

SIVILAŞMA POTANSİYELİ İNDEKSİNE (LPI) DAYALI SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİNİN İRDELENMESİ: BİR VAKA ANALİZİ

AN INVESTIGATION OF LIQUEFACTION ANALYSIS METHODS BASED ON THE LIQUEFACTION POTENTIAL INDEX (LPI): A CASE STUDY

Sena Begüm KENDİR¹, H.Turan DURGUNOĞLU², Emel SIKICI³, Ahmet Cevdet BAYMAN⁴,
Önder AKÇAKAL⁵

ÖZET

Kohezyonsuz zeminlerin (kum, siltli kum, silt) dinamik yükler altında sıvılaşması geoteknik mühendisliğinde sıkça karşılaşılan ve ciddi hasarlara sebep olan bir zemin davranışıdır. Geoteknik mühendisliğinde farklı türdeki zeminlerin sıvılaşma direncini değiştiren koşulları anlamak için birçok önemli çalışma yapılmıştır. Uygulamada ise zemin sıvılaşmasına karşı güvenlik faktörlerini hesaplamak için çeşitli değerlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Analizlerde zeminler için sıvılaşmaya karşı bir güvenlik sayısı (GS) bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu değer temelde oluşabilecek hasarın tanımlanabilmesi için tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Tüm etkilerin bir arada değerlendirilmesi gereğinden yola çıkılarak, analizlerde yeni bir bakış açısı ile bir "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)" hesaplanarak temel altındaki zemin kolonunun bütünsel davranışı irdelenebilmektedir. Temellerde sıvılaşma kaynaklı oturma, farklı oturma, dönmelerin ve yanal yayılmaların sayısal ve analitik yöntemler ile tahmin edilebilmesi ve bu hasarların deprem öncesi uygulanacak çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ile azaltılması mümkün olmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak, inşa edilecek bir endüstriyel tesis yapısı kapsamında sahada yapılan arazi deneyleri değerlendirilmiş, geoteknik zemin modellemesi yapılmıştır. İdealize edilerek elde edilen zemin profili üzerinde, literatürde kabul görmüş ve sıvılaşmayı belirleyen analitik yaklaşımlar kullanılarak her tabaka için sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Sıvılaşma potansiyeli analizlerinde: Standart Penetrasyon Testi (SPT), Konik Penetrasyon Testi (CPT) ve Jeofizik yöntemlerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Farklı Deprem Yer Hareketi düzeyleri için yerel zemin koşulları da dikkate alınarak zeminlerin sıvılaşabilirliği ve farklı zemin iyileştirme senaryoları için "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)"ne dayalı sıvılaşma analizleri ve sonuçları irdelenmiştir. Çıkan sonuçlar

¹ Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., begum.kendir@zeminas.com.tr (Sorumlu yazar)

² Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., uran.durgunoglu@zeminas.com.tr

³ Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., emel.hacialioglu@zeminas.com.tr

⁴ Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., cevdet.bayman@zeminas.com.tr

⁵ ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş., onder.akcakal@zetas.com.tr



değerlendirildiğinde, elde edilen verilerin geoteknik mühendislerinin sıvılaşmadan kaynaklı hasar risklerini değerlendirebilmesine ve uygun tasarım kararları alabilmelerine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Geoteknik Deprem Mühendisliği, Sıvılaşma Analizi, Sıvılaşma Potansiyel İndeksi(LPI)

ABSTRACT

Liquefaction of cohesionless soils (sand, silty sand, and silt) is a common soil behavior in geotechnical engineering and can cause serious damage under dynamic loadings. Many important studies have been conducted in geotechnical engineering to understand the conditions that modify the liquefaction resistance of different types of soils. In practice, conventional liquefaction assessment methods are used to calculate factor of safety against soil liquefaction, and factor of safety (FS) against liquefaction is assigned for soils in the analysis. Recent studies show that this value is not sufficient to identify the potential damage that may occur in the foundation and induced by the subsoil. Based on the need to evaluate all the effects together, a "Liquefaction Potential Index (LPI)" can be calculated with a new perspective in the analysis and the whole behavior of the soil column under the foundation could be examined. Liquefaction induced settlement, differential settlement and rotation of foundations and lateral spreading of the subsoil can be calculated by numerical and analytical methods and these damages can be reduced by various ground improvement methods. In this case study, within the scope of an industrial facility structure to be constructed, geotechnical modelling was performed and the soil profile was determined by evaluating the field tests performed in the field. On this idealized soil profile, the liquefaction potential for each layer was determined by using analytical methods. The data obtained from Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) and Geophysical methods were used to analyze the liquefaction potential. In liquefaction analyses, results based on "Liquefaction Potential Index (LPI)" for different ground improvement scenarios and liquefiability of soils considering local soil conditions for different Earthquake Ground Motion levels were examined. The results will lead geotechnical engineers to assess the risk of liquefaction damage and make appropriate design decisions prior to potential earthquakes.

