



SIVILAŞMA KAYNAKLI OTURMALARIN AZALTILMASINDA ÜST DOLGU TABAKASININ ETKİSİ: BİR VAKA ANALİZİ

Merve AKBAŞ^{1*}, Ozan SUBAŞI², Zeynep KAYGUSUZ³, Recep İYİSAN¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
² Türk Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
³ Temeltaş Teknik Yapı A.Ş., İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Sıvılaşma,
Oturma,
PM4Sand,
Ishihara Kriteri,
İyileştirme.*

Öz

Zemin tabakalarının cinsi, geoteknik özellikleri ve dinamik davranışı ile deprem özelliklerine bağlı olarak meydana gelen sıvılaşma, depremler sırasında mühendislik yapıların davranışı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilecek zemin kaynaklı başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Sıvılaşma kaynaklı oturmalar doğruyu yansıtmayacak şekilde öngörülmeli ve gerekmesi durumunda yapılan mühendislik çalışmaları ile ekonomik ve kontrol edilebilir olduğu kanıtlanabilen uygun bir iyileştirme yöntemi seçilerek önlem alınmalıdır. Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyeli olan bir sahada meydana gelecek sıvılaşma kaynaklı oturmaları sınırlandırmak amacıyla Ishihara kriteri dikkate alınarak sıvılaşan tabaka üzerine belirli kalınlıkta bir mühendislik dolgu tabaka inşası önerilmiş ve iyileştirme sonrası sıvılaşma kaynaklı oturmalarda meydana gelen değişimler kum zemin tabakalarının dinamik davranışının PM4Sand Bünye Modeli ile tamamlandığı sayısal analizler ile incelenmiştir. Ayrıca iyileştirme öncesi sıvılaşma kaynaklı meydana gelecek oturma değerleri farklı yarı-ampirik bağıntılar ile de hesaplanmış ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak en uygun yarı-ampirik bağıntı belirlenmiştir. Yapılan çalışmanın yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemlerine bir alternatif olacağı ve sıvılaşan tabaka üzerine sıvılaşmayan tabaka inşası ile zemin iyileştirmesinin maliyet etkin tasarımı için örnek bir mühendislik uygulama sağlayabileceği düşünülmektedir.

THE EFFECT OF TOP FILLING LAYER ON REDUCTION OF LIQUEFACTION-INDUCED SETTLEMENT: A CASE STUDY

Keywords

*Liquefaction,
Settlement,
PM4Sand,
Ishihara Criterion,
Improvement.*

Abstract

The type of soil layers, their geotechnical properties, dynamic behavior, and liquefaction occurs due to earthquake characteristics are among the main soil-related factors that may have negative effects on the behavior of engineering structures during earthquakes. Liquefaction-induced settlements should be predicted to reflect the truth, and an appropriate improvement method that can be proven to be economical and controllable with engineering studies should be selected and measures should be taken. In this study to limit the liquefaction-induced settlements, it is proposed to construct an engineering fill layer of a certain thickness on the liquefied layer, considering the Ishihara criterion, and the changes in the liquefaction-induced settlements after the improvement were investigated by numerical analysis in which the dynamic behavior of the sand soil layers was completed with the PM4Sand Constituent Model. In addition, liquefaction-induced settlements before the improvement were also calculated with different semi-empirical relations and compared with the numerical analysis results, the most appropriate semi-empirical correlation was determined. It is thought that the study will be an alternative to the commonly used improvement methods and can provide an exemplary engineering practice for the cost-effective design of soil improvement with the construction of a non-liquefied layer on the liquefied layer.

* İlgili yazar / Corresponding author: akbasm@itu.edu.tr, +90-539-575-82-26

Alıntı / Cite

Akbas, A., Subaşı, O., Kaygusuz, Z., İyisan, R., (2023). Sıvılaşma Kaynaklı Oturmaların Azaltılmasında Üst Dolgu Tabakasının Etkisi: Bir Vaka Analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 126-144.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Akbaş, 0000-0001-8466-2463
O. Subaşı, 0000-0001-6931-0590
Z. Kaygusuz, 0000-0002-2571-2309
R. İyisan, 0000-0002-0887-9983

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	13.09.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.10.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.10.2022
Yayın Tarihi / Published Date	27.03.2023

The Effect of Top Filling Layer on Reduction of Liquefaction-Induced Settlement: A Case Study

Merve AKBAŞ^{1†}, Ozan SUBAŞI², Zeynep KAYGUSUZ³, Recep İYİSAN¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Türk Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Temeltaş Teknik Yapı A.Ş., İstanbul, Türkiye

Highlights

- Analysis of liquefaction potential and liquefaction induced settlements by numerical methods
- Examination of liquefaction potential and liquefaction-induced settlements by semi-empirical methods
- Application of soil improvement with fill without liquefaction potential

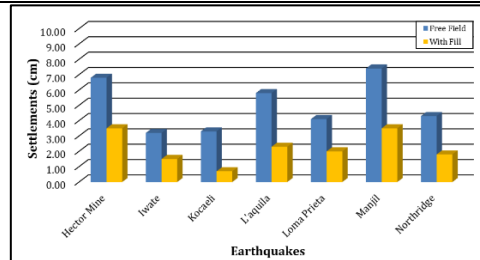
Graphical Abstract

Figure. Liquefaction-induced settlements before and after fill construction

Purpose and Scope

The liquefaction potential was determined according to the Turkish Building Earthquake Code (TBDY), which entered into force in our country in 2019, by using the data obtained from borings, field and laboratory test results in the settlement area of an industrial building planned to be built within the borders of Bursa province.

Design/methodology/approach

The analysis based on the SPT results shows that it is not sufficient to determine only the factor of safety against liquefaction and that liquefaction-induced settlements may also cause structural damage. For this purpose, an engineering fill layer with an average thickness of 3.0 m was proposed on the ground surface. The suitability of the proposed method was investigated by numerical analyses performed with PM4Sand Constitutive Model under strong ground motions with different acceleration and frequency content.

Findings

This study proposes the construction of a non-liquefiable fill layer of appropriate thickness on the ground surface in order to reduce the settlement values that may occur in soils with liquefaction potential when subjected to earthquake loads. It was determined that the settlement values decreased by 44~73% depending on the earthquake acceleration and that the pore water pressure ratio and liquefaction-induced settlements remained within the allowable limits even in earthquakes with high acceleration.

Research limitations/implications

[†] Corresponding author: akbasm@itu.edu.tr, +90-539-575-82-26

The results obtained are valid for the thickness and characteristics of the fill layer determined by the design earthquake depending on the geotechnical properties and geographic location of the site. Accordingly, it is clear that the appropriate fill layer thickness should be determined by using the parameters obtained from field and laboratory studies at sites located in different geographical locations.

Practical implications

It is considered that the study will be an alternative to the commonly used remediation methods and may provide an example of engineering practice for the cost-effective design of ground improvement by constructing a non-liquefiable embankment layer over the liquefied layer.

Originality

The construction of an engineering fill and its behaviour against liquefaction are investigated by both numerical and semi-empirical methods and it is presented that the fill can be an alternative soil improvement method to reduce liquefaction induced settlements.

1. Giriş (Introduction)

Dünya üzerinde meydana gelen depremler yerel zemin koşulları, deprem kaynak özellikleri ve üstyapı performans özelliklerine bağlı olarak mühendislik yapılarında ciddi hasarlara neden olmaktadır. Deprem kaynak ve üst yapı özelliklerinin etkisi uzunca bir süredir bilinse de zemin mekaniği alanında yapılan çalışmaların son yüzyılda gelişme göstermesi nedeniyle zemin tabakalarının dinamik davranışı ve geoteknik özelliklerinin, depremin neden olduğu hasarın büyüklüğüne ve dağılımına olan etkisi yakın geçmişte anlaşılmaya başlanmıştır (Demiroz ve Yıldız, 2021; Pribadi vd., 2021). İnşaat mühendisliği yapılarında oluşan hasarlar ve bu hasarların bölge içindeki dağılımları incelendiğinde, büyük bir çoğunluğunda yerel zemin koşullarına bağlı bir etki söz konusu olup, kuvvetli yer hareket sırasında boşluk suyu basıncının artması ve buna bağlı olarak efektif gerilmenin azalması ile zeminin mukavemetini yitirmesi olarak tanımlanan zemin sıvılaşmasının önemli can ve ekonomik kayıplara neden olduğu anlaşılmaktadır (Theodoulidis vd., 2014; Álamo vd., 2022). Aktif bir deprem kuşağı içerisinde yer alan ülkemizde de geçmiş yıllarda meydana gelen depremlerde mühendislik yapılarında ciddi hasarlar oluşmuştur. Bu nedenle sıvılaşmaya duyarlı bir sahada sıvılaşma tehlikesinin azaltılması, bu tür yerlerde yapıların planlanması ve inşası inşaat mühendisleri açısından önemli bir görevdir (Tosun, 2015; Dogan vd., 2021; Gurbuz vd., 2022).

Sıvılaşma olayı depremler esnasında aşırı boşluk suyu basıncının artması sonucunda önemli oturmalara, çok az eğimli arazilerde bile yanal yayılmalar ve akma gibi şekil değiştirmelere ve göçmelere neden olabilmektedir (Holzer ve Youd, 2007; Carey vd., 2017). Sıvılaşma nedeniyle meydana gelebilecek hasarları azaltmak için, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin ve neden olabileceği deformasyonların doğru bir şekilde hesaplanması ve üstyapı tasarımında değerlendirilmesi gerekmektedir. Sıvılaşma kaynaklı oturmaların tahmin edilebilmesi için geoteknik deprem mühendisliğinde kullanılan birçok numerik ve ampirik yöntem mevcuttur. Ampirik yaklaşımlarda, laboratuvar deneyleri ve arazi incelemelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda önerilen korelasyonlar kullanılırken, numerik yöntemlerde matematiksel modellerle ifade edilen sıvılaşma davranışı genellikle sonlu elemanlar veya sonlu farklar metotları kullanılarak analiz edilmektedir (Zhang vd., 2004; Gong vd., 2016; Subasi vd., 2021). Ampirik yöntemlerde laboratuvar ve arazi çalışmaları birlikte değerlendirilerek sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ve tekrarlı gerilme oranı (CSR) ile SPT-N sayıları arasındaki ilişkilere dayanan grafiksel çözümler önerilirken, numerik yöntemlerde genellikle, arazi şartları ile benzer zemin kesitleri oluşturularak tabakaların doğrusal olmayan dinamik davranışının ve pekleşmesinin göz önüne alındığı bünye denklemleri ile analizler gerçekleştirilmektedir (Hanna vd., 2008; Huang vd., 2008; Cetin vd., 2018). Günümüze kadar gelen süreçte sıvılaşma davranışını modellemek için önerilen ve temeli laboratuvar deney sonuçları ve bu sonuçlardan elde edilen korelasyonlara dayanan tek boyutlu dinamik analiz yöntemlerinin, yarı sonsuz, homojen doğrusal elastik kabul edilen malzemeler için frekans tanım aralığında uygulanmasının yeterli olduğu düşünülse de zaman içerisinde, yapılan tek boyutlu dinamik analizlerin yetersizliği gözlenmiştir (Tolon, 2013). Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte, zemin mekaniği ve geoteknik deprem mühendisliği alanında arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek oluşturulan zemin kesitleri, kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak yapılan analizler yardımıyla zemin dinamik davranışı anlaşılmaya çalışılmış ve zeminlerin doğrusal olmayan (nonlinear) davranışının zaman tanım alanında çalışan iki ve üç boyutlu dinamik analizlerle modellenmesinin gerçeği daha iyi yansıttığı belirtilmiştir. Böylece depremin etkilediği sahada zeminden mühendislik yapısına gelen etkiler ve zemin yüzeyinde meydana gelebilecek deplasmanlar gerçeğe daha yakın bir şekilde öngörülebilmektedir (Hashash vd., 2010).

