

BİR DENİZ DOLGUSUNUN TEMEL ZEMİNLERİNİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNE AİT UYGULAMA ÖRNEĞİ

A CASE STUDY ON ASSESSMENT OF LIQUEFACTION POTENTIAL FOR FOUNDATION SOILS OF AN OFFSHORE CAUSEWAY

H. Tolga BİLGE¹, Eray ALTINCI²
Burak OKUR³, K. Önder ÇETİN⁴

ÖZET

Akdeniz bölgesi sınırları içerisinde, sismik açıdan görece aktif bir alanda bulunan endüstriyel tesis projesi kapsamında kazıklı bir iskele yapısı ile iskele ve kıyı şeridi arasındaki alanda bir yaklaşım dolgusunun teşkil edilmesi planlanmaktadır. Proje sahasının zemin profilini değerlendirmek üzere, deniz sondajlarını da içeren bir araştırma gerçekleştirilmiş, alanda plastik kil ve ayrılmış kayaların yanı sıra plastik olmayan silt – kum karışımı zemin birimlerinin varlığı da saptanmıştır. Geniş kapsamlı tasarım çalışmasının bir parçası olarak, kıyı şeridi ile kazıklı iskele yapısı arasında dolgu imalatı ile geçilecek kesimin uzunluğunu belirlemek üzere de bir çalışma yapılmıştır. Zemin profilini oluşturan birimlerin özellikleri dikkate alındığı zaman, bu kesim için kritik hususun rastlanan silt – kum karışımı birimlerin sıvılaşma potansiyelleri ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Değerlendirmelerde özellikle, dolgunun farklı kesimleri altında (özellikle merkez ve topuk bölgeleri) ortaya çıkacak gerilme koşullarının zemin davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerinde durulmuştur. Seed (1983) tarafından sunulan öncü çalışmanın ardından geçen 40 yıllık süreçte, çok sayıda farklı araştırmacı gerilme ölçekleme katsayılarının etkisi ve bunlara ait düzeltmelerin geliştirilmesine dair çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bildiri kapsamındaki çalışmada, literatürdeki bulgular dikkate alınarak ve sayısal araçlardan faydalanmak üzere farklı gerilme koşullarının etkileri incelenmiş, deniz dolgusu temelindeki zeminlerin davranışları serbest saha koşulları ile kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Kıyı yapısı, Gerilme koşulu etkiler

ABSTRACT

An industrial facility project in a seismically active area of the Mediterranean region entails the construction of a piled jetty and a causeway between the coastline and the

¹Dr. İnşaat – Geoteknik Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., htbilge@gmail.com (Sorumlu yazar)

² İnşaat Yük. – Geoteknik Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., ealtinci@geodestek.com

³ İnşaat Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., bokur@geodestek.com

⁴ Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ocetin@metu.edu.tr



jetty. A comprehensive site investigation program, including deep-water drilling, was conducted to evaluate the subsurface profile of the area. Results revealed the presence of plastic clay, weathered rock units, and non-plastic silt-sand mixtures. As part of the extensive design studies, an assessment was conducted to determine the length of the causeway. Evaluation of the subsurface units highlighted the critical importance of liquefaction potential for the silt and sand mixtures in this region. Special emphasis was placed on evaluating stress conditions under different regions of the causeway, such as under mid-line and toe regions. In the 40-year period following the pioneer study of Seed (1983), numerous researchers have conducted studies on the effects of stress scaling factors and developed models for them. Within the scope of this manuscript, the effects of stress conditions on behavior of foundation soils of the causeway were evaluated comparatively with the free-field conditions, taking into account the findings in the literature and utilizing numerical tools.

Keywords: Liquefaction, Offshore structure, Effects of stress condition

1. GİRİŞ

Akdeniz bölgesi sınırları içerisinde planlanan bir endüstriyel tesis projesi kapsamında açık deniz yapısının inşa edilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda, kazıklı bir iskele yapısı inşa edilecek olup, sahil şeridi ile iskele arasındaki alan ise yaklaşım dolgusu teşkil edilerek geçilecektir. Proje yapısının çok bileşenli doğası nedeniyle tasarım çalışması farklı aşamalar içermiştir. Bunun bir parçası olarak, kıyı şeridi ile kazıklı iskele yapısı arasında dolgu imalatı ile geçilecek kesimin uzunluğunu belirlemek (bir başka deyişle optimize etmek) üzere bir çalışma yapılmıştır. Proje sahasının sismik olarak aktif kabul edilebilecek bir alanda bulunuyor olması nedeniyle statik yüklerin yanı sıra deprem tesiri altındaki davranış da kritik görülmüştür. Bu durumla ilişkili olarak, bildiri kapsamında deniz dolgusu temel zeminlerinin sıvılaşma potansiyellerinin araştırılması amacıyla yapılan analiz ve değerlendirmelerin sunulması amaçlanmıştır.