Keywords: Geotechnical Earthquake Engineering, Liquefaction Analysis, Liquefaction Potential Index (LPI)

1. GİRİŞ

Kohezyonsuz zeminlerin (kum, siltli kum, silt) sıvılaşması geoteknik mühendisliğinde sıkça karşılaşılan ve ciddi hasarlara sebep olan bir zemin davranışıdır. Bu konuyla ilgili bilimsel araştırmalar ciddi bir şekilde 1960'ların başlarında meydana gelen Anchorage, Alaska ve Niigata, Japonya depremleriyle birlikte başlamıştır. Geoteknik mühendisliğinde farklı türdeki zeminlerin sıvılaşma direncini değiştiren koşulları anlamak için birçok önemli çalışma yapılmıştır.



Uygulamada, zemin sıvılaşmasına karşı güvenlik faktörlerini hesaplamak için çeşitli klasik sıvılaşma potansiyeli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Sıvılaşma analizlerinde genellikle temel altındaki zeminler için sıvılaşmaya karşı bir güvenlik sayısı (GS) bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu değerin tek başına temelde oluşabilecek hasarın tanımlanabilmesi için yeterli olmadığını ve sıvılaşmanın etkisinin; sıvılaşan zemin tabakasının kalın olduğu, yüzeye yakın olduğu ve ayrıca güvenlik sayısının (GS) 1.0'in çok altında olduğu durumlarda değiştiğini göstermektedir. Tüm bu etkilerin bir arada değerlendirilmesi gereğinden yola çıkarak analizlerde yeni bir bakış açısı ile bir "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)" hesaplanarak temel altındaki zemin kolonunun bütünsel davranışı irdelenebilmektedir.

Sıvılaşma potansiyelinin doğru değerlendirilmesi, mühendislik projeleri için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, sıvılaşma riski taşıyan alüvyon zemin tabakaları modellenmiş ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve ıslah yöntemleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, güncel bilimsel gelişmeler ışığında vaka analizleriyle literatür zenginleştirilmeli ve alandaki yeni yaklaşımlara katkıda bulunulmalıdır.

2. BİR VAKA ANALİ: PROJEYE AİT BİLGİLER

Sakarya ili, Akyazı ilçesinde bulunan söz konusu sahada arazi alanı yaklaşık 120.665,90m² olup, planlanan yapı alanı ise yaklaşık 60.000 m²'dir. Sahada gerçekleştirilmiş olan sondaj noktaları aplikasyon çalışmalarına göre arazi kotları +59.16m ile +63.37m arasında değişmektedir.

2.1. Saha Araştırmaları

Söz konusu sahada zemin koşullarının belirlenmesine yönelik olarak detaylı zemin etüt ve araştırma çalışmaları Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanında, otuz altı (36) adet noktada derinlikleri 30,00 m ile 80,00 m arasında değişen toplam 1231,62m uzunluğunda sondaj kuyusu açılmıştır.

Zemin koşullarına bağlı olarak, otomatik sistem kullanılarak sistematik 1.5m ara ile ASTM D-1586 uyarınca toplam 810 adet Standart Penetrasyon Testleri gerçekleştirilerek SPT/N darbe sayıları belirlenmiş, karşılaşılan zemin koşullarına göre zeminlerde temsili numuneler alınmıştır. Ayrıca, yeraltı suyu durumunu gözlemlmek için seçilen sondaj kuyusuna delikli PVC borular yerleştirilmiştir.

Proje kapsamında inceleme alanında, on (10) noktada derinlikleri 8,64 m ile 24,36 m arasında değişen toplam 113,26 m uzunluğunda boşluk suyu basıncı ölçümlü konik penetrasyon testi (CPT-u) yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerden beş (5) tanesi sismik konik penetrasyon deneyi (SCPT-u) olarak tamamlanmıştır.



İnceleme alanının yüksek deprem riski bulunan bir bölgede bulunduğu göz önüne alındığında veri çeşitliliğini sağlayabilmek ve elde edilen bütün verilerin birbirleriyle uyumunu denetleyerek doğru ve güvenilir mühendislik yapılarının inşasına ışık tutabilmek için alanda sismik kırılma, 1D MASW (yüzeysel dalga analizi), Düşey Elektrik Sondaj (DES), Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT), Mikrotremör, Dairesel Dizilim Mikrotremör (SPAC) ve kuyu içi PS logging Etütleri gerçekleştirilerek veri işleme tabi tutulmuş ve yorumlanmıştır.