Sıvılaşma potansiyeline sahip bir zeminde meydana gelebilecek sismik oturmalarından kaynaklanabilecek problemlere karşı yapının inşasından önce gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Gevşek suya doygun siltli kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeli olduğu göz önüne alınarak titreşim ya da deplasman yoluyla sıkıştırılması

veya bağlayıcı bir katkı malzemesinin zemin ile karıştırılarak zeminin taşlaşdırılması en çok tercih edilen zemin iyileştirme yöntemleri arasındadır (Moayed ve Naeini, 2012; Haung ve Wen, 2015). Fakat sıvılaşma potansiyeline sahip zemin tabakasının derinliği ve zemin iyileştirmesi yapılacak sahanın yüzölçümü arttıkça bu yöntemlerin ekonomiklik ve imalat kalite güvenliği bakımından uygulanabilirliğinde sakıncalar ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca sıvılaşma riskine karşı alınan önlemler kapsamında uygulanacak iyileştirme yöntemlerinin seçilmesi ve uygulama kriterlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi sahada uygulamanın doğru olarak yapılmasında büyük önem taşımaktadır. Şimdiye kadar elde edilen bulgulardan sıvılaşmanın zeminin yaklaşık ilk 20 m derinlik içinde meydana geldiği ve çeşitli kriterlere göre sıvılaşabilir olduğu belirlenen zeminlerin bulunduğu kesitlerin bazılarında yapı hasarı gözlenirken bazılarında gözlenmediği tespit edilmiştir (Nicholson, 2014; Patel, 2019). Ishihara Kriteri olarak adlandırılan yaklaşımda sıvılaşabilir tabakalar üzerinde yeterli kalınlıkta sıvılaşmayan bir tabakanın bulunması durumunda, alttaki zeminlerde sıvılaşma oluşsa dahi üst yapıda herhangi bir hasara neden olmayacağı öngörülmektedir. Kısacası bu yöntem ile sıvılaşabilir tabakanın üzerinde sıvılaşmayı önleyecek ve yeterli düzeyde efektif gerilme sağlayacak kalınlıkta bir tabakanın bulunup bulunmadığı denetlenmektedir (Ishihara, 1985).

Bu çalışmada Bursa ili sınırları içinde yapılması planlanan ve yaklaşık 150 dönüm alana yayılan bir sanayi yapısının yerleşim sahasında yapılan sondajlar, arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak 2019 yılında ülkemizde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY) göre sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Yapı güvenliği ve kullanılabilirliği açısından büyük bir önem teşkil eden sıvılaşma nedeniyle meydana gelebilecek oturmalar ise ilk olarak ampirik yaklaşımlar ile belirlenmiştir. Ayrıca, sıvılaşabilen kum zemin tabakalarının dinamik davranışını ampirik yöntemlere kıyasla daha gerçekçi bir şekilde modellemek için, gerilme oranı kontrollü, kritik durum teorisi ile uyumlu ve iki boyutlu plastisite teorisine dayanan bünye denklemlerinden oluşan PM4Sand Bünye Modeli kullanılarak oluşturulan iki boyutlu zemin modeli üzerinde sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde, kuvvetli yer hareketi etkisi altında zemin kesitinde zamana bağlı olarak meydana gelen değişimler, sıvılaşma davranışı ve deformasyonlar, plastik hacimsel şekil değiştirmelerle ilişkilendirilerek elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise elde edilen sonuçlar değerlendirilerek geniş bir alana yayılı sahanın uygun ve ekonomik bir yöntemle iyileştirmesi amacıyla Ishihara Kriterleri dikkate alınarak yapı temellerinin altına tüm sahayı kapsayacak şekilde ortalama kalınlığı 2.5 m olan bir mühendislik dolgusu imalatı önerilmiştir. İyileştirme sonrası oluşabilecek oturmaların izin verilen sınırlar içerisinde kalıp kalmadığını belirlemeyebilmek için PM4Sand Bünye Modeli ile gerçekleştirilen numerik analizler tekrarlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kuvvetli yer hareketi sırasında suya doymuş gevşek kumlu zemin tabakalarında, boşluk suyu basıncındaki ani artış nedeniyle meydana gelen sıvılaşma olayı, zemin tabakalarında büyük deformasyonlara yol açmakta ve mühendislik yapılarında ciddi hasarlara neden olmaktadır. 1964 yılında Alaska'da Good Friday ve aynı yıl Japonya'da meydana gelen Niigata depremleri ile başlayan ve yakın zamanda 1999 Kocaeli, 2010, 2011 yıllarında Canterbury ve 2011, 2016'da Christchurch Depremleri sonucunda köprü ve yapı temellerinde meydana gelen büyük oturmalar sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı hasarların incelenmesi gerektiğini gözler önüne koymuştur (Makdisi, 2021).

Kuvvetli yer hareketi sırasında suya doymuş zeminlerde gözlemlenen sıvılaşma davranışının sayısal modellenmesi geoteknik deprem mühendisliğinin önemli araştırma konularından biridir. Zemin mekaniğinde sayısal modellemeler için toplam ve efektif gerilme olmak üzere iki yaklaşım kullanılmaktadır. Efektif gerilme yaklaşımı ise bütünlük ve bütünlük olmayan olmak üzere iki farklı çözüm yöntemine ayrılmaktadır (Ye vd., 2007; Wang vd., 2018). Bütünlük olmayan çözümde zemin-su etkileşimi ihmal edilerek, boşluk suyu basıncı ayrı bir gözenek basıncı modeli ile ayrı olarak hesaplanır. Çözüm belirli bir değere kadar iterasyon uygulanarak elde edilir. Bütünlük çözüm yönteminde ise boşluk suyu basıncı zemin iskeleti deformasyonuna bağlı olarak eş zamanlı olarak hesaplanmaktadır. Bütünlük çözüm yöntemlerinde diğerlerine göre zemin su etkileşimi daha gerçekçi bir şekilde modellenmektedir (Taiebat vd., 2007; Ntritsos ve Cubrinovski, 2020). Suya doymuş zeminlerin mekanik davranışı zemin iskeleti ile boşluklarda yer alan suyun etkileşimine dayanmaktadır. Dinamik yükleme sırasında bu etkileşimin etkisi daha belirgin bir şekilde görülmekte ve bunun sonucunda zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşmalar nedeniyle rijitlik kayıpları ve oturmalar gözlenmektedir. Bu nedenle sıvılaşma veya çevrimsel mobilite gibi karmaşık davranışları doğru bir şekilde modellemek için analizlerin bütünlük yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Zhang ve Wang, 2012; Manzari vd., 2014; Chiaradonna, 2022).

Günümüze kadar gelen süreçte sıvılaşma davranışını modellemek için önerilen bünye modellerinin temeli laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen korelasyonlara dayanmaktadır. Ishihara ve diğ., (1975) yılında yaptığı çalışmalar sonucunda efektif gerilme izi ile artık boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır. Aynı tarihlerde Seed ve diğ., (1975) laboratuvarında yükleme çevrim sayısı ile artık boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkiyi

inceleyerek kumlu zeminlerin sıvılaşma esnasındaki davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Tokimatsu ve Yoshimini, (1983) yılında yaptıkları çalışmalarla zeminlerde genleşme nedeniyle oluşan hacimsel şekil değiştirme ile yüklenme çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. İlerleyen yıllarda da pek çok laboratuvar çalışması gerçekleştirilerek sıvılaşma davranışının mekanizması ortaya çıkartılmaya çalışılmıştır (Tokimatsu ve Seed, 1984; Tokimatsu vd., 2019; Kumar vd., 2020). Bu çalışmalara ek olarak zeminin doğrusal olmayan dinamik davranışı ilk olarak CHARSOIL ile modellenmiştir (Streeter vd., 1974). Bu model zemin davranışını tek boyutta lineer veya nonlinear olarak hesaplayabilmektedir. İlerleyen yıllarda çeşitli programların geliştirilmesiyle sıvılaşma sırasında zeminde meydana gelen artık boşluk suyu basıncının oluşumu ve sönümlenmesi davranışı anlaşılma çalışılmış ve birçok araştırmacı tarafından çeşitli yazılımlar ve bünye modelleri geliştirilmiştir (Chen vd., 2021; Das ve Chakraborty, 2022). Son yıllarda ortaya çıkan ve sıvılaşma davranışının modellenmesinde kullanılan UBC3D-PLM, PDMY02 ve PM4Sand bünye denklemlerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Dafalias ve Manzari, 2004; Beaty ve Byrne, 2011; Boulanger ve Ziotopoulou, 2018).

Zemin sıvılaşması ve buna bağlı zemin deformasyonları, deprem durumunda yapılarda önemli bir hasar kaynağı olmuştur. Dünya genelinde sıvılaşmayı azaltmak için çeşitli zemin iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. %20'den fazla ince dane içeriğine sahip siltli kum tabakalarında uygulanacak iyileştirme yöntemlerinde sürşari yüküne sebep olan uygulamalar, temiz gevşek kumlu tabakalara kıyasla daha fazla avantaj sağlamakta ve dolgu gibi yüklemeler sonrası yapılan sıvılaşma analizleri, sıvılaşmaya karşı güvenlik faktöründeki iyileşmeyi doğrulamaktadır (Chafale ve Annam, 2022). Modern deprem şartnameleri sıvılaşma potansiyeline sahip sahalarda uygun bir yöntemle iyileştirme yapılmaksızın sığ temellerin kullanımına izin vermemektedir. Bununla birlikte, saha vaka çalışmaları ile deneysel ve teorik araştırmalardan elde edilen yeterli kanıtlar, sıvılaşma kaynaklı oturmaların yeterli boyutlara ve kayma mukavemetine sahip sıvılaşmayan bir doğal veya yapay olarak oluşturulmuş kalınlığı ve genişliği uygun olarak belirlen bir dolgu tabakası ile azaltılabileceğini göstermektedir (Adalier vd., 2003; Dashti vd., 2010; Bray ve Dashti, 2014). Dimitriadi ve diğ., (2018) ise yaptıkları çalışmada sıvılaşmayan tabakanın yapay olarak oluşturulduğu durumda bu tabakanın boyutlarının (kalınlık ve genişlik) sıvılaşma kaynaklı oturmalar ve zemin üzerindeki etkisini elasto-plastik dinamik analizler ile incelemiştir. Sonuç olarak yapay olarak oluşturulan sıvılaşmayan bir dolgu tabakası sayesinde sıvılaşma kaynaklı oturmaların azaldığını ve bu yöntemin zemin iyileştirmesinin maliyet etkin tasarımı için yol gösterici olabileceğini belirtmiştir.

Literatürde, bu çalışmaya konu olan Bursa ilinde sıvılaşma konusu üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde; şehir merkezine yakın bir noktada olabilecek büyük ölçekli bir depremde şehrin kuzey-doğu bölgesindeki suya doymuş kumlu zeminlerde sıvılaşma meydana gelebileceği ortaya konmuştur (Başarı vd., 2011). Ayrıca Başarı vd. 2011 tarafından yapılan çalışmada sıvılaşma analizlerinin yanı sıra suya doymuş kumlu zeminlerin deprem sonrası oturma tahminleri de yapılmış ve elde edilen oturma değerlerinin kabul edilen sınırların dışında kaldığı belirlenmiştir. Alver vd. (2021) ise yaptıkları çalışmada Bursa ilinde yapılması planlanan bir konut projesi için arazi zemin modeli oluşturmuş ve TBDY-2018'e göre sıvılaşma analizi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen analizler ile, yapı temelinin oturacağı seviyeden itibaren yaklaşık 5-23 m derinlikleri arasında bulunan orta sıkı kum ile az siltli kum tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayılarının 1.10 değerinin altında olduğu belirlenmiştir.