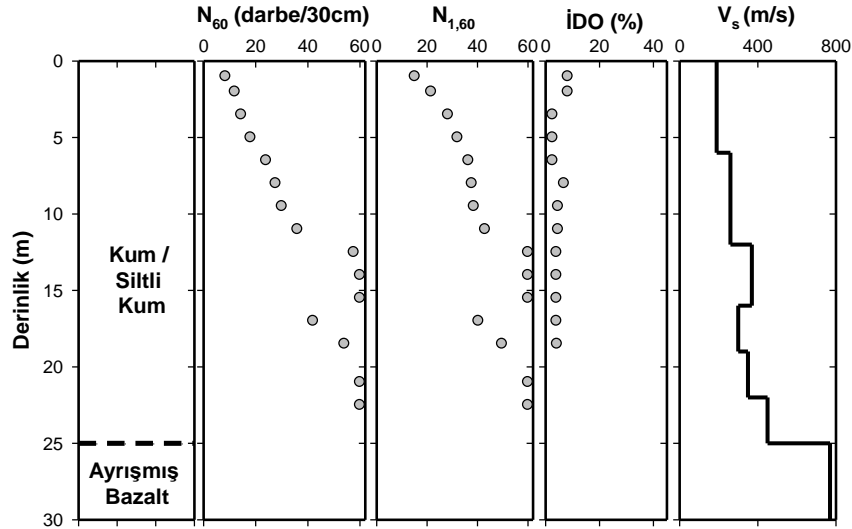
Bildirinin ilerleyen bölümlerinde, proje sahası zemin profilini değerlendirmek üzere gerçekleştirilen zemin araştırma çalışmalarının sonuçlarına değinilecek, değerlendirmek üzere seçilen zemin profili tanıtılacak, alanın depremelliğine ilişkin bulgular genel olarak sunulacak ve bunların ardından alanda bulunan "sıvılaşabilir" nitelikteki zemin birimlerinin öngörülen sismik senaryo altında sıvılaşma potansiyellerini değerlendirmek üzere gerçekleştirilen hesap ve analiz sonuçlarına yer verilecektir. Proje tasarım süreci, geoteknik ve deprem mühendisliği alanındaki farklı uygulamaların gerçekleştirilmesini içermiştir; ancak bildiri kapsamında esas olarak düşey efektif (örtü) ve kayma gerilmelerinin, yaklaşım dolgusu temel zeminleri için gerçekleştirilen sıvılaşma tetiklenme analizleri kapsamında ne şekilde ele alındığı üzerinde durulacaktır.

2. MEVCUT ZEMİN ARAŞTIRMA VERİLERİ

Bildirinin giriş bölümünde de değinildiği üzere proje kapsamında hem kara hem de deniz yapılarının inşa edilmesi planlanmıştır, bu durumla uyumlu olarak hem kara hem de deniz sondajlarını içeren bir araştırma programı takip edilerek inceleme alanının zemin profili değerlendirilmiştir. Açılan deniz sondajlarından 4 tanesi doğrudan, sahil ve iskele yapısı arasında yaklaşım dolgusu ile geçilecek alanla ilişkilendirilmiştir. Bu kuyularda, deniz tabanından itibaren 30 m mertebesindeki derinliğe kadar zemin araştırması



gerçekleştirilmiş, 4 farklı formasyonun varlığı tespit edilmiştir. Bunlar, i) siltli kum / kum, ii) killi silt, iii) kil ve iv) ayrılmış bazalt birimlerini içermektedir. Bu birimlerin mühendislik özelliklerini belirlemek üzere, enerji kalibrasyonu yapılmış olan şahmerdan sistemi ile SPT deneyleri gerçekleştirilmiş, laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri ile kaya formasyonlardan karot numuneleri alınmıştır. Ayrıca, kuyu içi jeofizik araştırma yöntemlerinden biri olan PS-logging çalışması ile bu kesimde kayma dalga hızı (V_s) ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Tamamlanan tasarım çalışmasında her bir sondaj lokasyonuna ait veri, noktasal bazlı olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir; ancak bildiri kapsamında, gerçekleştirilen çalışmanın ana aşamaları hakkında fikir vermek üzere, sadece sıvılaşma potansiyeli bakımından en kritik görülen kesim (sondaj verisi) ele alınacaktır. İlgili sondaj logu uyarınca bu sondaj kuyusunun açıldığı lokasyonda deniz suyu yüksekliğinin 5.50 m mertebesinde olduğu, deniz tabanından itibaren ise farklı sıklık seviyelerinde siltli kum tabakaları ve bunlara müteakiben ise ayrılmış kaya formundaki andezit birimine rastlandığı görülmüştür. Bahsi geçen lokasyona ait idealize zemin profili, bu lokasyonda gerçekleştirilen SPT deneylerinde raporlanan darbe sayılarının derinlikle değişimi (SPT- N_{60} cinsinden) Şekil 1 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 1. Mevcut zemin araştırma verisi ve idealize zemin profili

SPT deneylerinde kullanılan şahmerdan sisteminin enerji veriminin %72 olduğu dokümanite edilmiş olup, hesaplarda bu durum dikkate alınmış ve Şekil 1'de, SPT- N_{60} değerleri 60 darbe / 30 cm ile sınırlandırılarak gösterilmiştir. PS-logging ölçüm sonuçları uyarınca geliştirilen idealize V_s profili de bütünlük adına Şekil 1'de sunulmuştur. SPT deneyleri sırasında alınan zemin numuneleri üzerinde sınıflandırma amacıyla zemin mekaniği laboratuvar deneyleri de gerçekleştirilmiş olup, bu malzemenin plastik nitelikte olmadığı (NP) saptanmıştır (birimler SM veya SP olarak sınıflandırılmıştır). Raporlanan ince dane oranı (İDO) değerlerinin derinlikle değişimi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.

