeltilmiş SPT vuruş sayısı, $(N_1)_{60}$, ile ilişkilendirildiğinden sahada yapılmış konik penetrasyon deney sonuçlarından Robertson ve diğ. (1986) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikler (6-7) kullanılarak dönüşüm yapılmıştır.

$$(N)_{60} = \frac{(q_c/p_a)}{I_c} \quad (6)$$

$$(N_1)_{60} = (N)_{60} \cdot C_N \cdot C_S \cdot C_R \cdot C_B \quad (7)$$

Burada p_a atmosferik basıncı, I_c zemin davranış katsayısı (killer için 1.5, siltler için 2.0 ve siltli kum/kumla için 3.0) olarak verilmektedir.

Beaty and Byrne (2011) UBCSAND modelin arazi dataları ile daha entegre kullanılabilmesi için düzeltilmiş eş değer kum SPT vuruş sayıları ile eşitlik (8)-(11) önermişlerdir.

Tablo 1. PLAXIS Pekleşen Zemin Modeli Parametreleri

Parametre	Birim	Kaldırım (1)	Dolgu (2)	Siltli Kil (3)	Adapazarı Silt (4)	Siltli Kum (5)
Birim hacim ağırlık (γ_{unsat})	kN/m ³	20	16	16	16	16
Doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat})	kN/m ³	21	17	17	17	17
Sekant Modülü (E_{50}^{ref})	kN/m ²	100000	3111	4494	8211	18310
Ödometre Modülü (E_{oed}^{ref})	kN/m ²	100000	2489	3595	6569	14650
Boşaltma/Tekrar yükleme Modülü (E_{ur}^{ref})	kN/m ²	300000	9334	13480	24630	54930
Üs (m)	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Boşluk oranı (e_{init})	-	0.654	0.921	0.883	1.089	0.709
Referans Kohezyon Değeri (c'_{ref})	kPa	10	1	1	1	1
Kayma Mukavemeti Açıısı (ϕ')	($^{\circ}$)	36	30	30	30	31
Genişleme Açıısı (ψ)	($^{\circ}$)	5	0	0	0	1
Kayma Modülü (G_0)	kN/m ²	120000	32550	39840	49000	86200
Ref. birim kayma def. $G_s=0.722G_0$ ($\gamma_{0.7}$)	-	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Poisson oranı (ν_{ur})	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Tablo 2. PLAXIS Pekleşen Zemin Modeli Parametreleri (Devam)

Parametre	Birim	Siltli Kil (6)	Siltli Kum(7)	Siltli Kil (8)	Kil (9)	Kil (10)
Birim hacim ağırlık (γ_{unsat})	kN/m ³	17	16	16	17	18
Doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat})	kN/m ³	18	17	17	18	19
Sekant Modülü (E_{50}^{ref})	kN/m ²	17950	24910	23120	31820	89470
Ödometre Modülü (E_{oed}^{ref})	kN/m ²	14360	19930	18490	25450	71570
Boşaltma/T. Yükleme Mod. (E_{ur}^{ref})	kN/m ²	53840	74730	69350	95450	268400
Üs (m)	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Boşluk oranı (e_{init})	-	0.804	0.765	0.808	0.789	0.654
Referans Kohezyon Değeri (c'_{ref})	kPa	1	1	1	1	1
Kayma Mukavemeti Açıısı (ϕ')	($^{\circ}$)	30	30	30	30	31
Genişleme Açıısı (ψ)	($^{\circ}$)	0	0	0	0	1
Kayma Modülü (G_0)	kN/m ²	85260	102100	97980	116800	206100
Ref. birim kayma def. $G_s=0.722G_0$ ($\gamma_{0.7}$)	-	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Poisson oranı (ν_{ur})	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

$$K_G^e = 21.7 \cdot 20.0 \cdot (N_1)_{60}^{0.333} \quad (8)$$

$$K_B^e = K_G^e \cdot 0.7 \quad (9)$$

$$K_G^p = K_G^e \cdot (N_1)_{60}^2 \cdot 0.003 + 100.0 \quad (10)$$

$$\varphi'_{pi} = \varphi'_{cv} + (N_1)_{60}/10.0 \quad (11)$$

Burada φ_{pi} i'inci tabakanın maksimum kayma mukavemet açıısını göstermekte olup; $(N_1)_{60}$ değerinin 15'ten küçük olduğu durumlarda eşitlik (12) nin kullanılması önerilmektedir.