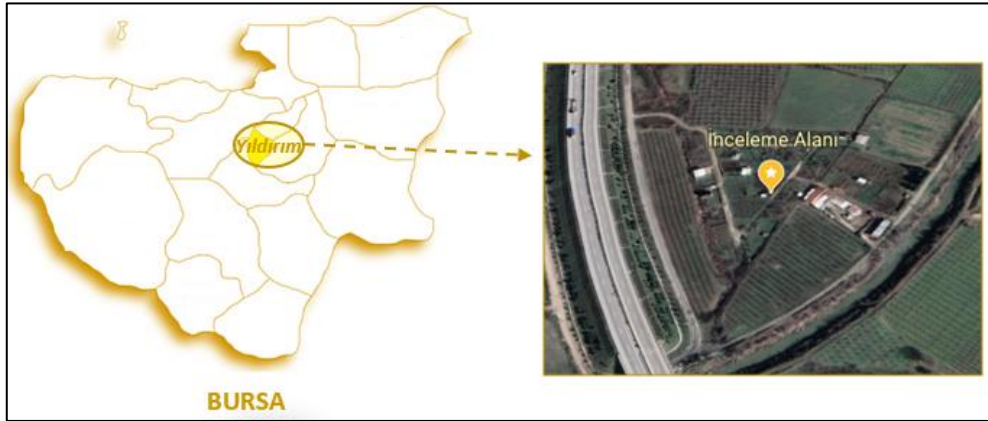
Bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmalardan farkı olarak kum tabakasının sıvılaşma davranışı PM4Sand bünye modeli plastik hacimsel şekil değiştirmelerle ilişkilendirilmiş, hacimsel genişleme sırasındaki dilatasyon, Bolton (1986) tarafından önerilen dilatasyon ilişkisi ile uyumlu olarak ele alınmış, gerilme oranı ve zemin yapısına bağlı olarak tanımlanan elastisite modülü kullanılmıştır. Böylece depremin etkilediği sahada zemin tarafından mühendislik yapısına gelen etkiler ve zemin yüzeyinde meydana gelebilecek deplasmanlar gerçeğe daha yakın bir şekilde öngörülebilmiştir. Ayrıca sismik oturmaların üstyapıda hasara neden olmasını engellemek amacıyla kullanılan yüksek modüllü kolonlarla doğrudan temel zemini iyileştirmesi veya derin temel sistemi seçimi gibi iyileştirme yöntemlerine alternatif bir uygulama ele alınmış; sıvılaşma potansiyeline sahip geniş bir sahada, uygun dane çapı dağılımına sahip nitelikli malzeme ile teşkil edilen mühendislik dolgusunun kullanıldığı bir uygulamanın sonuçları sunulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Uydu görüntüsü Şekil 1'de verilen çalışma sahası hafif eğimli olup nispeten düz bir topografyaya sahiptir. İnceleme konusu sahada sondaja dayalı zemin araştırmaları yapılmış, sondajlar sırasında Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) uygulanmış, numuneler alınmış ve numuneler üzerinde laboratuvarda sınıflandırma ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sahada sismik ölçümler kapsamında farklı doğrultuda çok kanallı yüzey dalgalarının analizi (MASW) çalışmaları, sondaj aralarında Koni Penetrasyon Deneyleri (CPT) ve açılan sondaj kuyularının 7 tanesinde Menard Pressiyometre Deneyleri (MPT) gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen arazi deney verileri kullanılarak sıvılaşma potansiyeli olduğu belirlenen sahada ilk olarak ampirik yaklaşımlar ile sıvılaşma kaynaklı oturmalar hesaplanmıştır. Sonrasında 7 farklı anakaya deprem kaydı ve

PM4Sand Bünye Modeli kullanılarak zemin tabakalarının dinamik davranışı 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sahada sıvılaşma kaynaklı oturmaların sınırlandırılması amacıyla Ishihara Kriteri dikkate alınarak zemin yüzeyinde imal edilecek mühendislik dolgusunun optimum kalınlığını belirlemek için analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda zemin yüzeyine kalınlığı 2.5 m olan bir mühendislik dolgusu imalatı önerilmiş ve yöntemin uygunluğu aynı deprem yüklemeleri altında incelenmiştir.



Şekil 1. Sahanın uydu görüntüsü (Satellite image of the field)

3.1. Genel Jeoloji Ve Yerel Zemin Koşulları (General Geology And Local Site Conditions)

Genel olarak bakıldığında inceleme alanı Kuvaterner yaşlı, kalınlığı değişken olan alüvyon tabakalardan oluşmaktadır. Kum, çakıl, silt ve kilden oluşan bir birikinti malzemesi olan alüvyon, derenin yatak değiştirmesi ve birikinti şartlarının değişmesi nedeniyle farklı litolojik özellikler göstermektedir. Alüvyon kalınlığı bölgesel olarak genelde 30~50 m arasında değişirken, Bursa ovasının orta ve doğu kesiminde 140-200 m'ye ulaşmaktadır. Ovanın güney kenarındaki dere ağızlarında ise alüvyon ile birlikte iri blok ve çakıllardan oluşan yamaç molozu birikinti konisi bulunmaktadır. Bu birimin altında ise kuzey-güney yönünde bir şerit halinde uzanan, çakıltaşı ile başlayan ve bunun üzerinde kumtaşı, marn ve kiltası ardalanmalı Neojen dönemine ait kalın bir kil tabakası yer almaktadır.

Bursa ve çevresi Türkiye'nin en aktif fay kuşaklarından biri olan sağ yönlü, doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay hattının güneybatı kolu üzerinde yer almaktadır. Bursa ve çevresinde şimdiye kadar olan depremler incelendiğinde bölgedeki en yıkıcı depremlerin 28 Şubat 1855 (Geliştirilmiş Mercalli Şiddeti: IX) ile 11 Nisan 1855 (Geliştirilmiş Mercalli Şiddeti: X) tarihlerinde gerçekleşirken; aletsel dönemde ise 29 Ekim 1909 tarihinde Bursa Yenişehir' de yüzey dalgası büyüklüğü M_s cinsinden 5.8, 13 Kasım 1948 ve 15 Nisan 1905 tarihlerinde Bursa Osmangazi ilçesinde yüzey dalgası büyüklüğü M_s cinsinden 5.6 büyüklüklerinde depremler meydana gelmiştir (Doyuran vd., 2000). İlgili sahada batıya doğru bir sıkışma sonucu, kuzey-güney doğrultulu bindirmeler ve doğu-batı doğrultulu normal faylarla kuzey-güney yönünde açılmaya başlamıştır. Batı Anadolu graben sisteminin etkisi altında olan bölgede İzmit Körfezi, İzmit, Gemlik, Yenişehir, Bursa, Manyas ve Saros gibi çok sayıda doğu-batı doğrultulu çöküntü havzaları vardır. Gemlik-Geyve arasındaki 100 km uzunluğa sahip fayın 7.6 büyüklüğünde deprem üretme potansiyeli bulunurken; 50 km uzunluğundaki Uluabat fayının 6.4 büyüklüğünde depremlere, 15 km uzunluğundaki Bursa fayının ise 6.0 büyüklüğünde depremlere neden olabileceği değerlendirilmektedir.

3.1.1. Zemin Kesiti Ve Arazi Deneyleri (Soil Profile And in-Situ tests)

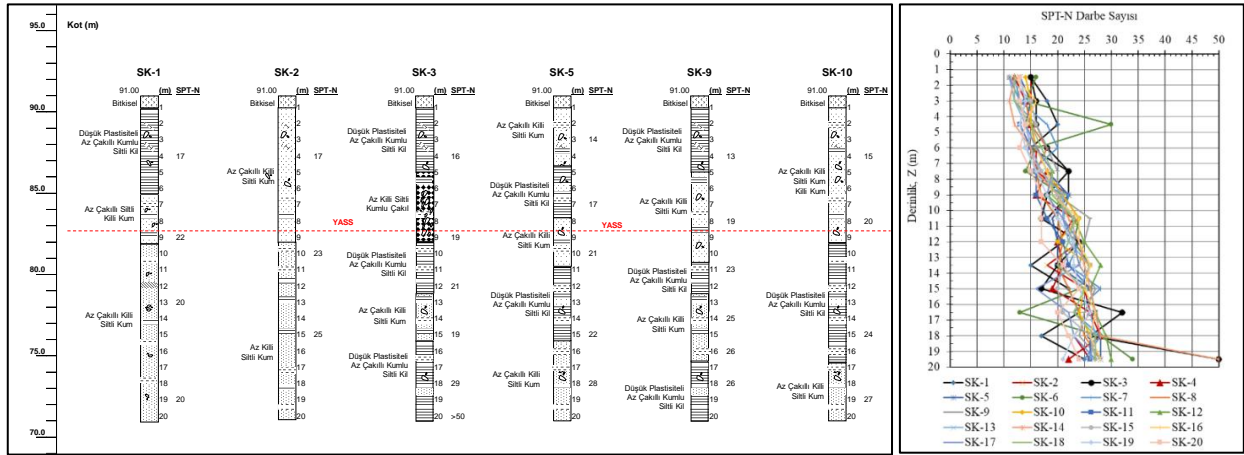
Zemin kesitinde yer alan tabakaların cinslerini, kalınlıklarını ve mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla yerleşimi Şekil 2'de verilen 20 adet zemin araştırma sondajı açılmıştır. Yapılan sondajlardan zemin kesitinin genel olarak bitkisel toprak, çakıllı killi kum ve kumlu kilden oluştuğu belirlenmiştir. Bitkisel örtü altında kahve renkli, çakıl ara bantlı, gevşek-orta sıkı, kötü derecelenmiş siltli kum yer yer ise kahve renkli, çakıl ara bantlı, katı-çok katı kıvamlı, düşük plastisiteli, az çakıllı kumlu siltli kil tabakası yer almaktadır. Sahada açılan sondajlardan yer altı su seviyesinin ortalama 8.0 m derinlikte olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapılan rezistivite deneylerinden bu derinlik doğrulanmıştır.

Zemin tabakalarının kıvamını ve yerleşim sıklıkları ile penetrasyon dirençlerini belirlemek üzere yapılan penetrasyon deneylerinde dolgu altında yer alan az çakıllı killi siltli kum tabakası içerisinde SPT-N sayıları yüzey ile yaklaşık 10.0 m derinliğe kadar 10~25 arasında değişmektedir. Sondaj logları incelendiğinde artan derinlik ile SPT-N değerlerinin görece artarak 25~35 arasında değerler aldığı ve bazı derinliklerde refü (>50) değerlerine kadar yükseldiği görülmektedir. Sondaj verileri kullanılarak çizilen tipik bir zemin kesiti, SPT-N sayılarının derinlikle değişimi ile birlikte Şekil 3'te verilmiştir.

Zemin kesitinde yer alan tabakaların gerilme-şekil değiştirme özelliklerini yerinde belirlemek amacıyla açılan sondaj kuyularından 7 tanesinde 3~18 m derinlikler arasında Menard Pressiyometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde; zeminde göçmeye neden olan yatay basınç olan limit basınç (P_L) belirlenmekte, bu değerden ölçülen başlangıç yatay gerilmesi çıkarılarak net limit basınç (P_L^*) elde edilmekte, gerilme hacim değiştirme grafiklerinden pressiyometre modülü (E_{MPT}) hesaplanmaktadır. Yapılan deneylerden net limit basınç $P_L^* = 710\sim 1410$ kPa olarak elde edilirken pressiyometre modülü ise yaklaşık $E_{MPT} = 8\sim 12$ MPa aralığında hesaplanmıştır.



Şekil 2. Sondaj yerleşim planı (Borehole location plan)



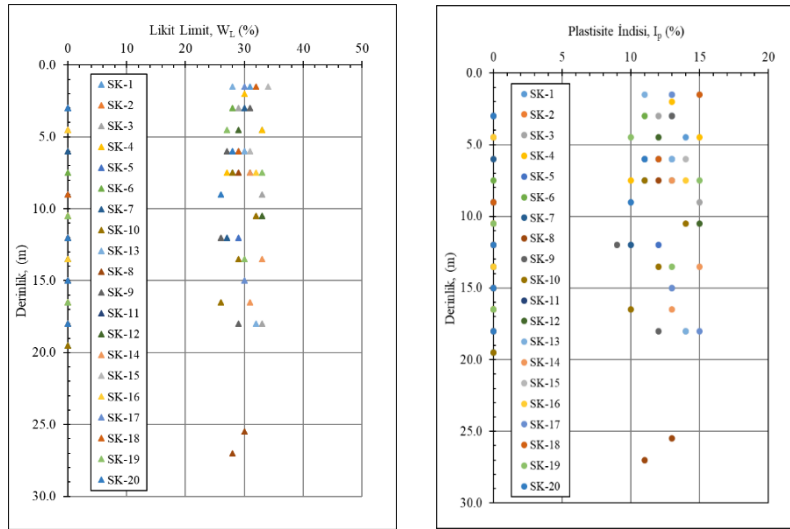
Şekil 3. Sondajlardan elde edilen tipik zemin kesiti ve SPT-N sayılarının derinlikle değişimi
(Typical soil profile based on borehole logs and variation of measured SPT N-values with depth)

Sahada 16 farklı noktada Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) yapılmış ve 20~42 m arasında penetrasyon sağlanmıştır. Deneylerde uç direnci (q_t), yüzeyle yaklaşık 10 m derinlik içinde 2~15 MPa arasında iken daha sonra derinlikle görece artış göstermekte ve genel olarak 5~35 MPa arasında değişmektedir. Sürtünme dirençleri ise (F_s) ortalama olarak 0.10 MPa elde edilmiş olup sürtünme oranı $R_f = F_s / q_t$, yaklaşık olarak %0~10 arasında değişmektedir. Zemin kesitinde yer alan tabakaların dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla ise 7 doğrultuda MASW sismik ölçümleri yapılarak alınan kayıtların analizi sonucunda sismik dalga hızları belirlenmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarından, yürürlükte olan deprem yönetmeliğinde tanımlanmış olan üst 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızı $V_{s30} = 260$ m/s olarak hesaplanmıştır. Sahada yapılmış çalışmalar, penetrasyon deneyleri ve sismik ölçümler beraber değerlendirildiğinde yerel zemin sınıfının ZD (Gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları) olarak alınması uygun görülmüştür.

