

## ZEMİN SIVILAŞMASI TETİKLENME ANALİZİNİN FARKLI METOTLARA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

### EVALUATION AND COMPARISON OF SOIL LIQUEFACTION TRIGGERING ANALYSIS ACCORDING TO DIFFERENT METHODS

Orhan GÖK<sup>1</sup>, Ozan KANGAL<sup>2</sup>, Utku AKIN<sup>3</sup>

#### ÖZET

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi ve sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde sıvılaşma/yumuşama tetiklenme analizleri için sıklıkla kullanılan yöntemlerdeki analizler genel olarak Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verisi baz alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında “basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi” yöntemi ve Boulanger ve Idriss (2014) ile Çetin vd. (2018) yaklaşımları kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi ve sıvılaşma tetiklenme değerlendirmeleri ele alınmaktadır. İncelenen metotlardaki ilgili kabullerin, yaklaşımların ve elde edilen sonuçlar arasındaki farkların kıyaslanabilmesi için seçilen örnek bir projeye ait araştırma çalışması verileri üzerinden tüm yöntemler ile sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmesi sıvılaşma tetiklenmesi analizleri yapılmaktadır. Farklı zemin tipleri için ayrı ayrı yapılan detaylı analiz ve çalışmalarda her yöntem için gerekli girdiler ile tekrarlı direnç oranı (CRR) ve tekrarlı gerilme oranı (CSR) hesaplanmakta olup, çalışmalar sonucunda yöntemler arasında sıvılaşma tetiklenmesi açısından farklı sonuçlar elde edilebileceği ve sıvılaşma tetiklenmesine karşı daha düşük güvenlik sayısı elde edilebileceği gözlemlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin sıvılaşma değerlendirmesi, sıvılaşma tetiklenme analizi, deprem, tekrarlı yüklemeler

#### ABSTRACT

The analyses in the methods frequently used for the assessment of liquefaction potential and liquefaction/softening trigger analyses in soils with liquefaction potential are generally carried out based on Standard Penetration Test (SPT) data. Within the scope of this study, the liquefaction potential assessment and liquefaction trigger assessments are discussed using the “simplified soil liquefaction assessment” method and the Boulanger and Idriss (2014) and Çetin et al. (2018) approaches. In order to compare the relevant assumptions,

<sup>1</sup> İnşaat Müh., Yüksel Proje, [ogok@yukselproje.com.tr](mailto:ogok@yukselproje.com.tr) (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> İnşaat Müh., Yüksel Proje, [okangal@yukselproje.com.tr](mailto:okangal@yukselproje.com.tr)

<sup>3</sup> İnşaat Müh., Yüksel Proje, [uakin@yukselproje.com.tr](mailto:uakin@yukselproje.com.tr)



approaches and the differences between the results obtained in the examined methods, liquefaction potential assessment and liquefaction trigger analyses are carried out with all methods on the research study data of a selected sample project. In detailed analyzes and studies conducted separately for different soil types, cyclic resistance ratio (CRR) and cyclic stress ratio (CSR) are calculated with the necessary inputs for each method. As a result of the studies, different results can be obtained in terms of liquefaction triggering between the methods and lower factor of safety ratios can be obtained against liquefaction triggering.

**Keywords:** Soil liquefaction assessment, liquefaction triggering analysis, earthquakes, rapid loading

## 1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında, Yüksel Proje A.Ş. yüklenimi altında bulunan ve hemzemin olarak tasarlanan bir tramvay projesinin sıvılaşma potansiyeli ve risk durumunda sonuçlarının örnek bir temel sondajı üzerinden değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Proje güzergahında yerinde (in – situ) deneyler gerçekleştirilmiş olup sıvılaşma potansiyeli ve tetiklenme analizleri, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verileri baz alınarak belirlenmiştir. Tramvay hattının hemzemin olarak tasarlanması ve proje hassasiyeti dikkate alındığında hattın üzerinde yer alan zemin birimleri için sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri ile tetiklenme analizleri, tasarım aşamasında güvenli tarafta kalmak için farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilmiştir. Basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi yöntemi ile Boulanger ve Idriss (2014) ile Çetin vd. (2018) yaklaşımları kullanılarak proje hattı özelinde sıvılaşma tehlikesi ve riskleri değerlendirilmekte olup sıvılaşma potansiyeli ve tetiklenme analizi değerlendirmelerinin gösterebileceği farklılıklar ortaya konulmaktadır.