$$\varphi'_p = \varphi'_{pi} + \max\left(0.0, \frac{(N_1)_{60} - 15}{5}\right) \quad (12)$$

Modelde bulunan ve eğri yakalama (curve-fitting) parametresi olarak kullanılan m_e ve n_e varsayılan değer olan 0.5; n_p ise 0.4 olarak kabul edilmiştir. Önemli bir başka parametre olan göçme oranı ise eşitlik (13) ile hesaplanmıştır.

$$R_f = 1.1 \cdot (N_1)_{60}^{-0.15} \quad (13)$$

Tablo 3. PLAXIS UBCSAND Modeli Parametreleri

Parametre	Birim	Adapazarı Silt	Siltli Kum	Siltli Kum	Adapazarı Silti	Adapazarı Silti	
		(4)	(5)	(7)	(4) [alt]	(4) [üst]	
		[en uygun]					
UBC Sand Parametreleri	S. Hacimde Kayma Muk. Açısı (ϕ_{cv})	($^\circ$)	30	30	30	30	30
	Pik Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ_p)	($^\circ$)	31	31	30	30.4	31.6
	Kohezyon (c)	kPa	-	-	-	-	-
	Elastik Kayma Mod.Katsayısı (K_{eG})	-	604.1	829.7	867.4	546.7	741.7
	Plastik Kayma Mod.Katsayısı (K_{pG})	-	113.2	222	266.5	106.6	155.6
	Elastik Bulk Mod. Katsayısı (K_{eB})	-	422.9	580.8	607.2	382.7	519.2
	Elastik Kayma Mod. İndisi (n_e)	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Elastik Bulk Mod. İndisi (m_e)	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Plastik Kayma Modü.İndisi (n_p)	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Göçme oranı (R_f)	-	0.948	0.822	0.805	0.991	0.864
	Atmosfer Basıncı (P_A)	kPa	100	100	100	100	100
	Çekme Gerilmesi (σ_t)	kPa	0	0	0	0	0
	Pekleşme Faktörü (f_{achard})	-	1	1	1	1	1
	SPT (N_1) ₆₀	-	2.7	7	8	2	5
Sıvılaşma Sonrası faktörü (f_{acpost})	-	1	1	1	1	1	
Arayüz Par.	Ödometre Mod.(E_{refoed})	kPa	6569	44830	53090	6569	6569
	Referans gerilme kohezyon (c' ref)	kPa	1	1	1	1	1
	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ')	($^\circ$)	30	31	30	30	30
	Genişleme Açısı (ψ)	($^\circ$)	0	1	0	0	0

5. BULGULAR

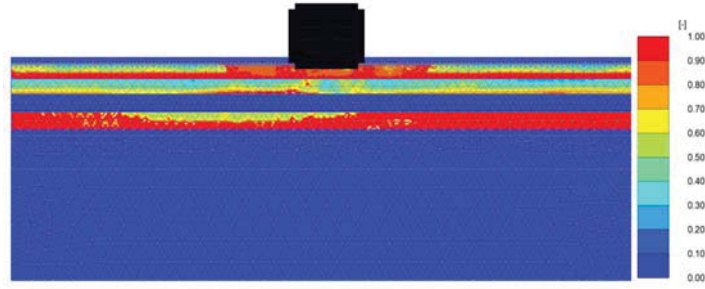
Çalışmada sunulan ve literatürdeki güncel sıvılaşma hesaplarını içeren Excel çalışma sayfasından elde edilen sonuçlar ile PLAXIS'te UBCSAND bünye modeli ile teşkil edilen sıvılaşma hesaplamaları karşılaştırılmıştır. Nümerik modelleme kapsamında oluşturulan, parametrik analizlere ait detaylar Tablo 4'te verilmiştir.