2.2. Zemin Özellikleri

İnceleme alanında zemin koşullarının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen tüm sondajlarda Kuvaterner yaşlı Alüvyon (Qal) birimler ile karşılaşmıştır. Mudurnu Çayı ve Küçükçek Deresi'nin oluşturduğu pekleşmemiş silt, kil, kum ve çakıl boyutu çökellere rastlanmış olup, tabaka kalınlıklarının noktadan noktaya değiştiği, tabakaların heterojen ve geçişli olarak bulunduğu gözlenmiştir. İnceleme alanında karşılaşmış olan Alüvyon birime içerisinde yer alan çökellere ait detaylar aşağıda verilmektedir.

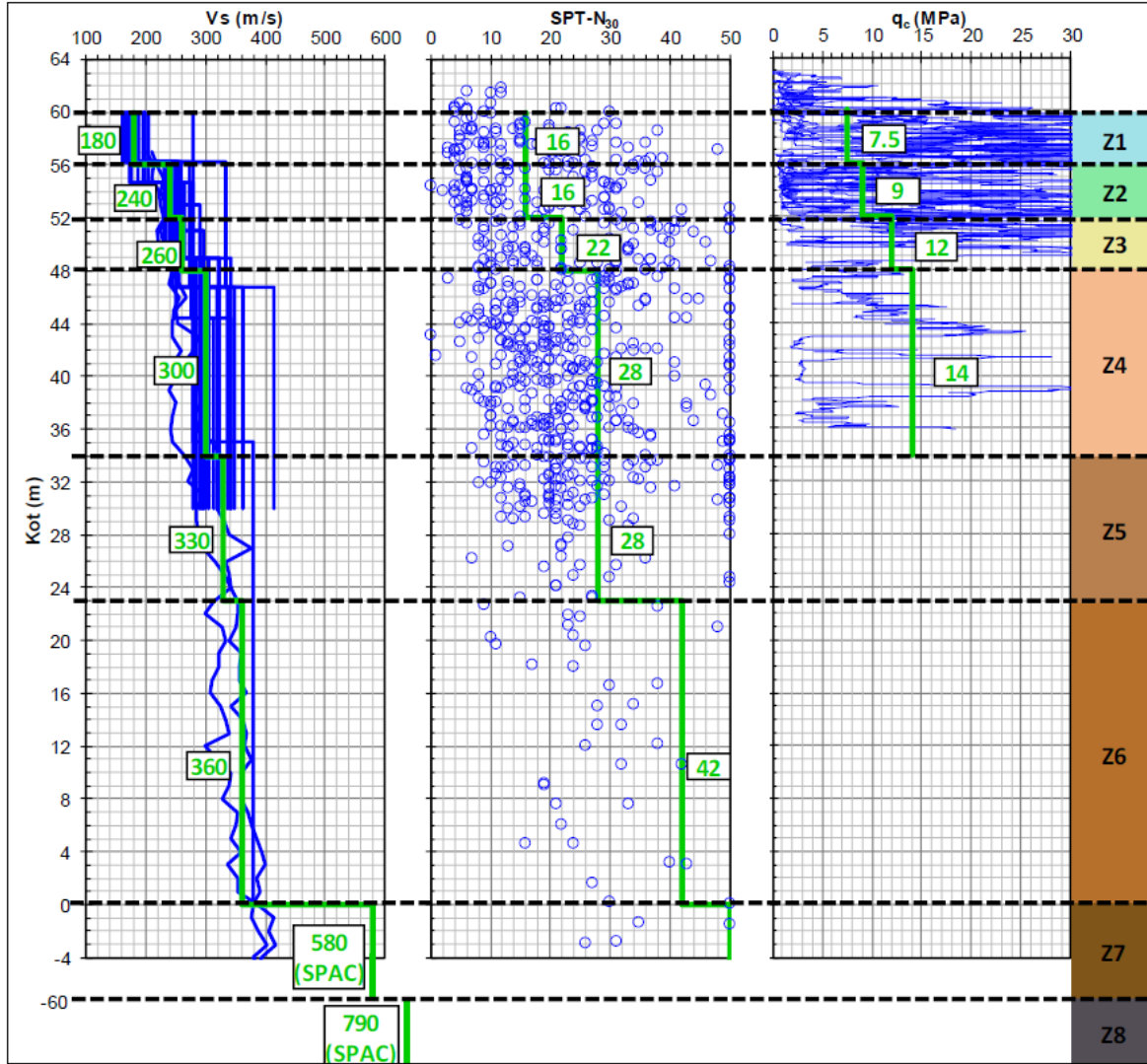
Tablo 1. İdealize zemin profili

Zemin Tipi	Kot	
Siltli Killi Kumlu Çakıl-1	+60.00m	+52.00m
Siltli Killi Kumlu Çakıl-2	+52.00m	+48.00m
Siltli Killi Kumlu Çakıl-3	+48.00m	+34.00m
Çakıllı Kumlu Kil-1	+34.00m	+28.00m
Çakıllı Kumlu Kil-2	+28.00m	+23.00m
Kumlu Kil	+23.00m	-6.00m
Siltli Killi Kumlu Çakıl-4	-6.00m	-20.00m

Yapılan sondajlardan elde edilen örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. Laboratuvarı'nda deneyler yapılmış ve numuneler sınıflandırılmıştır. Ayrıca, Konik Penetrasyon Deneyi (CPTu) de dahil olmak üzere birçok arazi deneyi gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanında zemin koşullarının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen tüm bu çalışmalarda Kuvaterner yaşlı Alüvyon (Qal) birimler ile karşılaşmıştır. Mudurnu Çayı ve Küçükçek Deresi'nin oluşturduğu pekleşmemiş silt, kil, kum ve çakıl boyutu çökellere rastlanmış olup, tabaka kalınlıklarının noktadan noktaya değiştiği, tabakaların heterojen ve geçişli olarak bulunduğu gözlenmiştir. İnceleme alanında karşılaşmış olan Alüvyon birim içerisinde; çakıl, kum, silt, kil çökeller yer almaktadır.