## 2. SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 2.1. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından hazırlanan ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği – Bölüm 16.6’da tariflenen sıvılaşma potansiyeli değerlendirme kriterleri, aşağıda verilmektedir. Buna göre;

- Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ( $PI < 12$ ) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanmaktadır.
- Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanmaktadır.
- Temel altı zeminlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerden oluştuğu ve bu zemin tabakalarında düzeltilmiş SPT vuruş sayısının,  $N_{1,60}$ , 30 darbe / 30 cm değerinden küçük olduğu durumlarda zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirmesi yapılmaktadır.



## 2.2. Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği (2020)

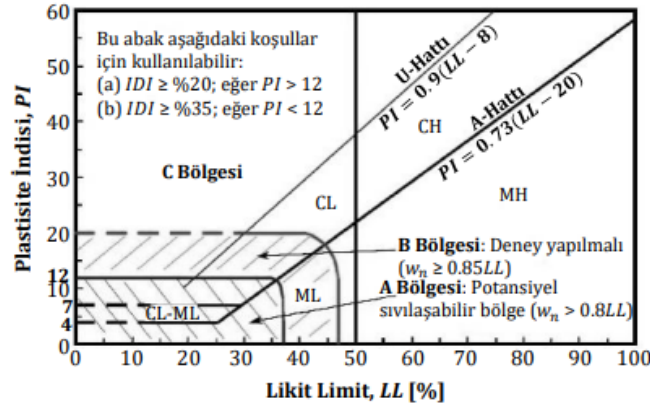
Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından hazırlanan “Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği”, 6 Ekim 2020 tarih ve 31266 (Mükerrer) sayılı Resmî Gazete ile yayınlanmış ve yayım tarihinden 1 yıl sonra yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmeliğin Ek – 2 Geoteknik Konular Raporu Bölüm 3.2 ‘Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi’ kısmında belirtildiği üzere, zemin sıvılaşma değerlendirmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırmaları SPT,  $V_s$  değeri, zeminin dane çapı dağılımı, doğal su içeriği ve Atterberg limitlerinin belirlenmesini içermektedir. Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- Yeraltı su seviyesinin altında yer alan, yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan SPT- $N_{1,60,tk} < 30$  değerlerine sahip kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımlarıdır.
- Yeraltı su seviyesinin altında yer alan, yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan plastik silt ve killi zeminlerdir. Bu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için malzemenin doğal su içeriği ve Atterberg limitlerine bağlı olarak Seed vd. (2003) tarafından tanımlanan Şekil 1’deki kriterler kullanılmaktadır. Bu abakta tanımlanan 3 farklı bölge ve bunların sıvılaşma performansları aşağıda özetlenmektedir:

A Bölgesi: Bu bölgedeki zeminler sıvılaşabilir zemin olarak tanımlanmaktadır.

B Bölgesi: Bu bölgedeki zeminler geçiş bölgesinde olup, tekrarlı üç eksenli deneylerin yapılması sonucunda sıvılaşma potansiyeline karar verilebilir.

C Bölgesi: Bu bölgedeki zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yoktur, ancak yumuşama potansiyeli değerlendirilmelidir.



Şekil 1. İnce daneli zeminlerin sıvılaşma/yumuşama performansı değerlendirilmesi (Seed vd., 2003)

## 3. SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN OLDUĞU BİRİMLER İÇİN TETİKLENME ANALİZİ DEĞERLENDİRMESİ

### 3.1. TBDY – 2018 (Basitleştirilmiş Yöntem)

Sıvılaşma potansiyeli için güvenlik koşulu;  $M_w = 7.5$  için hesaplanan zemin sıvılaşma direnci oranının (CRR), zeminde deprem nedeniyle oluşan ortalama tekrarlı gerilme oranına (CSR) oranıdır.



$$GS = \frac{\tau_R}{\tau_{\text{deprem}}} \geq 1.10 \quad (1)$$

GS: Güvenlik sayısı,

$\tau_R$  : Zemin sıvılaşma direnci [kPa] ve;

$\tau_{\text{deprem}}$  : Zeminde deprem nedeniyle oluşan tekrarlı gerilmedir [kPa].

Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı gerilme Denklem (2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65\sigma_{v0}(0.4S_{DS}) * r_d \quad (2)$$

Burada;

$\sigma_{v0}$  : Toplam düşey gerilme [kPa],

$S_{DS}$  : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [Birimsiz] ve,

$r_d$  : Gerilme azaltma katsayısıdır [birimsiz].