3.1.2. Laboratuvar Deneyleri

İnceleme konusu sahada sondajlar sırasında alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri kapsamında yapılan dane çapı dağılımı analizi sonucunda numunelerin %0~54 çakıl, %25~97 kum ve %1~71 ince daneli malzeme (silt+kil) içerdiği belirlenmiştir. Killi birimlerin likit limiti $w_L = \%26\sim 34$, plastik limiti $w_p = \%16\sim 19$ ve plastisite indisi $I_p = \%9\sim 15$ arasında değişmekte olup, kumlu birimlerdeki ince daneli fraksiyon plastik olmadığı

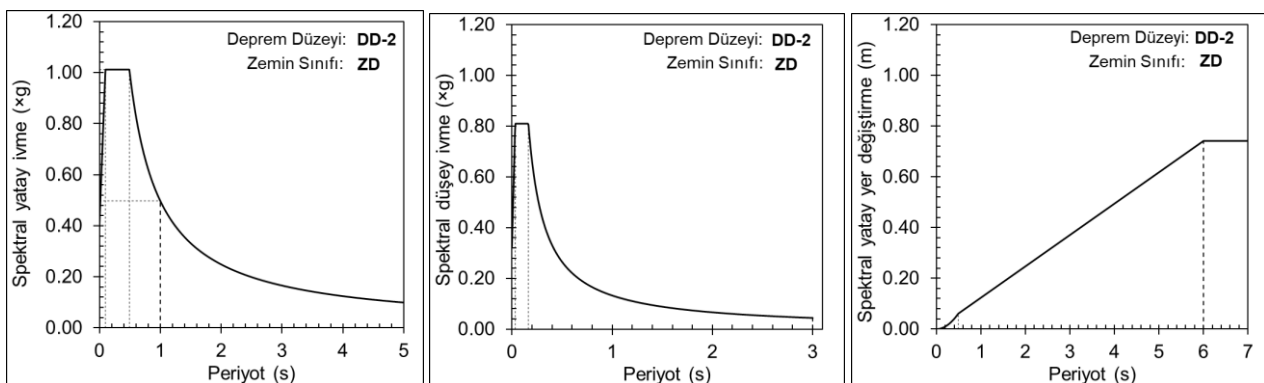
belirlenmiştir. Sınıflandırma deneyleri sonucunda numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre genel olarak düşük plastisiteli kil (CL), siltli kum (SM), killi kum (SC) (TS EN ISO 14688-2'ye göre CIL, SiSa, CiSa) sınıfında yer aldığı anlaşılmaktadır. Numunelerin likit limit ve plastisite indisi değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Sondajlardan alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinden kohezyon $c=4\sim 10$ kPa, kayma mukavemeti açısı $\phi=23\sim 27^\circ$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Likit limit ve plastisite indisinin derinlikle değişimi
(Variation of liquid limit and plasticity index with depth)

3.2. Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi (Evaluation of liquefaction potential)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY, 2018) göre, DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde (DD-2) Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})'nin $0.50 \leq S_{DS} < 0.75$ ve $0.75 \leq S_{DS}$ olduğu, Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, 1a, 2 ve 2a olan binalar için; ZD, ZE veya ZF grubuna giren zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi gerekli kılınmaktadır. Yine aynı yönetmeliğe göre zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz veya düşük kohezyonlu zeminlerin, deprem yükleri altında boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle kayma mukavemeti yani taşıma gücü ve rijitliğindeki azalış olarak tanımlanmaktadır. Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı suyunun altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olup; zemin cinsi, yeraltı su seviyesi, yer ivmesi, dane çapı dağılımı, rölatif sıkılık, ince dane oranı ve plastisite gibi birçok faktör sıvılaşmaya etki etmektedir. Sıvılaşma analizlerinde genel olarak zemin kesitinde dikkate alınan bir derinlik için zeminin sahip olduğu sıvılaşma direnci (τ_R) ile depremin o derinlikte üreteceği kayma gerilmesi (τ_{dep}) karşılaştırılmaktadır. Bu değerlerin oranı ise sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı $G_s = \tau_R / \tau_{dep}$ olarak tanımlanmakta ve $G_s > 1.1$ olması durumunda ise sıvılaşma potansiyelinin olmadığı kabul edilmektedir. İnceleme konusu sahanın coğrafi konumu ile, yapılan arazi penetrasyon, sismik ve laboratuvar deney sonuçları dikkate alındığında bir tasarım depremi altında yapıya etkiyecek dinamik kuvvetlerin hesabında kullanılacak tasarım ivme spektrumlarının belirlenmesinde yerel zemin sınıfı ZD olarak kabul edildiğinde, Türkiye Deprem Tehlike Haritalarından yararlanılarak DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için en büyük yer ivmesi $PGA=0.370$ g, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı $S_{DS}=1.012$ olarak elde edilmiştir. Elastik tasarım spektrumları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Elastik tasarım spektrumları (Elastic design spectrums)

Sıvılaşma direncinin hesaplanması için TBDY, 2018'de SPT sonuçlarına göre önerilen yöntem kullanılmıştır. Tasarım depreminin moment büyüklüğü $M_w=7.5$ ve yukarıda verilen kısa periyod spektral ivme katsayısı ile yapılan hesaplamalarda ilgili derinlikte zeminin sıvılaşmaya karşı direnci (τ_R), SPT-N darbe sayılarına bağlı olarak tekrarlı kayma gerilmesi oranından elde edilmiştir. Belirli bir derinlikte düşey efektif gerilmeye (σ_{v0}') ve tekrarlı gerilme oranına (CSR) göre zeminin sahip olduğu kayma direnci ile aynı derinlikte depremin neden olacağı kayma gerilmesi (τ_{dep}) aşağıda verilen Bağıntı (1)-(12) ile hesaplanmış ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayılarının derinlikle değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

$$\tau_R = CRR_{M=7.5} C_M \sigma_{v0}' \quad (1)$$

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (2)$$

$$CRR_{M=7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad (4)$$

$$\alpha = 0 ; \beta = 1 \quad (IDO \leq \%5) \quad (5)$$

$$\alpha = \exp \left[1.76 - \left(\frac{190}{IDO^2} \right) \right] ; \beta = 0.99 + \frac{IDO^2}{100} \quad (\%5 < IDO \leq \%35) \quad (6)$$

$$\alpha = 5.0 ; \beta = 1.2 \quad (IDO \geq \%35) \quad (7)$$

$$\tau_{dep} = 0.65 \sigma_{v0} (0.4S_{D5}) r_d \quad (8)$$

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad z \leq 9.15m \quad (9)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15m < z \leq 23m \quad (10)$$

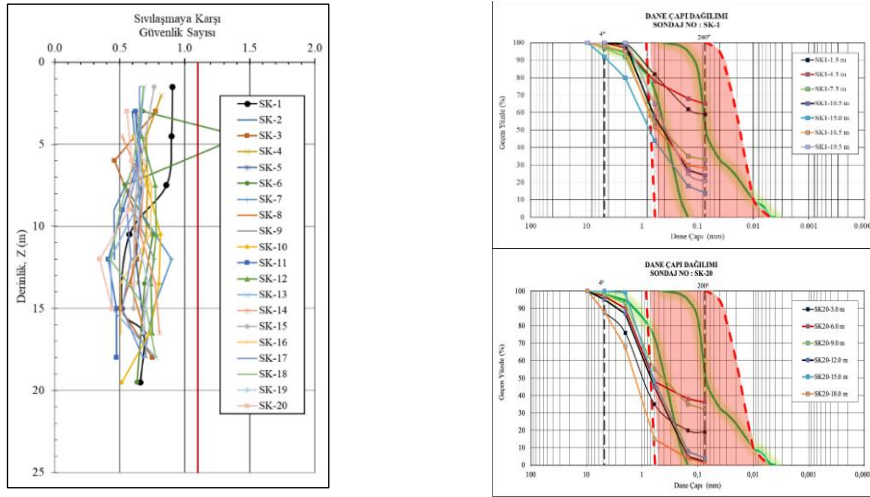
$$r_d = 0.744 - 0.008z \quad 23m < z \leq 30m \quad (11)$$

$$r_d = 0.50 \quad z > 30m \quad (12)$$

Bağıntılarda $CRR_{M=7.5}$ moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen dinamik dayanım oranını, C_M tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısını ve r_d ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını, σ_{v0} ve σ_{v0}' sırasıyla sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam ve efektif düşey gerilmeyi, $N_{1,60}$, α , β ve $N_{1,60f}$ ise sırasıyla düzeltilmiş SPT-N darbe sayısını, ince dane oranına (IDO) göre SPT-N düzeltme katsayılarını ve ince dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT-N vuruş sayısını göstermektedir.

SPT-N darbe sayısına bağlı olarak yapılan klasik sıvılaşma analizlerinde, dikkate alınan yer ivmesi altında sahada sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları Şekil 6'dan da görülebileceği üzere $G_s < 1.1$ olup yaklaşık 0.4 ila 0.9 arasında değişmektedir. Bu değerler sahada bir sıvılaşma potansiyelinin olduğuna işaret etmektedir. Ancak inceleme konusu sahada zemin kesitinde üstteki bitkisel örtü altında sondaj sonuna kadar ardalanmalı olarak devam eden az çakıllı siltli kum-killi kum ve düşük plastisiteli kumlu siltli kil tabakalarında, yüzeyden yaklaşık 8.0 m derinlikte bulunan yer altı su seviyesi üstündeki sıvılaşma beklenmemektedir. Ayrıca zeminleri oluşturan malzemelerin dane çapı dağılımı, sıvılaşma potansiyelini belirlemede önemli bir faktör olmaktadır. Arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak Iwasaki (1986) tarafından yapılan çalışmada sıvılaşmaya karşı hassas zeminlerin dane çapı dağılımının alt ve üst sınırları belirlenmiş, dane çapı dağılımında ortalama dane çapının $D_{50}=0.10 \sim 0.20$ mm ve efektif dane çapının $D_{10}=0.01 \sim 0.05$ mm olması durumunda zeminin sıvılaşmaya karşı hassas olduğu ortaya konulmuştur. Örnek teşkil etmesi açısından sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle belirlenen dane çapı dağılımları, sıvılaşan zeminlere ait dane çapı dağılımlarının alt ve üst sınırları ile birlikte iki sondaj için yine Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere numunelerin dane çapı dağılımları sıvılaşan zeminlere ait dane çapı dağılımlarının alt ve üst sınırlarının kısmen içerisinde olup, sıvılaşmaya hassas zeminlerin dane çapı kriterleri de kısmi olarak sağlamaktadır.

SPT-N darbe sayısına bağlı olarak yapılan klasik sıvılaşma analizlerinde sıvılaşmaya karşı güvenlik sayılarının yeterli düzeyde olmaması ve sıvılaşma potansiyelinin olduğuna işaret etmektedir. Bu durumda yürürlükte bulunan yönetmelik hükümleri gereğince zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin dikkate alınması gerekli olmaktadır. Oturmaların izin verilen sınırların dışında olması ve bu oturmaların yapısal hasara yol açma olasılığının bulunması durumunda temel zemininde önlem alınması gerekmektedir.