Buna göre, arazide yapılmış olan sondajlarda kum, silt ve kil oranları farklılık gösteren, sıvılaşma potansiyeli mevcut kalın alüvyonel zeminlere rastlanmaktadır. Alüvyon kalınlığının fazla olduğu buna benzer alanlarda yalnızca $V_{s,30}$ değerine bağlı olarak yapılabilecek dinamik analiz/modellemeler yetersiz kalacağından, bölgede detaylı bir jeofizik araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 17 profil MASW, 9 profil DES, 1 profil ERT, 4 noktada Mikrotremör, 2 adet PS Logging ve 1 noktada SPAC (Dairesel Dizilim Mikrotremör) çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, mühendislik anakayası niteliğindeki ($V_s:790$ m/s) birimin 120.0 m derinlikte bulunduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak "Sahaya Özel Deprem Tehlikesi Analizi" gerçekleştirilmiş ve ilgili deprem parametreleri belirlenmiştir. Bu birimlerinin tasarım parametreleri Şekil 1'de verilmiştir.





Şekil 1. Doğal zemin için belirlenen V_s , SPT- N_{30} , q_c değerleri ve idealize zemin profili

3. ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Sıvılaşma potansiyelini analizlerinde çeşitli testler kullanılmaktadır. Bunlar arasında Standart Penetrasyon Testi (SPT), Konik Penetrasyon Testi (CPT) ve laboratuvar deneyleri bulunur. Hangi testin tercih edileceği, uygulanacak yöntemin spesifik gereksinimlerine ve kullanılabilir kaynaklara bağlıdır.

Bu çalışma kapsamında temel altındaki zemin kolonunun bütünsel davranışı incelenmek için Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT)'nden elde edilen veriler ile "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)"'ne dayalı sıvılaşma analizleri yapılacaktır.

Granüler Zeminler İçin Sıvılaşma Analizi

Sıvılaşmaya karşılık güvenlik faktörü, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği uyarınca aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir;



$$\tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10 \quad (1)$$

Burada τ_R ve τ_{deprem} , sırası ile sıvılaşma direncini ve zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir.