İncelenen derinliğe bağlı olarak hesaplanan gerilme azaltma katsayısı, yönetmeliğin 16B.4.2 kısmında belirtilen Denklem (16B.6) kullanılarak hesaplanmaktadır.

Sıvılaşma direnci  $\tau_R$  moment büyüklüğü  $M_w = 7.5$  olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranının  $CRR_{M7.5}$  tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı ( $C_M$ ) ve efektif düşey gerilme ( $\sigma'_{v0}$ ) ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır.

$$\tau_r = CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{v0} \quad (3)$$

Ham SPT verilerinin yönetmeliğin 16B.2 kısmında belirtilen katsayılara ve ince dane içeriğine göre düzeltilmesiyle elde edilen SPT vuruş sayısı  $N_{1,60f}$  ile elde çevrimsel dayanım oranı ( $CRR_{M7.5}$ ) ve deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı ( $C_M$ ), sırasıyla ilgili yönetmeliğin Denklem (16B.4b) ve Denklem (16B.4c) kullanılarak elde edilmektedir.

### 3.2. Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği (2020) Ek – 2 Geoteknik Konular Raporu

Bölüm 2.2’de belirtilen değerlendirmeler sonucunda sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler için güvenlik koşulu Denklem (4)’te tanımlanmaktadır.

$$GS = \frac{CRR}{CSR^*} = \frac{CRR}{CSR/(MSF * K_\sigma)} \quad (4)$$

CSR: deprem moment büyüklüğü  $M_w = 7.5$  ve efektif gerilme  $\sigma'_{v0} = 1$  atm koşulları için normalize edilmiş tekrarlı gerilme oranı, CRR:  $M_w = 7.5$  ve  $\sigma'_{v0} = 1$  atm koşulları için normalize edilmiş tekrarlı direnç oranı, CSR\*: tekrarlı gerilme oranı, CRR\*: tekrarlı direnç oranı ve, GS: sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı olup 1.00 değeri hedeflenmelidir.

#### Tekrarlı Gerilme Oranı

Sıvılaşma tetiklenme analizleri kapsamında, deprem nedeniyle ortaya çıkan tesirler tekrarlı kayma gerilme oranı ile ifade edilmektedir. Bu değer Denklem (5)’den hesaplanmaktadır.



$$CSR = 0.65CSR_{maks} \quad (5)$$

Maksimum tekrarlı gerilme oranının ( $CSR_{maks}$ ) hesaplanmasında Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen 'Basitleştirilmiş Yöntem' kullanılmaktadır. Bu değer, yönetmelikte yer alan Denklem (3.3) kullanılarak elde edilmektedir. İlgili denklemdeki kayma gerilmesi azaltma katsayısının hesaplanmasında Idriss ve Boulanger ile Çetin vd. arasında yaklaşım farklılığı bulunmakta olup bu katsayı her iki yaklaşım için sırasıyla yönetmelik Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) kullanılarak elde edilmektedir.

#### Tekrarlı Direnç Oranı

Tekrarlı direnç oranı, zeminin sıvılaşmaya karşı direncini temsil etmektedir. Boulanger ve Idriss (2014) veya Çetin vd. (2018) çalışmalarında sunulan yöntemler kullanılmaktadır. Boulanger ve Idriss'e göre sıvılaşma potansiyeli ve performansı, zeminin "kum gibi" ve "kil gibi" davranışına göre değişmekte olup aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- (a) Kum gibi zeminler:  $PI$  değerinin 7 'den küçük olduğu zeminlerdir. Bu tip zeminlerde tekrarlı yükleme kaynaklı sıvılaşma tetiklenmesinin incelenmesi gerekmektedir.
- (b) Kil gibi zeminler:  $PI$  değerinin 7 'den büyük/eşit olduğu zeminlerdir. Bu tip zeminlerde tekrarlı yükleme kaynaklı yumuşama tetiklenmesinin incelenmesi gerekmektedir. Ancak bu değerlendirmenin yapılacağı zeminlerin hassasiyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Boulanger ve Idriss tarafından önerilen sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ( $GS$ ) Denklem (6) ile hesaplanmaktadır.

$$GS = \left\{ \begin{array}{l} \text{kum gibi; } CRR_{kum} / (CSR^* = CSR / (K_\sigma \times MSF)) \\ \text{kil gibi; } CRR_{kil} / (CSR^* = CSR / MSF) \end{array} \right\} \quad (6)$$

Tekrarlı gerilme oranına uygulanacak olan moment büyüklüğü ( $M_w$ ) ölçekleme katsayısı ( $MSF$ ) ve kum gibi zeminlerde yüksek düzey efektif gerilme ölçekleme katsayısı ( $K_\sigma$ ), sırasıyla yönetmeliğin Bölüm 3.3.2.1 kısmında belirtilen Denklem (3.14) ve Denklem (3.15) kullanılarak elde edilmektedir. Kum ve kil gibi zeminler için ayrı ayrı hesaplanan tekrarlı direnç oranı, yönetmeliğin ilgili bölümünde yer alan Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) kullanılarak elde edilmektedir.