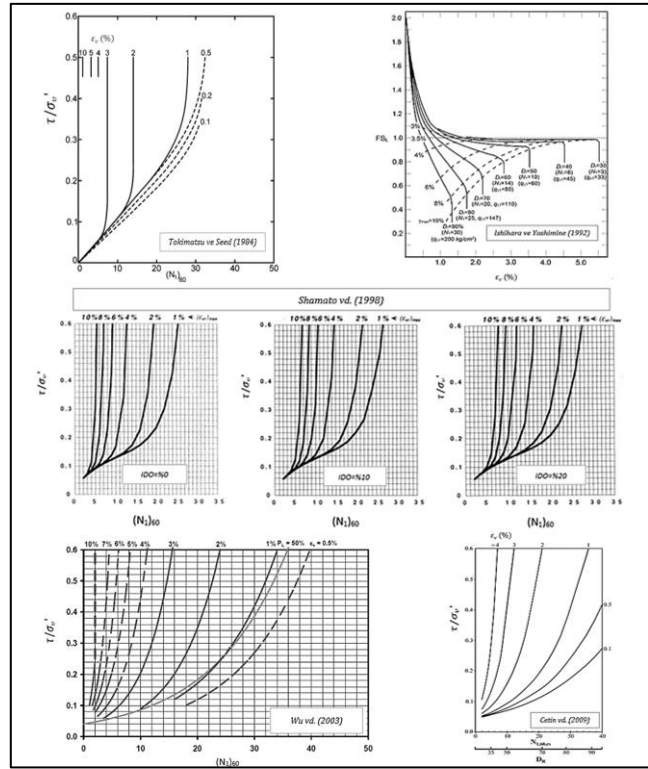
Şekil 6. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının derinlikle değişimi ve dane çapı dağılımları
(Variation of safety factor against liquefaction with depth and grain size distributions)

3.3. Sıvılaşma kaynaklı oturmaların ampirik yaklaşımlar ve sayısal analizlerle belirlenmesi (Determination of liquefaction-induced settlements by empirical approaches and numerical analysis)

Sıvılaşma kaynaklı oturmaların tahmin edilebilmesi için geoteknik deprem mühendisliğinde kullanılan numerik ve ampirik olmak üzere birçok farklı yöntem mevcuttur. Ampirik yaklaşımlarda, laboratuvar deneyleri ve arazi incelemelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda önerilen korelasyonlar kullanılırken, numerik yöntemlerde matematiksel denklemlerle ifade edilen sıvılaşma davranışı genellikle sonlu elemanlar veya sonlu farklar metodları kullanılarak analiz edilmektedir. Ampirik yöntemlerde sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ve tekrarlı gerilme oranının (CSR) ile SPT-N sayıları arasındaki ilişkilere dayanan grafiksel çözümler önerilirken, sayısal yöntemlerde ise zemin tabakalarının doğrusal olmayan dinamik davranışının ve pekleşmesinin göz önüne alındığı bünye denklemleri ile analizler gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ilgili sahada sıvılaşma nedeniyle oluşması beklenen oturmalar önce ampirik yaklaşımlar ile sonrasında iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayanan sayısal analizlerle belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3.1. Ampirik Yaklaşımlar (Empirical approaches)

Sıvılaşma kaynaklı oturmaların ampirik yaklaşımlar ile belirlenmesinde literatürde birçok kaynak bulunmaktadır. Tokimatsu ve Seed (1984), Ishihara ve Yoshimine (1992), Shamato vd. (1998), Wu vd. (2003) ile Çetin vd. (2009) tarafından önerilen yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde sıvılaşma sonrası oturma, hacimsel birim şekil değiştirme değerlerinin derinlik üzerinden integrali alınarak hesaplanmaktadır. Pratik kullanımı mümkün ilk çalışma olan Tokimatsu ve Seed yöntemi ile tekrarlı yüklemeye sonrası düzeltilmiş SPT-N ve tekrarlı gerilme oranına ($CSR = \tau_R / \sigma'_v$) bağlı olarak hacimsel birim deformasyonlar tahmin edilebilmektedir. Ishihara ve Yoshimine yöntemi ise sıvılaşma sırasındaki hacimsel birim şekil değiştirmeler (ϵ_v), SPT-N, rölatif sıkılık (D_r) ve sıvılaşmaya karşı hesaplanmış güvenlik sayısı (G_s) arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Shamato vd. yönteminde sıvılaşma sonrası oturma tahmininde ince dane oranı da (IDO) dikkate alınırken; Wu vd., Çetin vd. yöntemlerinde SPT-N ve tekrarlı gerilme oranı-CSR ile ilişkilendirilerek tekrarlı yüklemeye sonrası hacim birim deformasyonları tahmin edilmektedir. Bu yöntemlere ait ilişkiler grafik olarak Şekil 7'de verilmiştir.



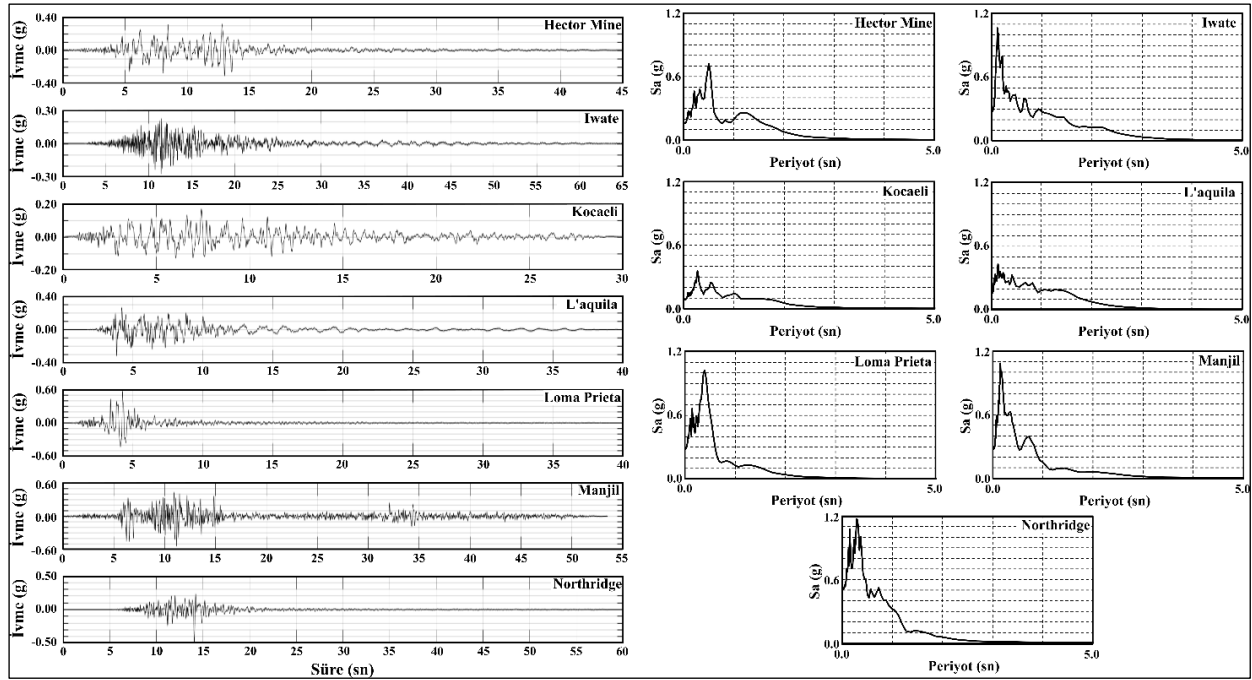
Şekil 7. Ampirik yöntemler ile sıvılaşma kaynaklı oturma hesabında kullanılan grafikler
(The graphs used for liquefaction-induced settlement with empirical method)

3.3.2. Sayısal Analizler (Numerical Analysis)

Sayısal analizler kapsamında bölgeyi etkileyecek farklı ivme ve frekans içeriğine sahip depremlerde oluşabilecek oturmaların belirlenmesi amacıyla kum tabakalarının dinamik davranışını modelleyen, gerilme oranı kontrollü, kritik durum teorisi ile uyumlu ve iki boyutlu plastisite teorisine dayanan bünye denklemlerinden oluşan PM4Sand Bünye Modeli kullanılmış, farklı kuvvetli yer hareketi altında mevcut durumda ve zemin yüzeyine dolgu inşaatı sonrasında sıvılaşma kaynaklı oturmalar elde edilmiştir. Başlangıç gerilme koşulları ise “Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSS)” bünye denklemleri ile belirlenmiştir. Bölgenin depremselliği dikkate alınarak hedef tasarım ivme spektrumuna uygun ve anakaya üzerinde alınmış yedi farklı ivme-zaman kaydı seçilmiştir. Kuvvetli yer hareketi kayıtları seçilirken fay mekanizmaları, süre (T), moment büyüklüğü (M_w), maksimum ivme (PGA), depremin hakim frekansı (f_{eq}), arias şiddeti (I_a), karakteristik şiddet (I_c) ve kümülatif mutlak hız (CAV) parametrelerinin farklılık göstermesine dikkat edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)’da yer alan gerçek kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılmıştır. Kuvvetli yer hareketi kayıtlarına taban (baseline) düzeltmesi yapılmış ve Butterworth yöntemine göre 0.5-15 Hz arasında bandpass filtreleme uygulanmıştır. Analizlerde kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının özellikleri Tablo 1’de, ivme-zaman geçişleri ise Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kuvvetli yer hareketi özellikleri (Strong ground motion properties)

No	Deprem Adı	Kırılma Mekanizması	V_{s30} (m/s)	Süre (s)	M_w	PGA (g)	f_{eq} (Hz)	I_a (m/s)	I_c	CAV (m/sec)
1	Hector Mine	Doğru Atımlı	726	45.0	7.13	0.31	1.82	1.80	0.077	11.35
2	Iwate	Ters	826	65.0	6.90	0.27	0.59	1.10	0.048	11.10
3	Kocaeli	Doğru Atımlı	811	30.0	7.51	0.17	1.93	0.53	0.034	6.55
4	L'aquila	Normal	717	40.0	6.30	0.31	0.59	1.05	0.053	8.58
5	Loma Prieta	Ters Oblik	1428	40.0	6.93	0.56	2.69	1.63	0.074	6.92
6	Manjil	Doğru Atımlı	724	53.5	7.37	0.53	2.93	4.31	0.142	21.91
7	Northridge	Ters	706	60.0	6.69	0.50	4.25	1.05	0.048	7.55



Şekil 8. Analizlerde kullanılan depremlerin ivme-zaman kayıtları ve spektral ivmeler
(Acceleration-time history records and spectral acceleration of earthquakes used in the analysis)

Sayısal analizler için sondajlar ve laboratuvar deney sonuçları kullanılarak bir zemin modeli ve model parametreleri oluşturulmuştur. Kum zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu ilk 20 metrelik derinlik göz önüne alınarak modelin düşey uzunluğu 20 m olarak belirlenmiş ve kum tabakasının altına, kuvvetli yer hareketi kaydını modele etkitebilmek için TBDY'e göre yerel zemin sınıfı ZB olan 1.0 m kalınlığında mühendislik taban kayası tanımlanmıştır. Modelin yatay uzunluğu 100 m olarak seçilmiş ve sınır şartları ile uygunluk göstermesi için her iki tarafa 1.0 m kalınlığında kum zemin tabakası ile benzer özelliğe sahip drenajlı tabakaları tanımlanmıştır. Bilindiği üzere deprem girdi hareketi hem yukarı hem de aşağı yönlü yayılan dalgalardan oluşmaktadır. Analizlerde dinamik zemin davranışının doğru bir şekilde modellenebilmesi amacıyla kuvvetli yer hareketinin sadece yukarı yönlü bileşeninin yayılmasına izin vermek ve aşağı yönlü dalgayı engellemek için Şekil 9'da gösterildiği gibi alt sınır koşulu "compliant base" olarak seçilmiştir. Modelin her iki yanında ise düğüm noktalarının benzer yer değiştirme yapacak şekilde bağlayacak "tied degree of freedom" sınır koşulu kullanılmıştır. Analizlerde yeraltı su seviyesi altında zemin tabakaları 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılmış, tabakalara ait $N_{1,60}$ değerlerine bağlı olarak kayma dalgası hızı ve rölatif sıkılık değerleri kullanılmıştır.

Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan analizlerde hassasiyetini arttırmak 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmış, dinamik analizlerde uygun ağ yoğunluğu yaygın olarak kullanılan ortalama eleman boyutu (OEB) Bağntı (13) ile belirlenmiştir. Burada $V_{(S,min)}$, zemin tabakasındaki en düşük kayma dalgası hızı ve f_{maks} ise kuvvetli yer hareketi kaydının maksimum frekans içeriğidir. Deprem dalgalarının düğüm noktaları arasında bir dinamik zaman adımında birden fazla elemandan geçmesini önlemek için Bağntı (14) ile kritik zaman adımı (Δt) belirlenmiştir. Burada, I_{min} iki düğüm noktası arasındaki minimum mesafe iken, $V_{(S,tabaka)}$, zemin tabakasının kayma dalgası hızıdır. Yukarıda belirtilen hususlar göz önüne alınarak oluşturulan sonlu eleman ağında 15 düğüm noktalı 3426 üçgen eleman kullanılmıştır. Oluşturulan modeldeki ortalama eleman boyutu ise 1.25 m ve zaman adımı 0.005 saniyedir. Sonlu elemanlarla gerçekleştirilen dinamik analizlerdeki önemli hususlardan biri de zemin tabakasının sönüm parametrelerinin belirlenmesidir. Plaxis 2D programında C sönümlenme, M kütle ve K rijitlik matrisleri kullanılarak Bağntı (15) ile Rayleigh sönüm parametreleri belirlenmiştir. Rayleigh sönüm parametreleri, Plaxis'te Hedef 1 (f_1) ve Hedef 2 (f_2) olmak üzere iki farklı değişkenle belirlenmektedir. Burada (f_1), tüm zemin profilinin hakim frekansını göstermekte ve Bağntı (16) ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde, $V_{(S,ortalama)}$ zemin tabakasının ortalama kayma dalgası hızı iken H ise tabaka kalınlığıdır. f_2 ise f_{eq} ve f_1 parametrelerine bağlı olarak Bağntı (17) ile elde edilen f_2 değerinin en yakın tam sayıya yuvarlanması ile belirlenmektedir (Vilhar ve Brinkgreve, 2018). Yapılan analizlerde hedef sönümlenme oranı (ξ) %2 olarak belirlenmiştir.

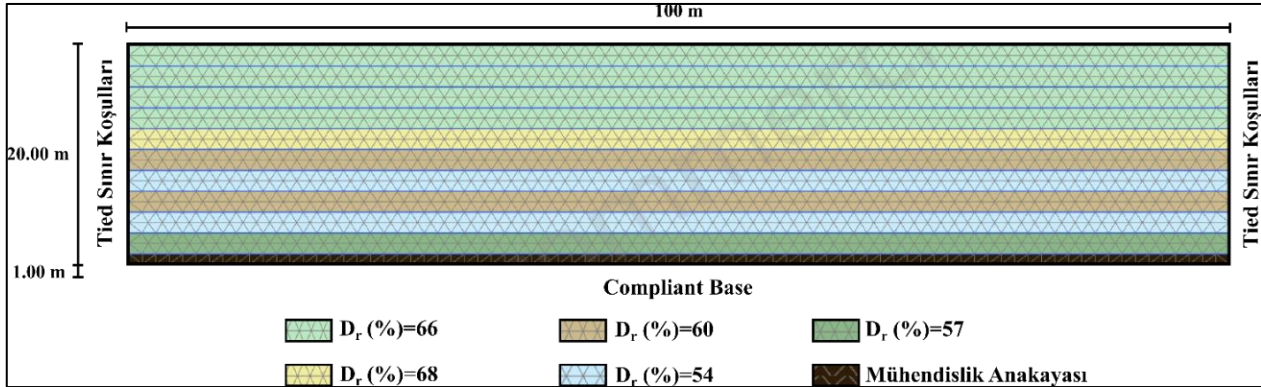
$$OEB = V_{(S,min)} / 8f_{maks} \quad (13)$$

$$\Delta t \leq I_{min} / V_{(S,tabaka)} \quad (14)$$

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (15)$$

$$f_1 = V_{(S,ortalama)} / 4H \quad (16)$$

$$f_2 = f_{eq} / f_1 \quad (17)$$

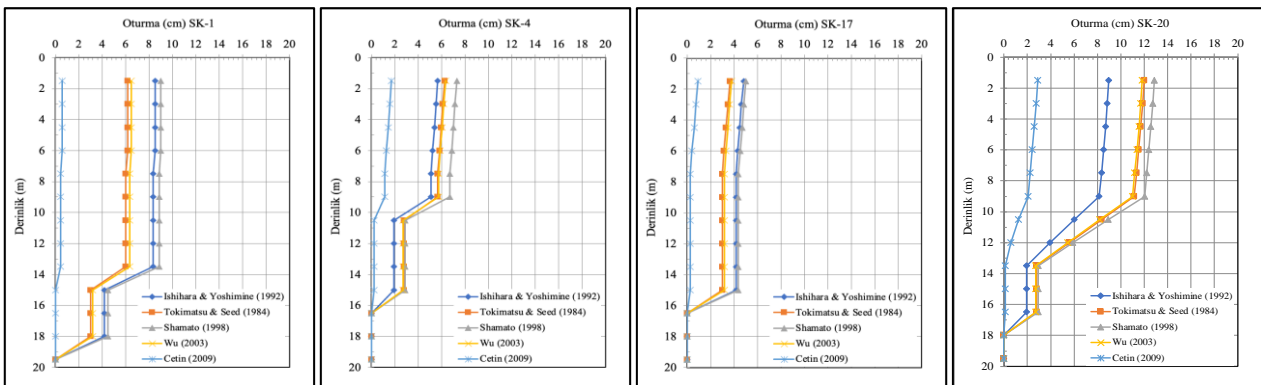


Şekil 9. Serbest saha analizlerinde kullanılan zemin modeli ve sonlu elemanlar ağı
(Soil model and finite element mesh used in free field analysis)

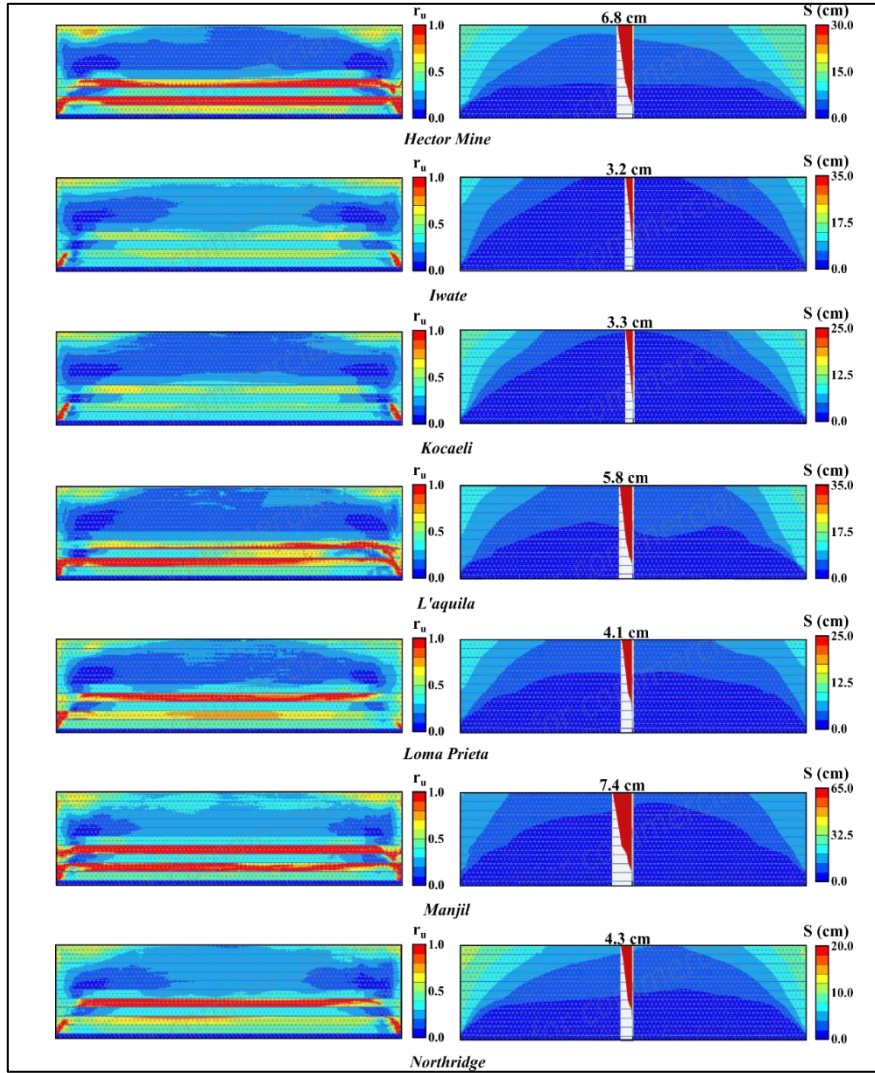
Hem serbest saha koşullarında hem de zemin yüzeyine dolgu imalatı ile yapılacak iyileştirme sonrasında gerçekleştirilen dinamik analizlerde Ko koşulu ile başlangıç adımı oluşturmuştur. Serbest saha koşullarında gerçekleştirilen analizlerde bu adım oluşturulduktan sonra kum zemin özelliklerine uygun parametreler kullanılarak Hardening Soil with small-strain stiffness (HSS) zemin modeli atanmıştır. Bunun yapılmasındaki temel amaç, oluşturulan zemin profilinde statik koşullar altında başlangıç gerilme durumunun doğru bir şekilde belirleyebilmektedir. Dolgu sonrasında sıvılaşma kaynaklı oturmaların elde edilmesi için yapılan analizlerde ise Ko koşulu ile başlangıç adımını takiben kademeli olarak 2.5 m kalınlığında dolgu tabakası tanımlanmıştır. Oluşturulan zemin profilinde başlangıç gerilme durumunun doğru bir şekilde belirlenebilmesi için dolgu zemin için Hardening Soil Model, kum zemin için ise HSS modeli atanmış ve statik yükler altında oturmalar tamamlanana kadar konsolidasyon aşaması gerçekleştirilmiştir. Sadece sıvılaşma kaynaklı oturma değerlerini belirleyebilmek amacıyla konsolidasyon aşamasından sonra oturmalar sıfırlanmıştır. Her iki analizde de son aşamada zemin iskeleti ile boşluklarda serbestçe hareket eden suyun davranışını modelleyen Biot Teoris'i'ne dayanan konsolidasyonlu dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Böylece belirlenen depremler için sıvılaşma kaynaklı oturma değerleri elde edilmiş ve boşluk suyu basıncı oranı (r_u) değişimleri incelenmiştir.

4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

Bölgenin coğrafi konumuna bağlı olarak belirlenmiş deprem kaynak özellikleri ve sondaj verileri kullanılarak ampirik bağıntılar ve PM4Sand Bünye Modeli ile yapılan analizler ile sıvılaşma sonrası oturma değerleri elde edilmiştir. Ampirik bağıntılarda, mevcut yerel zemin koşulları ve geoteknik özellikler kullanılarak her sondaj verisi için düzeltilmiş SPT-N sayıları, depremin üreteceği kayma gerilmesi, efektif gerilme, tekrarlı kayma gerilme oranı ile elde edilen sıvılaşma kaynaklı oturma değerlerinin serbest saha koşulları için derinlikle değişimi sırasıyla olarak Şekil 10'da, serbest saha koşullarında gerçekleştirilen numerik analizlerde belirlenen her deprem için elde edilen oturma değerleri r_u değerlerinin değişimi ile birlikte Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Ampirik yöntemlerle elde edilen sıvılaşma kaynaklı oturma değerlerinin derinlikle değişimi
(Variation of liquefaction-induced settlement values by empirical approaches with depth)

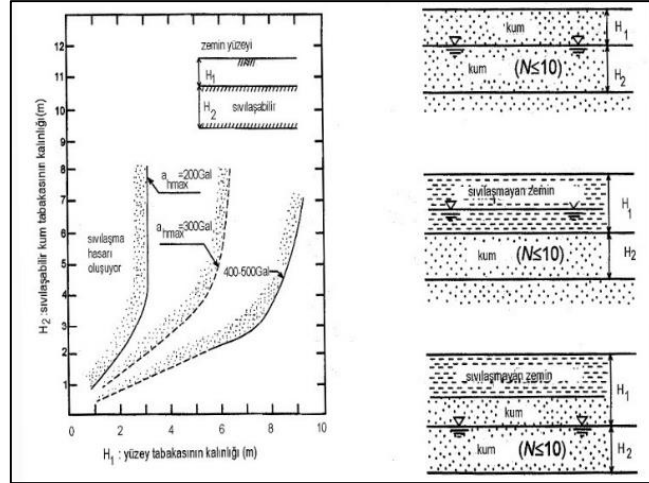


Şekil 11. PM4Sand Modeli ile gerçekleştirilen serbest saha analizlerinde elde edilen r_u ve oturma değerleri (r_u and settlement values obtained in free field analyzes performed with PM4Sand Model)