SPT sonuçlarına göre sıvılaşma analizi:

SPT Verilerinin İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmesi (TBDY,2018-Bölüm 16B.2.2):

İnce dane içeriğine (IDI) göre düzeltilmiş darbe sayıları $N_{1,60f}$, Türkiye Deprem Yönetmeliği (2018), Denk. (16B.3a) ile hesaplanmaktadır.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60f} \quad (2)$$

Denk. (16B.30a)'daki α ve β katsayıları ise Denk.(16B.3b)'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 \quad ; \beta=1.0 && (IDI \leq \%5) \\ \alpha &= \exp [1.76 - (190 / IDI^2)] \quad ; \beta = 0.99+IDI^{1.5} / 1000 && (\%5 < IDI \leq \%35) \\ \alpha &= 5.0 \quad ; \beta=1.2 && (IDI \geq \%35) \end{aligned} \quad (3)$$

Sıvılaşma Direncinin Hesaplanması (TBDY,2018-Bölüm 16B.3):

2018 Türkiye Deprem Yönetmeliği, Bölüm 16.6 uyarınca, sıvılaşma direnci τ_R , moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşılık gelen çevrimsel dayanım oranının ($CRR_{M7.5}$) tasarım depremi moment büyüklüğü katsayısı (C_M) ve efektif düşey gerilme (τ'_{vo}) ile çarpılması ile elde edilecektir.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} C_M \sigma'_{vo} \quad (\text{TBDY,2018 – Denk. 16B.4a}) \quad (4)$$

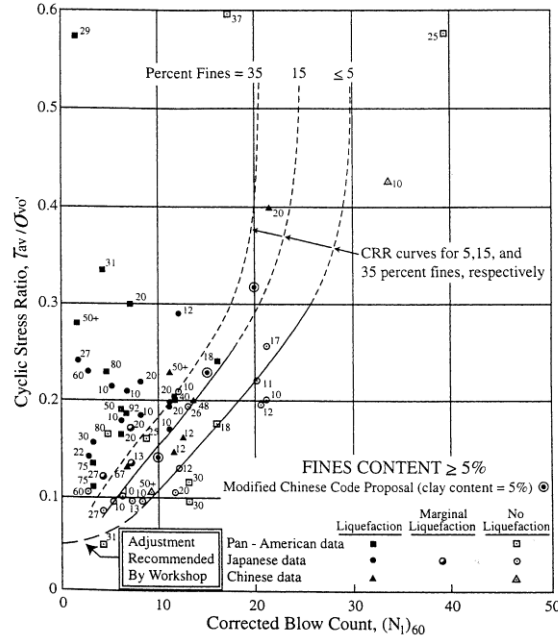
Çevrimsel dayanım oranı aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilecektir (2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ek 16B);

$$CRR_{M7.5} = 1/(34-N_{1,60f}) + (N_{1,60f})/135 + 50/(10 N_{1,60f}+45)^2 - 1/200 \quad (5)$$

Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı (C_M), tasarım depremi büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanacaktır (2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ek 16B);



$$C_M = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (\text{TBDY,2018 – Denk. 16B.4c}) \quad (6)$$



Şekil 2. Devirsel Gerilme Oranı-Düzeltilmiş SPT/(N₁)₆₀ Değerleri (Youd. Et al, 2001)

Depremde Oluşan Kayma Gerilmesinin Hesaplanması (TBDY,2018-Bölüm 16B.4):

Zeminde oluşan kayma gerilmesi Türkiye Deprem Yönetmeliği (2018), Denk. (16B.5) ile hesaplanmaktadır.

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65\sigma_{vo} (0.4S_{DS})r_d \quad (7)$$

Burada σ_{vo} değeri sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi, r_d ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını, S_{DS} ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını ifade etmektedir.

Gerilme azaltma katsayısı, r_d değeri incelenen derinliğe (z) bağlı olarak Türkiye Deprem Yönetmeliği (2018), Denk. (16B.6)'daki bağıntı ile elde edilmektedir.

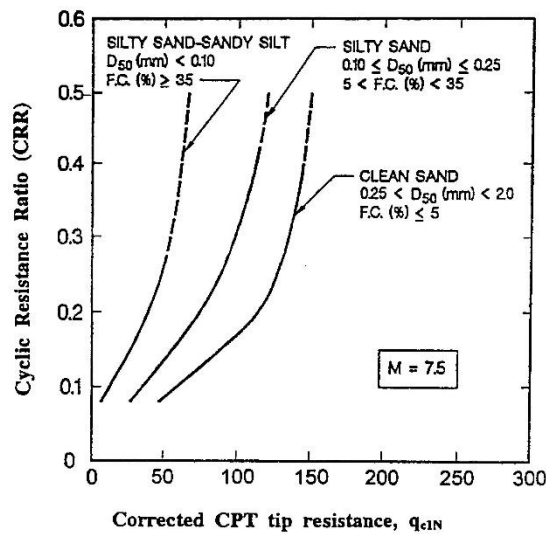
$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15\text{m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z & 9.15\text{m} \leq z \leq 23.0\text{m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008z & 23.0\text{m} \leq z \leq 30.0\text{m} \\ r_d &= 0.50 & 23.0\text{m} \leq z \leq 30.0\text{m} \end{aligned} \quad (8)$$