3. PROJE SAHASININ DEPREMSELLİĞİ

Giriş bölümünde belirtildiği üzere, bu bildiri, tamamlanan bir tasarım projesine dayanmaktadır. Birden fazla unsuru bulunan proje kapsamındaki sismik tehlike analizi farklı bir proje paydaşı tarafından gerçekleştirilmiştir. Deprem mühendisliğinin farklı bir



uzmanlık alanı olan tehlike analizleri kapsamında detaylı bir değerlendirme yapılmış ve bu çalışmaya altlık teşkil edecek veriler sağlanmıştır, ancak bildiri kapsamında geoteknik deprem mühendisliğinin farklı bir problemi üzerinde durulacağı için bahsi geçen çalışma sonuçları genel olarak özetlenecektir. İlgili çalışmada, bölgenin sismotektonik yapısı ile güncel deprenselliği değerlendirilmiş, farklı tekerrür süreleri için geçerli olacak spektral ivme değerleri hesaplanmış, bunlara karşılık gelen tasarım spektrumları geliştirilmiştir. Sunulacak değerlendirmelerde, Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği (2020) de dikkate alınmak üzere sadece 2,475 yıl tekerrür süresine karşılık gelen senaryo dikkate alınmıştır. Bu deprem düzeyi için hesaplanan tasarıma esas spektral ivme değerleri, S_{Ds} ve S_{D1} , ZB yerel zemin sınıfına mensup bir saha için, sırasıyla 1.910 ve 0.608 olarak hesaplanmıştır (bu değerler, alanın deprenselliğinin altını çizmek üzere raporlanmıştır). Tehlike analiz çalışmasının bir parçası olarak geliştirilen spektrumla uyumlu 11 adet yatay deprem kaydı da (2 bileşeni ile birlikte) seçilmiş ve bu kayıtlar, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için gerçekleştirilecek saha tepki analizlerinde kullanılmıştır. Deterministik tabanlı sıvılaşma tetiklenme analizlerinin girdi parametrelerinden biri olan deprem büyüklüğü de sismik tehlike çalışması kapsamında gerçekleştirilen olasılık analizlerden elde edilen verinin geri ayrıştırması sonucunda 6.5 olarak hesaplanmıştır (proje sorumluluk matrisi uyarınca, baskın deprem büyüklüğü – mesafe çifti de ayrı bir uzman grup tarafından değerlendirilmiş, bu değer iletildiği şekilde kullanılmıştır).

4. YAKLAŞIM DOLGUSU TEMEL ZEMİNLERİNİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Zemin sıvılaşması tetiklenme tetiklerinin ilk adımı, değerlendirilecek zeminlerin “sıvılaşabilir” olup olmadığına karar verilmesidir. Bölüm 2 kapsamında değinildiği üzere, proje sahasının bu bildiri kapsamında değerlendirilen kesiminde, kalınlığı 20 m mertebesinde olan siltli kum / kum tabakaları yer almaktadır. Plastik olmayan (NP), kohezyonsuz yapıda ve suya doygun haldeki bu malzemenin, çok sayıdaki vaka örneğinin de işaret ettiği üzere, “sıvılaşabilir” nitelikte olduğu aşikardır. Bu değerlendirmeye istinaden, öngörülen senaryo deprem koşulları altında sıvılaşma tetiklenmesinin meydana gelip gelmeyeceği araştırılmıştır.

Literatürde, farklı saha deneylerine (SPT, CPT gibi) bağlı olarak geliştirilmiş ampirik ve yarı ampirik yöntemler bulunmaktadır. Bölüm 2 kapsamında sunulduğu üzere, proje sahasında SPT deneylerini içeren bir araştırma programı takip edilmiş olduğu için mühendislik değerlendirmeleri bu deney verisine dayalı olarak geliştirilen yöntemler ile yapılmıştır. Sismik zemin sıvılaşması tetiklenme analizleri temel olarak tekrarlı yükler altında ortaya çıkan gerilmelerin (CSR, tekrarlı kayma gerilme oranı şeklinde ifade edilecektir) ve malzemenin tekrarlı yüklere karşı direncinin (CRR, tekrarlı direnç oranı şeklinde ifade edilecektir) belirlenmesini, bunların ardından ise sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (GK_{SIV}), bu değerlerin oranına (CRR / CSR) göre hesaplanmasını içerir.

Tekrarlı kayma gerilme oranı (CSR), düşey yönde yayılan kayma dalgalarının bir zemin tabakasının yatay düzleminde meydana getireceği ortalama tekrarlı kayma gerilmelerinin (τ_{ort}), aynı düzlemdeki başlangıç düşey efektif gerilmeye (σ'_v) oranı olarak ifade edilmektedir. Proje sahasının sıvılaşma potansiyeli bulunan zemin birimleri içeriyor olması nedeniyle, yerel zemin sınıfı ilgili yönetmelik uyarınca “ZF” olarak kabul edilmiş ve τ_{ort} değerlerinin hesaplanması için saha tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sismik