Sıvılaşma tetiklenme analizlerinde Çetin vd. (2018) tarafından önerilen normalize edilmiş tekrarlı direnç oranı ( $CRR^*$ ) Denklem (7)'den hesaplanmaktadır.

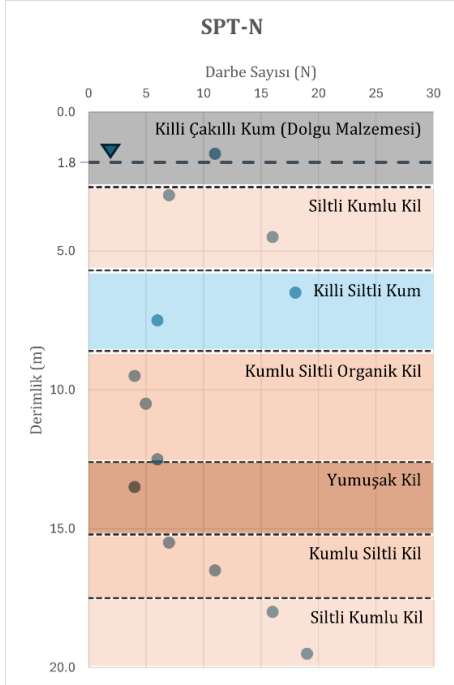
$$CRR^* = CRR(K_\sigma)(MSF) \quad (7)$$

Çetin vd. (2018) tarafından önerilen olasılıksal yaklaşım esaslı  $CRR^*$  değeri, yönetmelik Bölüm 3.3.2.2 kısmında belirtilen Denklem (3.17) kullanılarak elde edilmektedir. İlgili denklemdeki moment büyüklüğü düzeltme katsayısı ( $MSF$ ) ve yüksek örtü yükü ölçekleme katsayısı ( $K_\sigma$ ), Boulanger ve Idriss yaklaşımlarından farklı olarak yönetmeliğin ilgili bölümünde yer alan Denklem (3.19) ve Denklem (3.20) kullanılarak sırasıyla elde edilmektedir.