Sahada gerçekleştirilen SPT deneylerinden elde edilen sonuçlar için yukarıda detaylı açıklanan hesap yöntemi kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Proje alanı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (2018) yer alan deprem tehlike haritasında yüksek deprem riski bulunan bölgelerden birinde bulunmaktadır. Proje sahası zemin sınıfı ZF olup sahaya özel deprem risk analizi gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel sismik tehlike analiz sonuçları göz önünde bulundurularak DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için bulunan kısa periyot spektral ivme katsayısı $S_{DS}=2.007$ olarak kullanılmış, magnitüd değeri ise $M_W=8.05$ olarak kabul edilmiştir.

CPT sonuçlarına göre sıvılaşma analizi

Son yıllarda temel mühendisliğindeki gelişmelere paralel olarak arazi test metotlarının artan önemi vurgulanmış olup özellikle konik penetrasyon deneyi yapılan sahalardan zemin sıvılaşmasına ilişkin çok sayıda veri elde edilmiştir. Böylelikle, devirsel direnç oranının hesaplanmasına yönelik olarak, bugüne dek CPT verilerinden korelasyonla SPT/N darbe sayılarına geçilmesi ve SPT/N değerlerinden yararlanılarak sıvılaşma analizlerinin gerçekleştirilmesi yerine, doğrudan CPT verilerinin kullanımı mümkün hale gelmiştir. Sonuç olarak zemin profilinin belirlenmesinde sürekli veri sağlayan CPT yöntemi esas alınarak zemin sıvılaşması analiz metotları geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, Robertson ve Fear (1997) metodu uygulanmıştır.



Şekil 3. Düzeltilmiş CPT Uç Dayanımlarına göre Devirsel Direnç Oranı



Şekil 3'de temiz kumlar ($-#200\%<5$) için devirsel direnç oranının ($CRR_{7.5}$) belirlenmesinde yararlanılan grafik sunulmaktadır. Grafikte sunulan eğriler 7.5 magnitüd üdeki depremler için geçerli olup, geçmiş depremlerde zemin sıvılaşmasının gözlemediği veya gözlenmediği durumlar dikkate alınarak söz konusu sahalar için hesaplanan CRR değerlerinin düzeltilmiş ve normalize edilmiş CPT uç mukavemetinin fonksiyonu olarak çizilmesi sonucunda elde edilmiştir.

Diğer magnitüd deki depremler için CRR aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$CRR=(CRR_{7.5}) (MSF) \quad (9)$$

Diğer bir deyişle, farklı magnitüd etkisi dikkate alınarak söz konusu zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanımını temsil eden güvenlik faktörü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir:

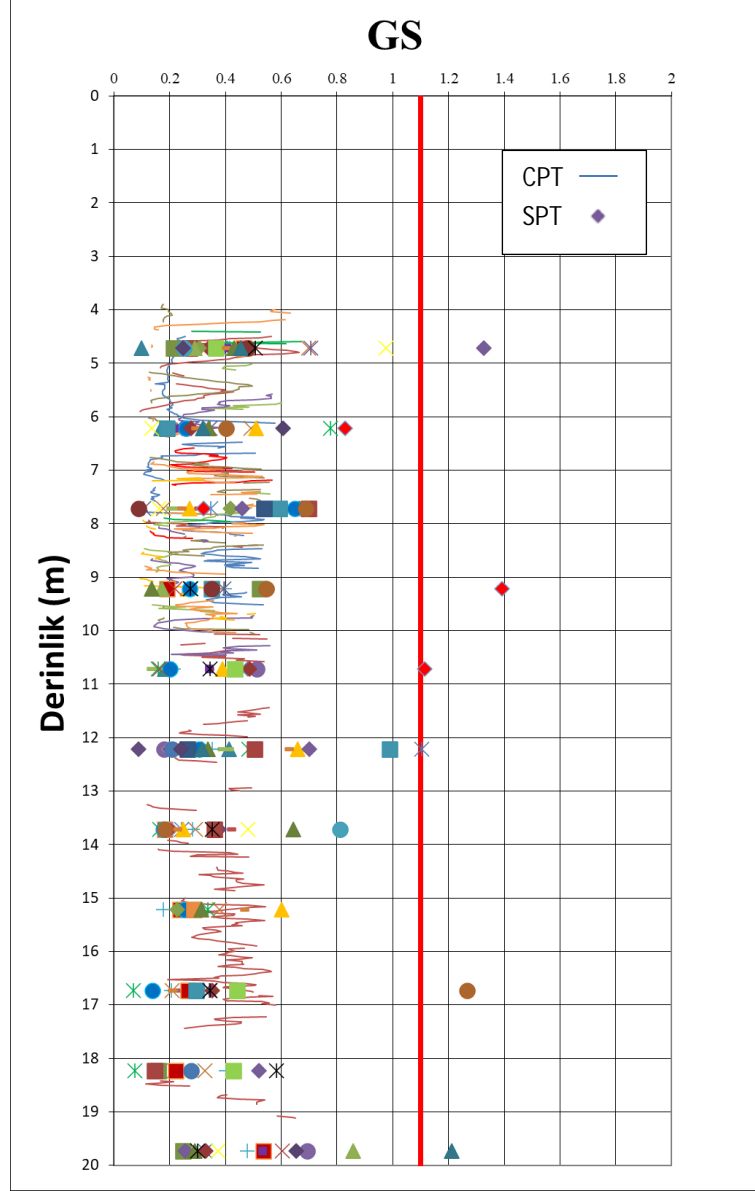
$$GF= (CRR_{7.5}/CSR) . MSF \quad (10)$$