tehlike analiz çalışmasının bir parçası olarak tasarım spektrumu ile uyumlu olarak seçilen kayıtlar kullanılmış ve tepki analizleri DEEPSOIL V7.0 1D Wave Propagation Program For Geotechnical Site Response yazılımı (Hashash vd., 2010) ile gerçekleştirilmiştir. Yazılım, frekans uzayında, 1 boyutlu eşdeğer doğrusal tepki analizleri yapılmasına olanak tanımakta, profili oluşturan birimler için seçilen kayma dalga hızı, birim hacim ağırlık ve modül azalım ilişkileri uyarınca hesap yapmaktadır. Kum birimlerine ait modül azalım ilişkilerinin seçiminde Seed ve Idriss (1970) çalışmasında verilen önerilerden faydalanılırken, bazalt birimi ise Schnabel (1973) çalışmasında kayaç formasyonlar için geliştirilen ilişki uyarınca modellenmiştir. Tepki analizleri için geliştirilen zemin modeli, deprem kayıtları tatbik edilmek üzere değerlendirilmiş, neticede SPT deney verisinin bulunduğu derinlik seviyelerine karşılık gelen kayma gerilmeleri her bir kayıt için ayrı ayrı belirlenmiş, tetiklenme analizlerine esas τ_{ort} değeri ise, her bir kayda ait analiz sonucu hesaplanan kayma gerilmesi – zaman tarihçesi uyarınca belirlenen ortalama değerlerin ortalaması hesaplanarak seçilmiştir.

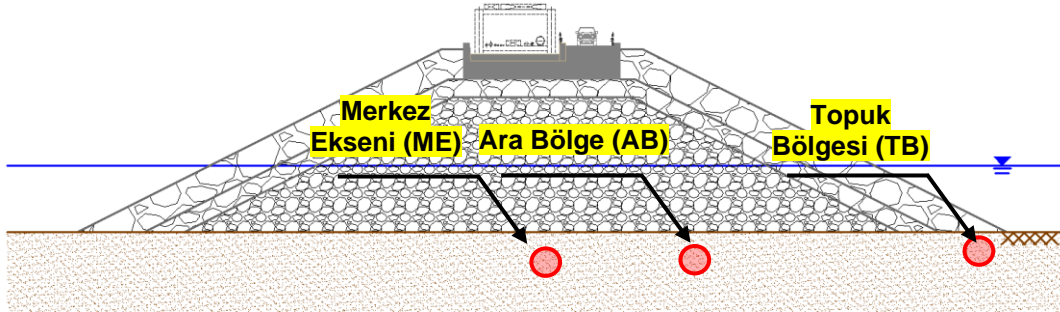
Tetiklenme analizlerinin bir diğer bileşeni ise zemin birimlerinin sıvılaşmaya karşı dirençlerini temsil eden tekrarlı direnç oranının (CRR) belirlenmesini içermektedir. Bu amaçla önerilen yöntemler ya “örselenmemiş” numuneler üzerinde yapılacak laboratuvar deneylerine ya da arazi davranışları ile “indeks” test parametrelerine dayalı yarı-ampirik bağıntıların kullanılmasına dayanmaktadır. Bu bildiri kapsamında yapılan değerlendirmelerde, görece yakın bir dönemde yayınlanmış olan Çetin vd. (2018) çalışmasında önerilen ve Denklem 1’de sunulan model kullanılmıştır.

$$CRR(N_{1,60}, M_w, \sigma'_v, \dot{I}DO, P_L) = \exp \left[\frac{(N_{1,60} \cdot (1 + 0.00167 \cdot FC) - 27.352 \cdot \ln(M_w) - 3.958 \cdot \ln(\frac{\sigma'_v}{P_a}) + 0.089 \cdot \dot{I}DO + 16.084 + 2.95 \cdot \Phi^{-1}(P_L))}{11.771} \right] \quad (1)$$

Bu ifadede yer alan $N_{1,60}$, M_w , σ'_v , FC ve P_L değerleri sırasıyla enerji, örtü yükü ve prosedür düzeltmesi yapılmış SPT-N darbe sayısını, deprem büyüklüğünü, düşey efektif gerilmeyi, ince dane oranını ve sıvılaşma olasılığını (deterministik değerlendirmeler ile uyumlu olarak %50 şeklinde kullanılmıştır) temsil etmektedir. Deprem vaka örneklerine dayalı şekilde geliştirilen bu ve benzer yöntemler (örneğin Youd vd., 2001; Idriss ve Boulanger, 2012, vb.) serbest saha koşulları için geliştirilmiş olup, bu durumlarda kabul edilebilir bir performans ile değerlendirme yapmaya olanak tanımaktadırlar; ancak gerilme koşullarının serbest saha koşullarından ayrışması halinde, bir seri gerilme ölçekleme faktörü ile düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu bildiri kapsamında ele alınan yaklaşım dolgusu altında, dolgu geometrisine bağlı olarak serbest sahalardan farklı gerilme koşulları ortaya çıkması beklenmektedir. İmal edilmesi planlanan yaklaşım dolgusuna ait kesit görünümü Şekil 2’de verilmiştir. Dolgu temeli altında 3 farklı kesimde farklı ve kritik gerilme koşullarının ortaya çıkması, bunların yukarıda anılan serbest saha koşullarından ayrışması öngörülmektedir. Dolgunun merkez eksenini olarak tariflenen bölge, serbest sahaya kıyasla toplam ve efektif düşey gerilmelerin en azami seviyede artacağı kesimdir, ancak dolgu geometrisinin simetrik yapısı nedeniyle bu kesimde statik kayma gerilmelerinin ortaya çıkması beklenmemektedir. Topuk bölgesi olarak tariflenen kesimde dolgu kalınlığı



nedeniyle çok sınırlı mertebede ek örtü yükü ortaya çıkarken, asimetrik yükleme nedeniyle statik kayma gerilmelerinin etkisi en kritik seviyelere ulaşacaktır. Ara bölge ise isminin ifade ettiği üzere her iki gerilme unsurunun da belirli ölçüde etkili olduğu kesimi tariflemek için dikkate alınmıştır.