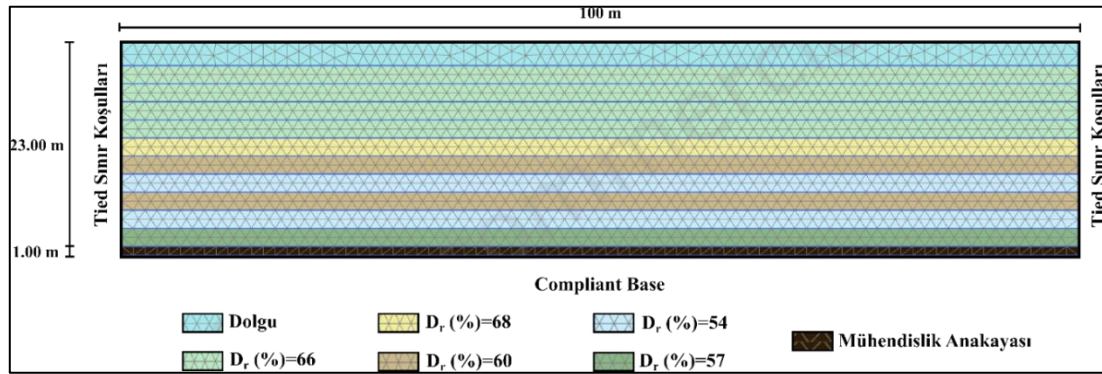
Ampirik bağıntılar ile yapılan hesaplarda yeraltı su seviyesinin altında belirli bölgelerde sıvılaşma kaynaklı oturma gözlenmezken, yeraltı su seviyesinin üzerinde yer alan kum tabakası güvenli tarafta kalınarak sıvılaşma potansiyeli var olarak kabul edildiği için zemin yüzünde meydana gelecek oturmalar 4~13 cm arasında elde edilmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda depremler durumunda sıvılaşma olasılığının yaklaşık %20~80 arasında olduğu, sıvılaşma sonrasında ise ortalama yaklaşık %10 hacimsel birim şekil değiştirme olabileceği anlaşılmaktadır. PM4Sand bünye modeli kullanılarak farklı deprem hareketleri için sayısal yöntemler ile yapılan analizler sonucunda ise şekilden de görüleceği üzere belirli bölgelerde ise sıvılaşma durumuna işaret eden $r_u=1$ değerine yüzey ivme değerlerinin $a_{maks}>0.50$ g olduğu durumlarda ulaşmaktadır. Sıvılaşmanın gerçekleşmesi durumunda ise zemin yüzeyinde oluşacak oturmalar 3.2~7.5 cm arasında hesaplanmıştır. Ampirik ve sayısal yöntemlerle elde edilen sıvılaşma kaynaklı oturma değerleri karşılaştırıldığında ampirik yöntemler ile yapılan hesaplamalar sonucunda görece daha büyük oturmalar elde edilmiş olmasına karşılık Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlardan sıvılaşma riskini azaltmak, oluşabilecek oturmaları sınırlandırmak amacıyla temel zemininde uygun bir yöntemle önlem alınmasının gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

Ishihara (1985) tarafından sıvılaşan tabakanın üzerinde yeterli kalınlıkta sıvılaşmayan bir tabakanın bulunması durumunda sıvılaşmayla ilgili tehlikelerin oluşumunu tahmin etmek için sıvılaşmamış kabuk tabakasının (H1) kalınlığına, alttaki sıvılaştırılmış tabakanın (H2) kalınlığına ve PGA değerine bağlı olarak "Ishihara kriteri" geliştirilmiştir (Şekil 12). Ishihara kriteri dikkate alınarak ve inceleme konusu sahada yeraltı su seviyesinin yüzeyden ortalama 8 m derinlikte olduğu hesaba katılarak, yapı temellerinin altına tüm sahayı kapsayacak şekilde ortalama kalınlığı 3.0 m olan nitelikli bir mühendislik dolgusunun teşkili ile sıvılaşma kaynaklı oturmaların izin verilen sınırlar içerisinde kalacağı değerlendirilmiştir. Önerilen yöntemin uygunluğunu belirlemek için PM4Sand modeli ile iki boyutlu dinamik analizler belirlenen depremler için daha önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmış yöntemle yapılan analizler sonucu sıvılaşma durumu, boşluk suyu basıncı oranının model içinde dağılımı ve

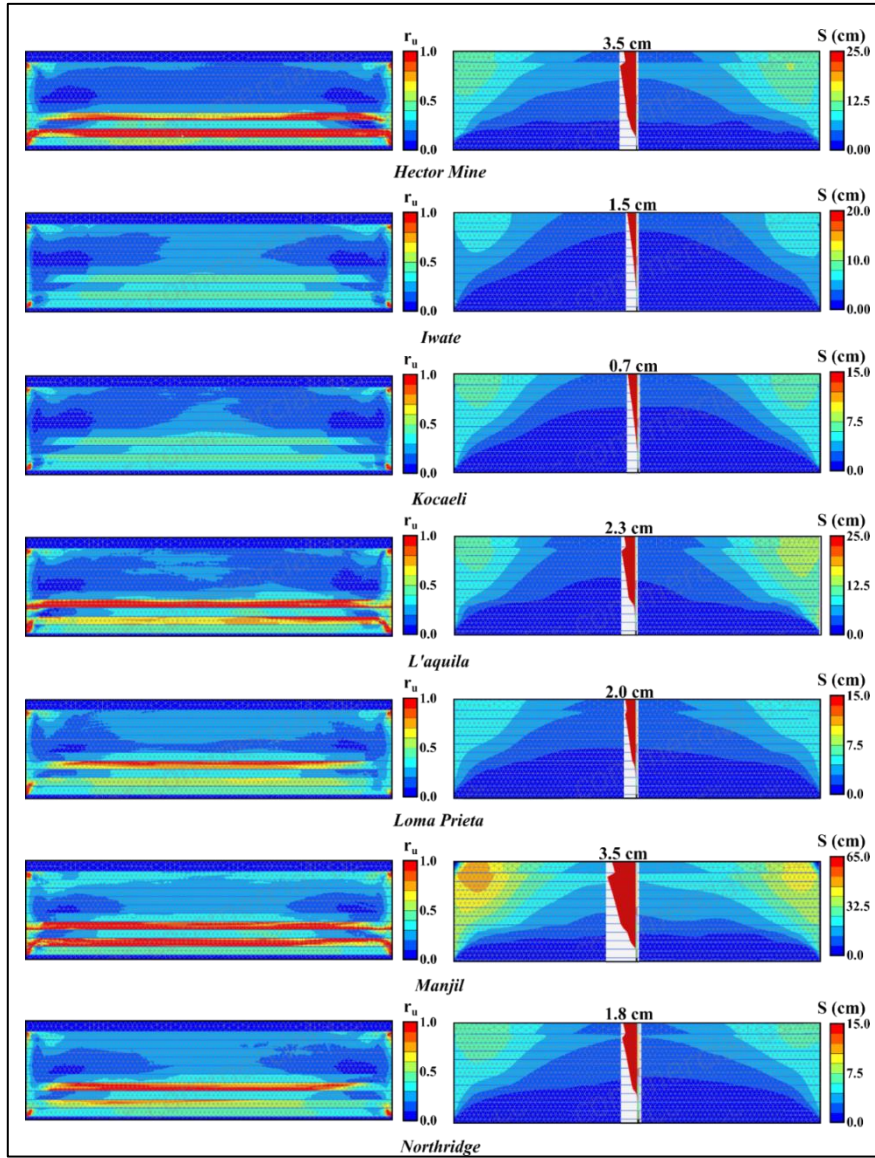
yüzeyde oluşacak oturmalar belirlenmiştir. Zemin yüzeyine dolgu sonrası yapılan dinamik analizlerde kullanılan zemin modeli ve sonlu elemanlar ağı, sınır koşulları ile birlikte Şekil 13'te, analiz sonuçları ise her deprem için ayrı ayrı Şekil 14'te verilmiştir. Ayrıca dolgu tabakasının sıvılaşma kaynaklı oturmalara etkisi, karşılaştırma kolaylığı açısından Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 12. Ishihara kriteri (Ishihara criterion)



Şekil 13. Dolgu sonrası saha analizlerinde kullanılan zemin modeli ve sonlu elemanlar ağı
(Soil model and finite element mesh used in the analysis after fill construction)



Şekil 14. Dolgu imalatı sonrası elde edilen r_u ve oturma değerleri
(r_u and settlement values obtained after fill construction)

Tablo 2. Dolgu öncesi ve sonrası sıvılaşma kaynaklı oturmaların karşılaştırılması
(Comparison of liquefaction-induced settlements before and after fill)

Deprem Adı	Dolgu öncesi oturma (cm)	Dolgu sonrası oturma (cm)	Oturmalarda azalma (%)
Hector Mine	6.8	3.5	49
Iwate	3.2	1.5	53
Kocaeli	3.3	0.7	77
L'aquila	5.8	2.3	60
Loma Prieta	4.1	2.0	52
Manjil	7.4	3.5	52
Northridge	4.3	1.8	57

Zemin yüzeyine yapılan mühendislik dolgusu ile birlikte sahada sıvılaşma potansiyelinde beklenildiği gibi önemli bir azalma olmaktadır. Boşluk suyu basıncı artışı sınırlı kalmış ve modelin belli bölgelerinde efektif gerilme yenilmesine neden olmuştur. Yeraltı su seviyesinin üstünde sıvılaşmayan tabaka üzerine yapılan mühendislik dolgusu yüzeyde kabuk tabakası oluşturmada ve alt tabakalarda oluşabilecek sıvılaşma kaynaklı etkileri önlemede yararlı olmaktadır. Mühendislik dolgu tabakası ile birlikte sıvılaşmayan tabaka kalınlığı 10 m'yi aşmakta olup sıvılaşan tabaka kalınlığı ile karşılaştırıldığında, sıvılaşma kaynaklı oturmaların yüzeyde önemli bir etki olmayacağı söylenebilmektedir. Nitekim yapılan dinamik analizler sonucunda büyük ivmeli depremlerde dahi boşluk suyu basıncı oranı ve oturmalar izin verilen sınırlar içinde kaldığı anlaşılmaktadır. Yüzeyde oluşturulan ve sıvılaşmaya karşı dirençli olan dolgu sonrasında oturma değerleri deprem ivmesine bağlı olarak 0.7~3.5 cm olarak

elde edilmiştir ve oturma değerlerinde %49~77 oranında azalma gözlenmiştir. Bu değerler izin verilen sınırlar içerisinde olup üst yapıda bir hasara sebep olmayacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak yerel zemin koşulları, depremsellik ve planlanan yapı özellikleri ile zemine aktarılacak yükler dikkate alınarak yüzeyde uygun kalınlıkta bir mühendislik dolgu tabakasının teşkili sıvılaşma kaynaklı oturmaları önlemede yararlı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yerel zemin koşulları ve kuvvetli yer hareketi özelliklerine bağlı olarak boşluk suyu basıncının artması nedeniyle zeminin mukavemetini yitirmesi olarak tanımlanan sıvılaşma sonucu meydana gelebilecek deformasyonların yapısal hasara açısından değerlendirilmesi, mühendislik yapılarının planlanması ve inşası için önemli olmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde doğrudan iyileştirme yapılmasına karar verilmesi yerine oluşacak oturmaların yapıya etkisinin incelenmesi yaklaşımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu anlayışa uygun olarak bu çalışmada, zemine aktarılacak yükler bakımından taşıma gücü problemi olmayan ancak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY, 2018) göre sıvılaşma potansiyeli bulunan çok geniş bir alana yayılan bir mühendislik yapısı yerleşim sahasında sıvılaşma kaynaklı oturmalar farklı yöntemlerle incelenmiştir.