Burada, MSF magnitüd düzeltme faktörü olup önerilen farklı değerler literatürde Youd ve diğerleri (1997) tarafından özetlenmiştir. Bu raporda Idriss (1982) tarafından literatürde verilen faktörlerin tekrar değerlendirilmesi sonucunda önerilen ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanan düzeltme faktörleri dikkate alınmıştır.

$$MSF=10^{2.24/M^{2.56}} \quad (11)$$

Yukarıda verilen metodolojiye uygun olarak CPT sonuçlarında detaylı sıvılaşma potansiyeli analizleri yapılmıştır. CPT sonuçlarına göre sıvılaşma potansiyeli analizleri ilk 20m derinlik için yapılmış olup, ince dane düzeltmesi dikkate alınmıştır. CPT sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen sıvılaşma analizlerinde sahaya özel sismik tehlike analiz sonuçları göz önünde bulundurularak yüzeyde oluşacak pik yer ivmesi değeri $a_{max}=0.867g$ ve deprem magnitüdü $M_w=8.05$ olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarının derinlikle değişimi Şekil 4'de sunulmaktadır.





Şekil 4. SPT ve CPT Sonuçlarına Göre Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Faktörü Değerlerinin Derinlikle Değişim Grafiği

4. SIVILAŞMA POTANSİYELİ İNDEKSİNE(LPI) DAYALI DEĞERLENDİRMELER

Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan tabakalarda güvenlik sayısının tespit edilmesinin ardından, sıvılaşma derinliği boyunca (yüzeyden ilk 20 m) sıvılaşma potansiyeli indeksi(LPI) hesaplanarak bölgesel sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmesi yapılmıştır.