Şekil 2. Yaklaşım dolgusu kesit görünümü ve kritik bölge tanımları

Artan düşey efektif gerilme (örtü yükü) altında, tekrarlı kayma mukavemetinin arttığı ancak tekrarlı kayma mukavemet oranının (CRR) düştüğü bilinmektedir (Castro ve Poulos (1977) çalışmasında öncü bulgular sunulmuştur). Efektif gerilmeye bağlı-doğrusal olmayan zemin davranışının tekrarlı yükleme problemlerine uzantısı olarak değerlendirilebilecek olan bu gözlem, özellikle baraj ve dolgu yapıları altındaki, oldukça yüksek efektif gerilmelere maruz kalan zeminlerin sıvılaşma tetiklenme potansiyellerinin değerlendirilmesi bakımından önem taşımaktadır. Bu davranış, K_{σ} olarak isimlendirilen bir ölçekleme faktörü ile değerlendirilmektedir (bu terim Seed (1983) öncü çalışmasından bu yana kullanılmaktadır). Zemin birimleri üzerindeki statik kayma gerilmelerinin varlığı da davranışı önemli ölçüde etkileyebilmekte olup, bu etkilerin dikkate alınması için ise K_{α} olarak isimlendirilen bir diğer ölçekleme faktörü kullanılmaktadır (bu terim de diğerine benzer şekilde ilk olarak Seed (1983) çalışmasında kullanılmıştır). Referans değerlerin dışında gerilme koşullarına maruz kalan bir saha için geçerli CRR değeri ($CRR_{\sigma'v0,\alpha}$), referans koşullara ait CRR değeri ($CRR_{\sigma'v0=1atm,\alpha=0}$) ile Denklem 2'de verilen şekilde ilişkilendirilmektedir.

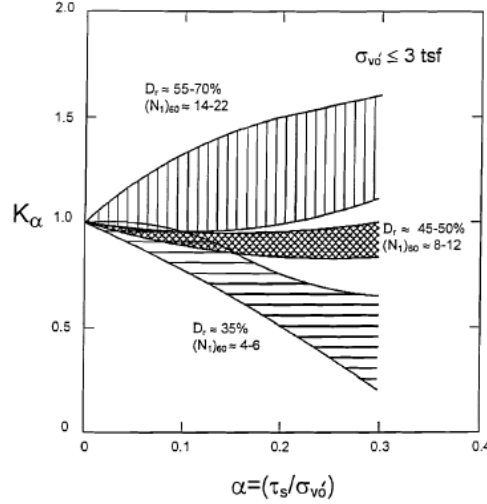
$$CRR_{\sigma'v0,\alpha} = CRR_{\sigma'v0=1atm,\alpha} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\alpha} \quad (2)$$

Bu ifadede yer alan K_{σ} ve K_{α} ölçekleme faktörleri, geoteknik deprem mühendisliğinin kritik araştırma konularından biri olup geçmişten günümüze çok sayıda araştırmacı, deneysel ya da saha gözlemlerine dayalı çalışmalar ile pratik kullanıma uygun model geliştirmiştir (Harder ve Boulanger, 1997; Vaid vd., 2001; Boulanger, 2003; Çetin vd., 2018). Çetin ve Bilge (2015), görece yakın tarihli çalışmalarında, o döneme kadar yayınlanan çalışmalarını değerlendirmiş, bunun ardından zemin davranışını değerlendirmek üzere bütünlük bir model önerisinde bulunmuşlardır. İlgili çalışmada ifade edildiği üzere K_{σ} faktörünün nitel değişimi konusunda bir görüş birliği olsa da nicelik anlamında bir uzlaşma bulunmamaktadır. K_{α} faktörüne yönelik öneriler ise gerek nitel gerekse de nicelik olarak belirgin şekilde ayrılmaktadır; ancak bu bildiri kapsamında ele alınan benzeri problemlerin değerlendirilmesinde bu düzeltmelerin mutlak surette dikkate alınması gerekmektedir.

Çetin vd. (2018) tarafından önerilen geliştirilen model (Denklem 1), $\sigma'v0$ değerini bir model parametresi olarak kullanmakta ve model içerisinde otomatik olarak K_{σ} düzeltmesi yapmaktadır. Dolayısı ile Denklem 2'de harici olarak gösterilen bu düzeltmenin yapılması,