5.1. Yapının Mevcut Olduğu Durum

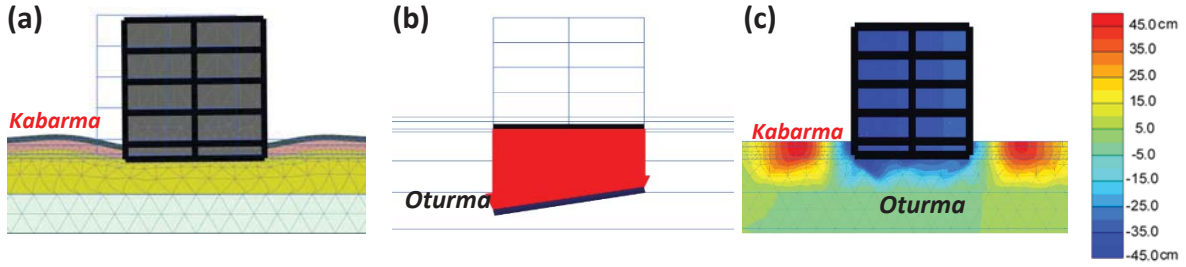
Bray ve Macedo (2017) tarafından önerilen analitik yöntemle hesaplanan zımbalama kaynaklı oturmalar 36.4 cm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte saha gözlemine dayalı zemin fişkırmada oluşan oturma 45 cm. olarak bilinmektedir. Bu nedenle toplam oturma miktarı yaklaşık 81 cm. olarak hesaplanmaktadır.

Sahada yapılan SPT–CPT sonuçlarına göre oluşturulan 1 no.'lu analizde analitik metodlarla sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı <1 olan 4,5 ve 7 no.'lu tabakaların r_u değerleri Şekil 7'de verilmektedir. Buna göre her üç tabakada, bünye modelinin sıvılaşma kriteri olarak belirlediği $r_u > 0.7$ sağlanmaktadır.

1 no.'lu analizde ayrıca Sancio (2003) ve Bray& Macedo (2017)'nin belirttikleri ve sahada ölçülen bina temel alt kotunun bina çevresi yolun üst kotundan olan 90 cm.lik oturmayı yaklaşık olarak tahmin edebilmiştir (Şekil 8.a-c).



Şekil 7. Bina olması durumunda nümerik analizde saha geneli ru değerleri (Analiz No.1)

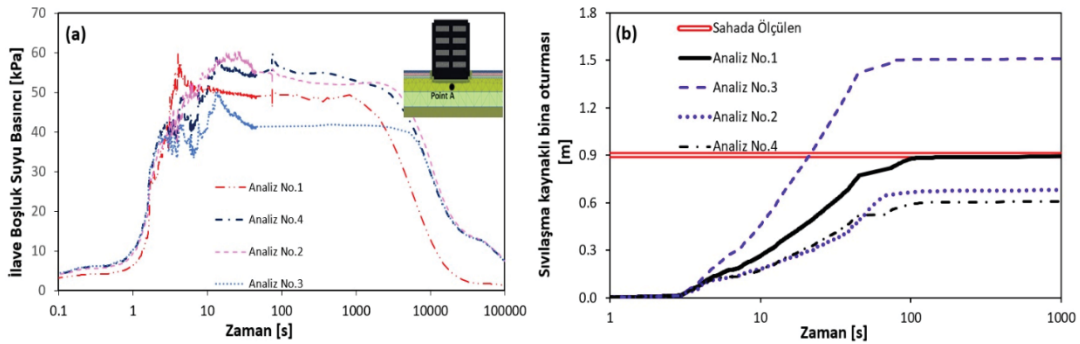


Şekil 8. Yapı altı sıvılaşmaya bağlı oturma ve kabarma miktarı (Analiz No.1)

Tablo 4. Parametrik Nümerik Analizler ve Sonuçları

AnalizNo	Analiz Adı	Değişim	Sıvılaşma Kaynaklı Oturma [cm]
1	En Uygun	Tabaka 4: $(N_1)_{60}=2.7$, YASS= 1.5m	91.8
2	Üst Sınır $(N_1)_{60}$	Tabaka 4: $(N_1)_{60}=5$	69.7
3	Alt Sınır $(N_1)_{60}$	Tabaka 4: $(N_1)_{60}=2$	153.2
4	YASS indirilmiş	Tabaka 4: $(N_1)_{60}=2.7$, GWL = 2.1m	60.8

Tablo 4'ten görüldüğü üzere yüzeje yakın olan 3.2 m. kalınlığındaki Tabaka 4 düzeltilmiş SPT vuruş sayısı oturma miktarını büyük ölçüde etkilemektedir.Şekil 9-a'da dört farklı durumda "Adapazarı silt" tabakasının ortasında bulunan A noktasında deprem süresince oluşan ve sonrasında sönümlenen ilave boşluk suyu basıncı değişimi verilmektedir. Şekil 9-b'de sahada ölçülen oturma ile tüm analizlerde deprem süresince hesaplanan oturmalar karşılaştırılmıştır.