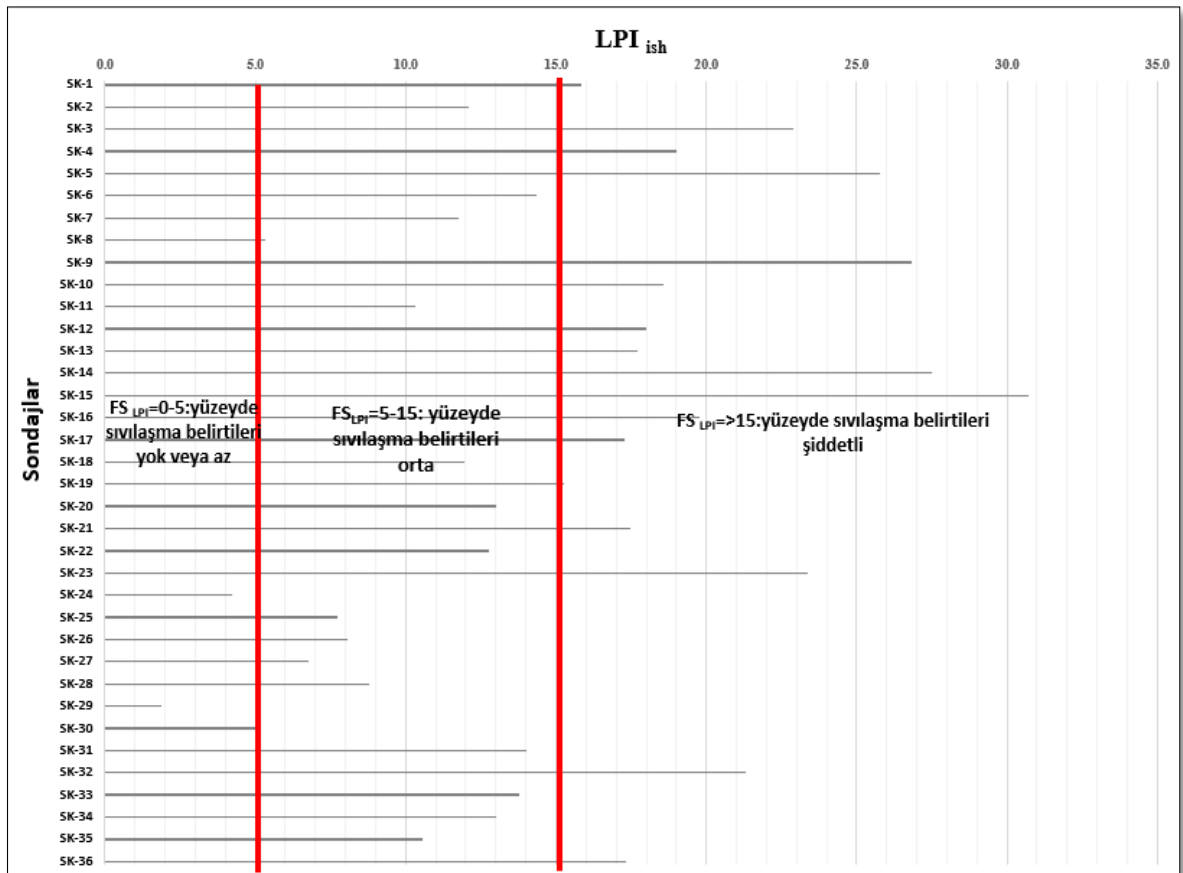
Ishihara(1985) yayınından faydalanılarak yapılan Maurer(2015) tarafından tanımlanan "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI_{ish})" değeri aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır.



$$LPI_{ish} = \int_{H_1}^{20m} F_{LPI_{ish}}(FS) \frac{25.56}{z} dz \quad (12)$$

Burada, $F_{LPI_{ish}}$ indisi sıvılaşmaya esas güvenlik faktörüne bağlı ve $m(FS)$ fonksiyonu ise derinliğe bağlı olarak hesaplanmakta olup ilgili denklemler aşağıda sunulmaktadır.

$$\begin{aligned} F_{LPI_{ish}}(FS) &= 1 - FS \quad \text{if } FS \leq 1 \text{ and } H_1 \cdot m(FS) \leq 3 \\ F_{LPI_{ish}}(FS) &= 0 \quad \text{if } FS > 1 \text{ or } H_1 \cdot m(FS) > 3 \\ m(FS) &= \exp\left\{\frac{5}{25.56 \cdot (1 - FS)}\right\} - 1 \quad \text{if } FS \leq 0.95 \\ m(FS) &= 100 \quad \text{if } FS > 0.95 \end{aligned} \quad (13)$$



Şekil 5. İslah Öncesi LPI-ish Değerlerinin Dağılımı

LPI_{ish} analizi sonucuna göre; sahada yer yer orta derecede yer yer ise şiddetli sıvılaşma hasarının oluşabileceği görülmektedir. Zemin iyileştirme yapılarak LPI_{ish} değerinin 5'ten küçük olması hedeflenmelidir.



5. SONUÇLAR

Sıvılaşma potansiyelinin doğru değerlendirilmesi, mühendislik projeleri için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, sıvılaşma riski taşıyan alüvyon zemin tabakaları modellenmiş ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve ıslah yöntemleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, güncel bilimsel gelişmeler ışığında vaka analizleriyle literatür zenginleştirilmeli ve alandaki yeni yaklaşımlara katkıda bulunulmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sundukları değerli katkıları ve sağladıkları destekler için Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş.'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Robertson, P.K., Fear, C. E. Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on SPT and CPT, Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical report NCEER-97-0022, pp.41-87, 1997.
- H.B. Seed and I.M. Idriss, Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph, Berkeley, CA, 1982.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes. Geotechnique (s. 351-451).
- Iwasaki,T, Arawaka,T, & Tokida,T. (1982). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Southampton,UK: Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and.
- Maurer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M. & Bradley, B. A. (2014). Evaluation of the liquefaction potential index for assessing assessing liquefaction hazard. J. Geotech. Geoenviron. Engng 140, No. 7, 04014032.