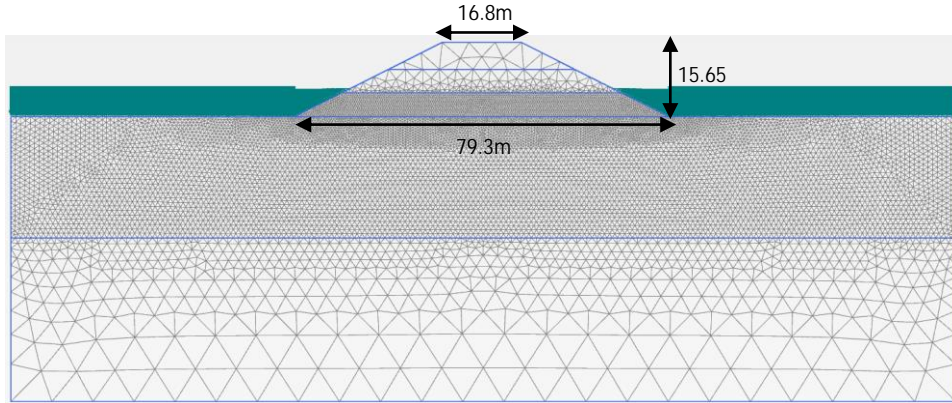
seçilen CRR modeli nedeniyle gerekli olmamıştır. Öte yandan, özellikle dolgu topoğunda yoğunlaşması öngörülen kayma gerilmelerinin K_α düzeltmesi uygulanarak dikkate alınması gerekmektedir. Bu bölümün önceki kısımlarında belirtildiği üzere, literatürde K_α düzeltme faktörünün etkileri konusunda belirgin fikir ayrılıkları bulunmaktadır. Bu problemin gelişime açık araştırma konularından biri olduğu aşikardır. Bu çalışma kapsamında, literatürün mevcut durumu ışığında, muhtemelen üzerine görüş birliği oluşmuş tek çalışma olan Harder ve Boulanger (1997) yönteminden faydalanılması uygun görülmüştür. Bu çalışma, NCEER çalışma grubu tarafından yayınlanan sonuç raporunda yer almakta olup, geliştirilen abak çözüm ise Şekil 3 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 3. Harder ve Boulanger (1997) tarafından önerilen K_α ölçekleme faktörleri

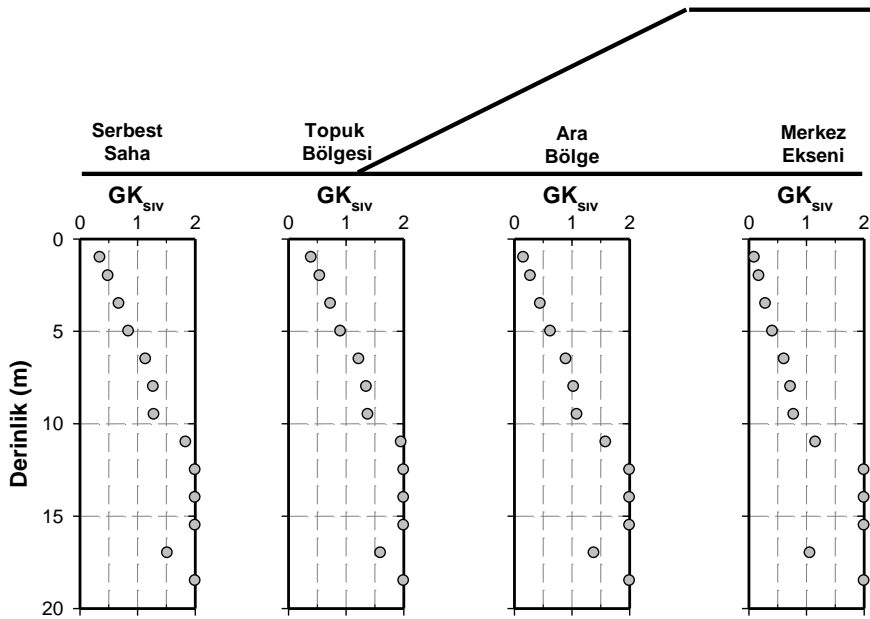
Şekil 3'ten takip edilebileceği üzere bu abak çözüm, α olarak isimlendirilen ve deprem öncesi statik yükleme koşullarında var olan kayma gerilmelerinin aynı yatay düzleme tesir eden düşey efektif gerilmeye oranını temsil eden bir girdi parametresinin kullanımını gerektirmektedir. Dolayısı ile K_α değerinin belirlenmesi için, teşkil edilecek yaklaşım dolgusu temelinde meydana gelecek gerilmelerin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu amaçla görece basit el çözümlerin kullanılması mümkün olsa da hassas hesap yapabilmek adına yaklaşım dolgusu altında meydana gelecek efektif düşey (σ'_{v0}) ve kayma (τ) gerilmelerin belirlenmesi için sayısal analiz gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Bu amaçla, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak geliştirilen Plaxis2D ticari yazılımı kullanılmıştır. Proje başlangıcında iletilen yaklaşım dolgusu tipik kesiti dikkate alınmak üzere model geometrisi teşkil edilmiş ve kurulan sonlu elemanlar ağı Şekil 4 kapsamında sunulmuştur. Yaklaşım dolgusunun ebatları da bütünlük ve fikir vermek adına aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Dolgunun geometrik tasarımı ve stabilitesi projenin sorumluluk matrisi uyarınca tarafımıza ait olmayıp, bu veriler tarafımıza iletiği şekilde kullanılmıştır. Sayısal modellemenin amacı i) dolgunun stabilite tahkiki, ii) yapım aşamasında meydana gelebilecek deplasmanların hesaplanması ya da iii) dolgu tabanında meydana gelebilecek taşıma gücü aşılması probleminin değerlendirilmesi olmadığı için modelleme aşamasında doğrusal elastik nitelikte bir malzeme modeli kullanılması yeterli görülmüştür. Şekil 2 kapsamında şematik olarak gösterilen 3 farklı kesimde, dolgu taban kotundan itibaren SPT deney verisi bulunan derinlik seviyeleri için kayma ve düşey efektif gerilme değerleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Bu değerlerin oranı α değerine karşılık gelmektedir, dolgu tabanındaki kritik görülen kesimlerde (merkez eksen, ara bölge ve topuk bölgesi) farklı derinlik seviyeleri için K_α değeri bu doğrultuda belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre