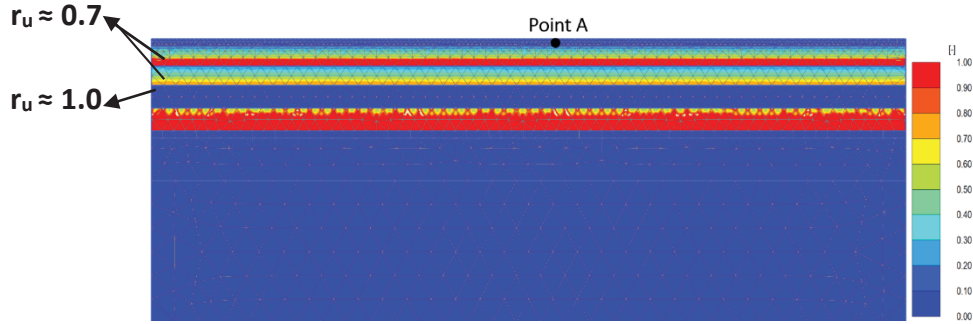


Şekil 9. (a) Deprem ve sonrası boşluk suyu basıncı değişimi (b) Deprem süresince temel ortası sıvılaşmaya bağlı oturma

5.2. Serbest Saha Analizleri

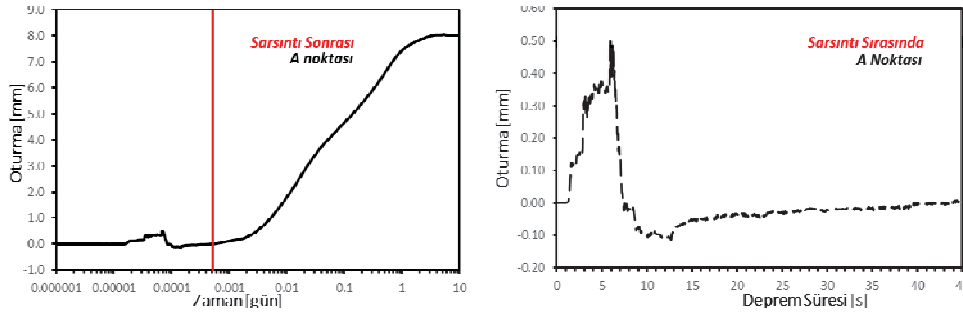
Serbest yüzeyli sahada yüzeje yakın olan "Adapazarı Silti" tabakasında sıvılaşma kriteri olan $r_u > 0.7$ değerine ulaşmış; yani sıvılaşmıştır. Burada dikkat çekilmesi gereken diğer bir nokta da daha derinde olan 7 no.'lu tabakanın sıvılaşarak dalga enerjisini sönümlemesi ve

yukarıdaki daha gevşek veya zayıf olan 4-5 no.'lu tabakalarda boşluk suyu basıncı artırımını sınırlandırmıştır.



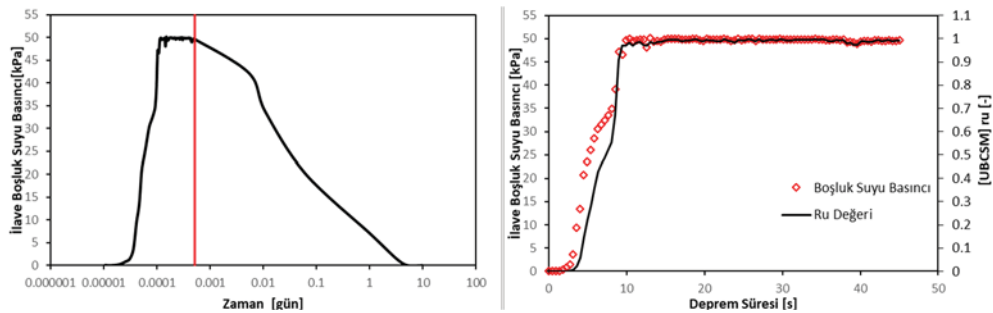
Şekil 10. Serbest yüzeyli sahada boşluk suyu basıncı oranı, r_u , değişimi (Analiz No1)

Deprem sırasında A noktasında oturma miktarı 5 mm. olurken takip eden 10 günde boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve suyun yüzeye çıkmasıyla sıvılaşma sonrası oturma 8 mm. olmuştur (Şekil 11). Bina bulunmayan serbest saha analizi ile 90 cm. oturma bulunan binalı durum arasındaki fark, serbest yüzeyli durumda sıvılaşmaya bağlı oturma hesaplayabilen analitik yöntemlerin binalı durumlar için kullanılmayacağını göstermektedir.