Çalışmada bölgeyi etkileyebilecek yer ivmesi için yönetmelik hükümleri gereğince SPT sonuçlarına göre yapılan analizlerde, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayılarının yeterli düzeyde olmadığı ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların da yapısal hasara neden olabilecek düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle yapı yerleşim alanında sıvılaşma potansiyelinin ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların uygun bir yöntemle azaltılması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm olarak Ishihara kriteri dikkate alınarak zemin yüzeyine ortalama kalınlığı 3.0 m olan bir mühendislik dolgu tabakası imalatı önerilmiş ve önerilen yöntemin uygunluğunu farklı ivme ve frekans içeriğine sahip kuvvetli yer hareketleri altında PM4Sand Bünye Modeli ile gerçekleştirilen numerik analizler ile araştırılmıştır. Önce sahanın coğrafi konumuna bağlı olarak belirlenmiş deprem kaynak özellikleri ve sondaj verileri kullanılarak mevcut durumda Tokimatsu ve Seed (1984), Ishihara ve Yoshimine (1992), Shamato vd. (1998), Wu vd. (2003) ve Çetin vd. (2009) tarafından önerilen ampirik bağıntılar kullanılarak zemin yüzünde meydana gelebilecek oturma değerleri hesaplanmış, sonrasında yapılan sayısal analizler sonucunda bulunanlarla karşılaştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında sıvılaşma sonrası oturma değerleri karşılaştırıldığında Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Zemin yüzeyine yapılan uygun kalınlıkta nitelikli bir mühendislik dolgusu sonrası PM4Sand modeli ile 2 boyutlu dinamik analizler sonucunda oturma değerlerinin deprem ivmesine bağlı olarak %44~73 oranında azaldığı ve büyük ivmeli depremlerde dahi boşluk suyu basıncı oranının ve sıvılaşma kaynaklı oturmaların izin verilen sınırlar içinde kaldığı belirlenmiştir.

Bir alan araştırması sunan ve arazi ve laboratuvar verileri kullanarak yapılan sayısal analizlere dayanan bu çalışma ile sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde deprem yüklerine maruz kaldığı durumda meydana gelebilecek oturma değerlerini azaltmak amacıyla diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve pratik bir yöntem sunan zemin yüzeyine uygun kalınlıkta sıvılaşmayan bir dolgu tabakası inşasının sıvılaşma üzerindeki etkisi hakkında uygulamaya katkı sağlamak ve aktif bir deprem kuşağı içerisinde yer alan ülkemizde bu yöntemin kullanımını yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların ilgili sahanın geoteknik özellikleri ve coğrafi konumuna bağlı olarak belirlenen tasarım depremi ile belirlenen kalınlıkta ve özellikte dolgu tabakası için geçerli olduğu; yapı yükleri, temel taban basınç değerleri ve temel derinliği gibi yapı ile ilişkili değişkenlerden de etkileneceği, elde edilen oturma değerlerinin statik durumda dolgu yükünden kaynaklanan oturma değerlerini içermeyen sıvılaşma kaynaklı oturma değerleri olduğu ve tüm bunlara bağlı olarak farklı coğrafi konumlarda yer alan sahalarda arazi ve laboratuvar yapılabilecek çalışmalardan elde edilen parametreler kullanılarak uygun dolgu tabakası kalınlığının belirlenmesi gerektiği açıktır. Bahsedilen yöntemin özellikle yumuşak kil ardalı kum tabakalarının bulunduğu sahalarda tek başına uygulanması halinde statik yükleme koşullarında oluşabilecek oturmalar ayrı olarak ele alınmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada Bakyapı İnşaat Enerji Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Temeltaş Teknik Yapı A.Ş. tarafından sağlanan desteğe yazarlar teşekkür ederler. The authors thank the support provided by Bakyapı Construction Energy Mining Industry and Trade Inc. and Temeltaş Teknik Yapı Inc. in this study.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., Baez, J. I., 2003. Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 571-584.
- Alver, O., Sezen, A., Eseller-Bayat, E. E. (2021). Tbdy 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma Ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri. *Teknik Dergi*, 32(5), 11197-11226.
- Álamo, G. M., Padrón, L. A., Aznárez, J. J., Maeso, O., 2022. Numerical model for the dynamic and seismic analysis of pile-supported structures with a meshless integral representation of the layered soil. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(7), 3215-3238.
- Başarı, E. (2011). KUZZEY-DOĞU BURSA İL MERKEZİ ZEMİNLERİNİN DİNAMİK ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(1), 39-53.
- Beatty, M. H., Byrne, P. M., 2011. UBCSAND constitutive model version 904aR. Itasca UDM Web Site, 69.
- Boulanger, R. W., Ziotopoulou, K., 2018. PM4Silt (Version 1): A silt plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-18/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 108 pp.
- Bray, J. D., Dashti, S., 2014. Liquefaction-induced building movements. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), 1129-1156.
- Carey, J. M., McSaveney, M. J., & Petley, D. N. (2017). Dynamic liquefaction of shear zones in intact loess during simulated earthquake loading. *Landslides*, 14(3), 789-804.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., Seed, R. B., 2009. Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric) settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 387.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E., Bilge, H. T., Ilgac, M., Chowdhury, K., 2018. Examination of differences between three SPT-based seismic soil liquefaction triggering relationships. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 75-86.
- Chafale, A., Annam, M. K., 2022. A Review on Ground Improvement with Surcharge in Addressing Liquefaction Mitigation. *Dynamics of Soil and Modelling of Geotechnical Problems*, 367-375.
- Chen, G., Wang, Y., Zhao, D., Zhao, K., Yang, J., 2021. A new effective stress method for [38] nonlinear site response analyses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(6), 1595-1611.
- Chiaradonna, A., 2022. Defining the Boundary Conditions for Seismic Response Analysis—A Practical Review of Some Widely-Used Codes. *Geosciences*, 12(2), 83.
- Dafalias, Y. F., Manzari, M. T., 2004. Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering mechanics*, 130(6), 622-634.
- Das, A., Chakraborty, P., 2022. Simple models for predicting cyclic behaviour of sand in quaternary alluvium. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 1-19.
- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., Wilson, D., 2010. Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(7), 918.
- Demiroz, A., Yildiz, F., 2021. Investigation of the dynamic behavior of soils of Konya Organized Industrial Zone by equivalent linear analysis method. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 20(3), 98-104.
- Dimitriadi, V. E., Bouckovalas, G. D., Chaloulos, Y. K., Aggelis, A. S., 2018. Seismic liquefaction performance of strip foundations: effect of ground improvement dimensions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 298-307.
- Dogan, G., Ecemis, A. S., Korkmaz, S. Z., Arslan, M. H., Korkmaz, H. H., 2021. Buildings Damages after Elazığ, Turkey Earthquake on January 24, 2020. *Natural hazards*, 109(1), 161-200.
- Doyuran, V., Kocyiğit, A., Yazıcıgil, H., Karahanoğlu, N., Toprak, V., Topal, T., Süzen, M.L., Yeşilnacar, E., Yılmaz, K.K., 2000. Yenişehir Belediyesi Yerleşim Alanı Jeolojik/Jeoteknik İncelemesi. METU Project: 99-03-09-01-02. 227 pp., unpublished
- Gong, W., Tien, Y. M., Juang, C. H., Martin II, J. R., Zhang, J., 2016. Calibration of empirical models considering model fidelity and model robustness—focusing on predictions of liquefaction-induced settlements. *Engineering Geology*, 203, 168-177.
- Gurbuz, T., Cengiz, A., Kolemenoglu, S., Demir, C., Ilki, A., 2022. Damages and Failures of Structures in İzmir (Turkey) during the October 30, 2020 Aegean Sea Earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-42.
- Hanna, A. M., Ural, D., Saygili, G., 2007. Neural network model for liquefaction potential in soil deposits using Turkey and Taiwan earthquake data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(6), 521-540.
- Hashash, Y. M., Phillips, C., Groholski, D. R., 2010, May. Recent advances in non-linear site response analysis. In 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (No. 4).
- Holzer, T. L., Youd, T. L., 2007. Liquefaction, ground oscillation, and soil deformation at the Wildlife Array, California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 97(3), 961-976.
- Huang, Y., Wen, Z., 2015. Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation. *Natural Hazards*, 76(3), 1927-1938.
- Huang, Y., Yashima, A., Sawada, K., Zhang, F., 2008. Numerical assessment of the seismic response of an earth embankment on liquefiable soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), 31-39.
- Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. In International conference on soil mechanics and foundation engineering. 11 (pp. 321-376).
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., Yasuda, S., 1975. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and foundations*, 15(1), 29-44.
- Ishihara, K., Yoshimine, M., 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and foundations*, 32(1), 173-188.
- Iwasaki, T., 1986. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(1), 2-68.
- Kumar S.S., Dey A., Krishna A.M., 2020. Liquefaction potential assessment of brahmaputra sand based on regular and irregular excitations using stress-controlled cyclic triaxial test. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24(4):1070-1082, DOI: 10.1007/s12205-020-0216-x
- Makdisi, A. J., 2021. Liquefaction-targeted ground motion parameters. University of Washington.

- Manzari, M. T., Kutter, B. L., Zeghal, M., Iai, S., Tobita, T., Madabhushi, S. P. G., Zhou, Y. G., 2014, August. LEAP projects: Concept and challenges. In Proceedings of 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (pp. 109-116).
- Moayed, R. Z., Naeini, S. A., 2012. Improvement of loose sandy soil deposits using micropiles. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(3), 334-340.
- Nicholson, P. G., 2014. Soil improvement and ground modification methods. Butterworth-Heinemann.
- Ntritsos, N., Cubrinovski, M., 2020. A CPT-based effective stress analysis procedure for liquefaction assessment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106063.
- Patel, A., 2019. Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. Woodhead Publishing.
- Pribadi, K. S., Abduh, M., Wirahadikusumah, R. D., Hanifa, N. R., Irsyam, M., Kusumaningrum, P., Puri, E., 2021. Learning from past earthquake disasters: The need for knowledge management system to enhance infrastructure resilience in Indonesia.
- Şartnamesi, K. T., 2013. Kısım 402: Temel. Karayolları Teknik Şartnamesi.
- Seed, H. B., Martin, P. P., Lysmer, J., 1975. "The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction." Rep.No.EERC 75-26, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Shamoto, Y., Zhang, J. M., Tokimatsu, K., 1998. New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 17(7-8), 427-438.
- Sonmez, B., Ulusay, R., Sonmez, H., 2008. A study on the identification of liquefaction-induced failures on ground surface based on the data from the 1999 Kocaeli and Chi-Chi earthquakes. *Engineering Geology*, 97(3-4), 112-125.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., Richart Jr, F. E., 1974. Soil motion computations by characteristics method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(3), 247-263.
- Subasi, O., Koltuk, S., Akbas, M., Iyisan, R., 2021, November. A Numerical Study on Liquefaction Induced Settlements by Using PM4Sand Model. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1203, No. 3, p. 032029). IOP Publishing.
- Taiebat, M., Shahir, H., Pak, A., 2007. Study of pore pressure variation during liquefaction using two constitutive models for sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(1), 60-72.
- TBDY., 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Theodoulidis, N., Karakostas, C., Lekidis, V., Makra, K., Margaris, B., Morfidis, K., Savvaidis, A., 2016. The Cephalonia, Greece, January 26 (M6. 1) and February 3, 2014 (M6. 0) earthquakes: near-fault ground motion and effects on soil and structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(1), 1-38. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 102424.
- Tokimatsu K, Hino K, Suzuki H, Ohno K, Tamura S, Suzuki Y., 2019. Liquefaction-induced settlement and tilting of buildings with shallow foundations based on field and laboratory observation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 124:268-279, DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.04.054
- Tokimatsu K, Seed H.B., 1984. Simplified procedures of the evaluation of settlements in clean sands. Rep. No. UCB/GT-84/16, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA
- Tokimatsu, K., Seed, H. B., 1984. Simplified procedures for the evaluation of settlements in clean sands. College of Engineering, University of California.
- Tokimatsu, K., Yoshimi, Y., 1983. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56-74.
- Tolon, M. (2013). Karşılaştırmalı Sayısal Sıvılaşma Analizi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tosun, H., 2015. Earthquakes and dams. In *Earthquake Engineering-From Engineering Seismology to Optimal Seismic Design of Engineering Structures*. IntechOpen.
- Vilhar, G., Brinkgreve, R., 2018. Plaxis the PM4Sand model 2018.
- Wang, J., Deng, Y., Shao, Y., Liu, X., Feng, B., Wu, L., Peng, H., 2018. Liquefaction behavior of dredged silty-fine sands under cyclic loading for land reclamation: laboratory experiment and numerical simulation. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 1-15.
- Wu, J., 2002. Liquefaction triggering and post-liquefaction deformation of Monterey 0/30 sand under unidirectional cyclic simple shear loading. University of California, Berkeley.
- Ye, B., Ye, G., Zhang, F., Yashima, A., 2007. Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand. *Soils and Foundations*, 47(3), 547-558.
- Zhang, G., Robertson, P. K., Brachman, R. W. I., 2004. Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 861-871.
- Zhang, J. M., & Wang, G., 2012. Large post-liquefaction deformation of sand, part I: physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm. *Acta Geotechnica*, 7(2), 69-113.