hesaplanan düşey efektif gerilme değerleri ise Çetin vd. (2018) yöntemi uyarınca yapılan CRR hesaplarında girdi parametresi olarak kullanılmıştır.



Şekil 4. Gerilme değişimlerini belirlemek üzere kullanılan sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler ile belirlenen gerilme değerleri esas alınarak, K_{σ} ve K_{α} faktörleri belirlenmiş, kritik görülen kesimlerdeki farklı derinlik seviyeleri için GK_{SIV} değerleri hesaplanmış ve bunlar serbest saha koşulları için hesaplanan değerler kıyaslamalı olarak Şekil 5 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 5. Sıvılaşma tetiklenme analiz sonuçlarının mekan bazlı değişim

Şekil 5 kapsamında sunulan analiz sonuçları uyarınca, i) senaryo deprem koşulları altında zemin sıvılaşmasının kritik bir problem olacağı öngörülmüştür, ii) hesaplanan GK_{SIV} değerleri, dolgu taban seviyesinden itibaren ilk 5.0 m boyunca tutarlı şekilde sınır değer olan 1.0'ın altındadır, iii) bu gözlem merkez, ara ve topuk bölgelerinin tamamı için geçerlidir; ancak hesaplanan GK_{SIV} değerlerine göre en kritik kesimin merkez bölgesi olduğu görülmektedir, iv) literatürdeki K_{σ} modelleri dikkate alındığı zaman (Youd vd., 2001; Çetin ve Bilge, 2015) artan düşey efektif gerilme ile birlikte ölçekleme faktörünün özellikle gevşek – orta sıkı haldeki kumlu zeminler için belirgin şekilde 1.0 değerinin altına düştüğü bilinmektedir, bu kesimdeki kohezyonsuz zeminlerin orta sıkı halde olması nedeniyle hesap sonuçlarının öngörülen davranışla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır, v)



görece yüksek statik kayma gerilmelerinin ortaya çıkması beklenen topuk bölgesi için hesaplanan GK_{SIV} değerleri sınır değerinin altındadır; ancak değerlendirmeler için seçilen Harder ve Boulanger (1997) abak çözümü orta sıkı – sıkı durumdaki zeminler için 1.0 ve üzerinde K_α değerleri önerdiğinden, bu kesimlerdeki GK_{SIV} değerleri diğer kesimlere nazaran daha yüksek mertebelerde olarak hesaplanmıştır. Hesap sonuçlarına istinaden yapılan bu gözlemler, deprem yükleme koşulları altında kohezyonsuz zeminler için beklenen genel davranış eğilimleri ile uyumludur. Bildiriye konu olan bu proje özelinde, bu ve diğer zemin araştırma sondaj kuyularından derlenen veri uyarınca yaklaşım dolgusunun bitişi ve iskele yapısının başlangıç sınırları yeniden düzenlenerek tedbir alınması mümkün olmuştur. Öte yandan, özellikle K_α düzeltmesi ile ilgili kayda değer bir belirsizlik olduğu aşıkardır ve bunun bazı zemin profillerinin değerlendirilmesinde yanıltıcı sonuçlar üretmesi de mümkündür. Bu durumu dikkate almak üzere, yaklaşım dolgusu altındaki gerilme değişimlerini hesaplamak üzere kurulan ve görece basit olarak addedilebilecek sayısal model, zeminlerin sıvılaşma davranışlarını dikkate alan bünye modeli (bu amaçla Plaxis2D yazılım kütüphanesinde bulunan UBC3D-PLM (Makra (2013)) isimli malzeme modeli kullanılmıştır) kullanılarak geliştirilmiş ve yarı – ampirik yöntemlerle yapılan değerlendirmelerin mertebesiz olarak kontrolü için ilave analizler gerçekleştirilmiştir. Bildirinin sayfa sınırları nedeniyle bahsi geçen bu çalışmaya ait detayların sunulması pratik olarak mümkün görülmemiştir; ancak yaklaşım dolgusu altında GK_{SIV} değerlerinin 1.0 ile 2.0 arasında değiştiği derinlik seviyeleri için hesaplanan aşırı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) değerleri kıyaslandığında benzer değişim eğilimleri saptanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bildiri kapsamında, Akdeniz bölgesi sınırları içerisinde planlanan bir endüstriyel tesise ait açık deniz yapısının parçası olarak imal edilecek yaklaşım dolgusunun temel zeminlerinin sıvılaşma potansiyelinin irdelenmesi üzerinde durulmuştur. Proje yapısının özelliği gereği, tasarım çalışması geoteknik ve deprem mühendisliği alanındaki farklı uygulamalarını içermiştir. Bildirinin sayfa sınırları nedeniyle bunlar özetlenmiş, asıl olarak dolgu yapısının varlığı nedeniyle ortaya çıkacak gerilme koşullarının (düşey efektif ve kayma gerilmelerindeki değişim) sıvılaşma tetiklenme analizlerinde ne şekilde ele alınabileceğine ilişkin bir örnek uygulama sunulması hedeflenmiştir.