Şekil 11. Serbest yüzeyli sahada yüzey oturmalarının son durumu (Analiz No.1)

Aynı noktanın boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesine bakıldığında; depremin 10 saniyesinde efektif gerilmeyi sıfır yapan 50 kPa değerine ulaşmış ve daha sonraki 10 günde tamamen sönümlenmiştir. Deprem sonrası sönümlenme davranışını izlemek için PLAXIS'te dinamik yükleme sonrası konsolidasyon safhası eklenmiş ve zemin özellikleri aynı tutularak, malzeme tipi drenajlı olarak tanımlanmıştır. Şekil 9 ve 12'de boşluk suyu basıncı değişim grafiğindeki maksimum değerler yakın olmasına karşın hesaplanan oturmalar oldukça farklıdır.



Şekil 12. Serbest yüzeyli sahada ilave boşluk suyu basınçlarının son durumu (Analiz No.1)

6. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, sıvılaşma hesabını nümerik analizle hesaplamaya yarayan bir bünye modeli olan UBCSAND'ın performansını 1999 Adapazarı depreminde sıvılaşma kaynaklı oturmaya maruz kalmış gerçek bir vakaya ait analiz ile değerlendirmektir. Ayrıca, literatürde binaların sıvılaşma kaynaklı oturmalarını tahmin edebilen yeni bir yöntem ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Parametrik nümerik analizler ile UBCSAND modelinin performansının bir arazi deneyi olan SPT-N vuruş sayısının değişimine karşı çok hassas olduğu belirlenmiştir. Binaların depremler esnasında maruz kaldıkları oturma tiplerinden biri olan kayma mukavemeti yenilmesine bağlı zımbalama oturmalarının anlaşılmasında UBCSAND bünye modelinin faydalı olacağı sonucuna varılmıştır. Daha başka vaka analizleri ile benzer sonuçların elde edilmesine devam edilmektedir.

TEŐEKKÜR

Bu çalışmanın yazarları LIQUEFACT projesine ("Assessment and mitigation of liquefaction potential across Europe: a holistic approach to protect structures / infrastructures for improved resilience to earthquake-induced liquefaction disasters") desteklerinden dolayı teőekkür eder.

KAYNAKLAR

- Arel, E. and Önalp, A. (2012). "Geotechnical properties of Adapazarı silt". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71(4): 709-720.
- Bay, J. A. and Cox, B. R. (2001). "Shear wave velocity profiling and liquefaction assessment of sites shaken by the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake." PEER Proje Raporu SA3017 18336, Pacific Earthquake Engineering Research, Berkeley, CA.
- Beaty M.H. and Byrne P.M. (2011). "UBCSAND constitutive model version 904aR", Itasca
- Bray, J. D. and Macedo, J. (2017). "6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction induced building settlement". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102: 215-231.
- Galavi, V., Petalas, A. and Brinkgreve, R. (2013). "Finite element modelling of seismic liquefaction in soils". *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 44(3), 44(3): 55-64.
- Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura, K., Sawada, S., Erken, A. and Onalp, A. (2002). "Bedrock structure in Adapazarı, Turkey—a possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli earthquake". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 829-836.
- Ozcep, T., Ozcep, F. and Ozel, O. (2013). "V_{s30}, site amplifications and some comparisons: The Adapazarı (Turkey) case". *Physics and Chemistry of the Earth*, 63: 92-101
- Petalas, A. and Galavi, V. (2013). "PLAXIS liquefaction model UBC3D-PLM". PLAXIS.
- PLAXIS (2017). "PLAXIS liquefaction model UBC3D-PLM".
- Robertson, P.K. (2009). "Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach". *Canadian Geotechnical Journal*. 27(1): 151-158.
- Sancio, R. B. (2003). "Ground failure and building performance in Adapazarı, Turkey". PhD Thesis, University of California, Berkeley.