Bildirinin bütünlüğü adına mevcut zemin araştırma ve sahanın depremselliğine ilişkin veriler sunulduktan sonra yarı – ampirik yöntemlerle yapılan değerlendirmelerin ana hesap adımları tariflenmiştir. Deterministik bir yaklaşım ile sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı hesaplanan çalışma kapsamında, tekrarlı kayma gerilme oranı (CSR) belirlemek üzere saha tepki analizleri gerçekleştirilmiş, tekrarlı kayma mukavemet oranı (CRR) hesaplanırken ise halihazırda SPT deney verisi bulunduğu için Çetin vd. (2018) tarafından önerilen yöntemden faydalanılmıştır. Bahsi geçen değerlendirme yöntemi (ve bunun benzerleri) serbest sahalar için geliştirilmiş olduğundan, yaklaşım dolgusu temel zeminlerinde meydana gelecek yeni gerilme koşullarını dikkate almak üzere K_σ ve K_α ölçekleme faktörleri uygulanmıştır. Temel altındaki gerilme koşullarını hassas şekilde belirlemek üzere sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve gerilme ölçekleme faktörleri, literatürdeki mevcut tartışmalara da atıfta bulunmak üzere, seçilmiştir. K_σ ve K_α düzeltmeleri sırasıyla Çetin vd. (2018) ile Harder ve Boulanger (1997) çalışmalarında önerilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Hesap sonuçları, dolgunun merkez eksenini altında azami seviyelere ulaşan düşey efektif gerilmelere bağlı olarak



GK_{siv} değerlerinin asgari seviyelere düştüğüne işaret ederken, dolgunun topuk bölgelerinde ise sınır değerlerin altında (<1.0) olmakla birlikte merkez bölgesine kıyasla daha yüksek GK_{siv} değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Bu çıkarımlar, doğrudan kullanılan K_α ilişkisinden etkilenmektedir. Bu proje özelinde yarı-ampirik yaklaşımlarla elde edilen sonuçların, kohezyonsuz zeminlerin göstermesi öngörülen dinamik zemin davranışı ile uyumlu olduğu görülmüş ve bunlar kontrol amacıyla gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki girift sayısal analiz sonucuyla desteklenmiş olsa da, bu tip değerlendirmelerde problemin doğası gereği içerdiği belirsizlikler ve mevcut yöntemlerin sınırlamalarının mutlaka göz önünde bulundurulmasının altı çizilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Boulanger, R.W. (2003), "Relating K_α to relative state parameter index", J. of Geotech. Geoenv. Eng., 129(8), 770-773.
- Castro, G., Poulos, S.J. (1977) Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 103, 501-516.
- Cetin, K.O., Bilge H. T., (2015), "Stress scaling factors for seismic soil liquefaction engineering problems: A performance-based approach. Perspectives on earthquake geotechnical engineering", edited by A. Ansal, Springer Int. Pub., Switz., 113-139.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M., Chowdhury, K. (2018). "SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard", Soil Dyn. Earthquake Eng., 113, 75 – 86.
- Harder, L.F., Boulanger, R.W. (1997), "Application of K_σ and K_α correction factors," Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, T.L. Youd and I.M. Idriss, eds., Tech. Rep. NCEER-97-0022, SUNY, Buffalo, NY, 167-190.
- Hashash, Y.M.A., Phillips, C., Groholski, D. (2010), "Recent advances in non-linear site response analysis", 5th Int. Conf. Rec. Adv. Geo. Earth. Eng. Soil Dyn., Pp no. OSP 4.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2012), "Examination of SPT-based liquefaction triggering correlations" Earthq. Spectra, 28(3): 989-1018.
- Makra, A., (2013), "Evaluation of the UBC3D-PLM Constitutive Model for Prediction of Earthquake Induced Liquefaction on Embankment Dams", MSc thesis, Delft University of Technology.
- Schnabel, P. B. (1973). "Effects of Local Geology and Distance from Source on Earthquake Ground Motions" Phd. Dissertation, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H.B., (1983), "Earthquake-resistant design of earth dams" *Proc. of Symposium on Seismic Design of Embankments and Caverns*, ASCE, Philadelphia, Pennsylvania.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis." Report No EERC 70-10, Earthq. Eng. Res. Cen., Un. of Cal., Berkeley.
- Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği, 2020.
- Vaid, Y.P., Stedman, J.D., Sivathayalan S. (2001), "Confining stress and static shear effects in cyclic liquefaction" Can. Geotech. J., 580-591.
- Youd, T.L., I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian, R. Dobry, W.D.L. Finn, L.F.Harder, M.E. Hynes, K. Ishihara, J.P. Koester, S.C.C. Liao, W.F. Marcuson, III., G.R. Martin, J.K. Mitchell, Y. Moriwaki, M.S. Power, P.K. Robertson, R.B. Seed, K.H. Stokoe, II. (2001), "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" J. Geotech. Geoenvir. Eng. 127, 817–833.