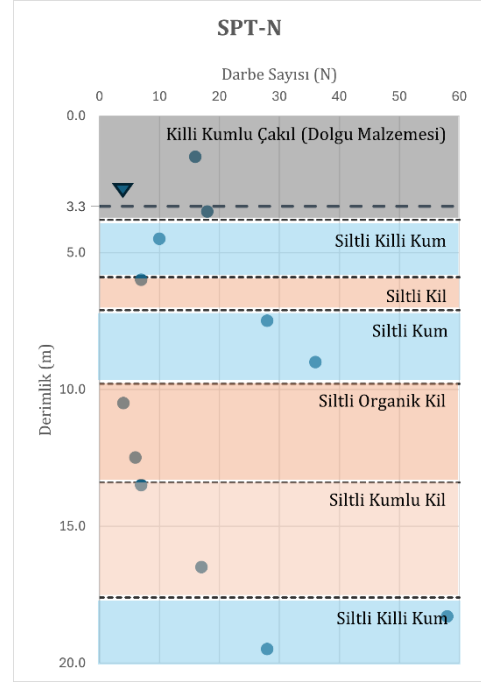


#### 4. ÖRNEK TEMEL SONDAJİ ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRME VE KARŞILAŞTIRMA

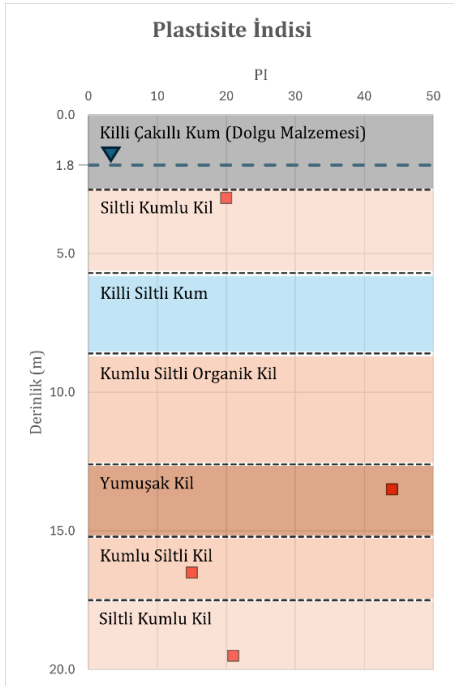
Proje kapsamında yapılan örnek iki temel sondajın yüzeyden 20m derinliğe kadar olan SPT-N, plastisite indisi ve ince dane içeriği dağılımları, aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



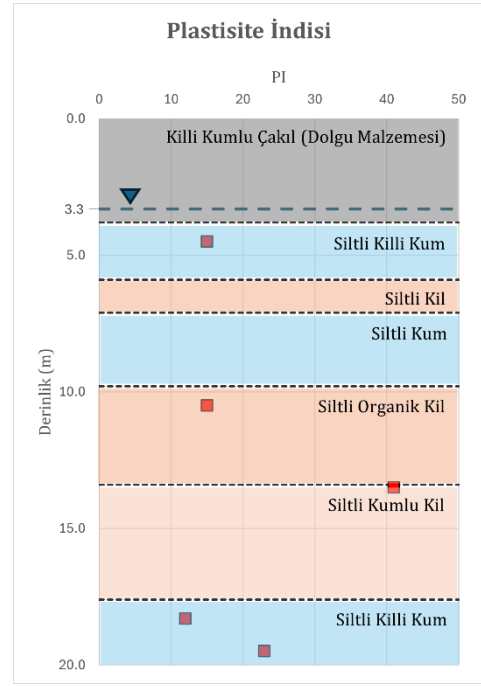
Şekil 2. Derinliğe bağlı SPT-N dağılımı  
(1 numaralı örnek sondaj)



Şekil 3. Derinliğe bağlı SPT-N dağılımı  
(2 numaralı örnek sondaj)

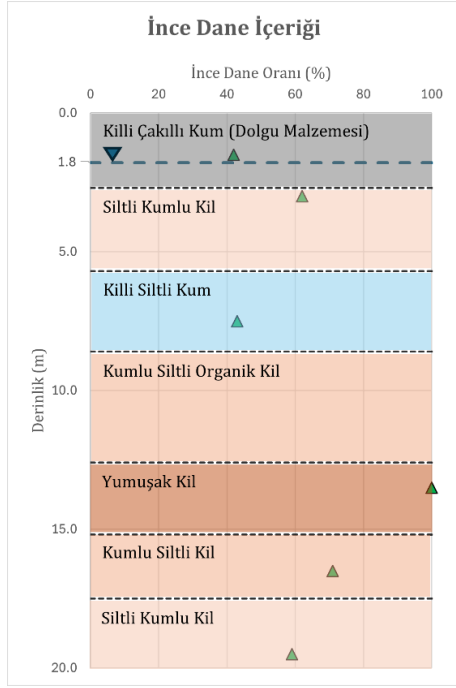


Şekil 4. Derinliğe bağlı PI dağılımı  
(1 numaralı örnek sondaj)

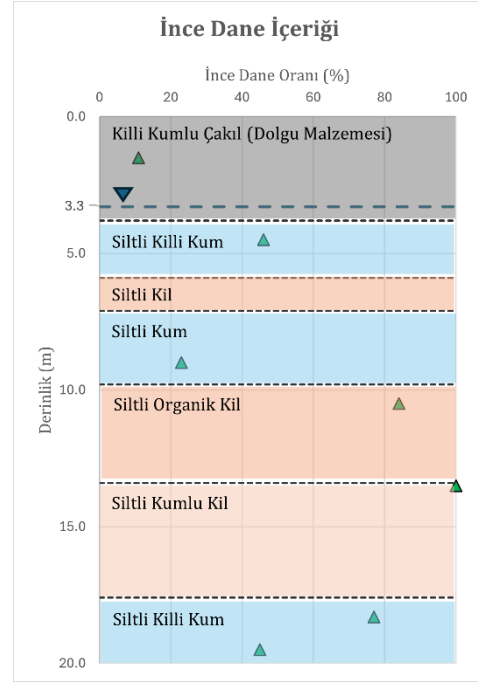


Şekil 5. Derinliğe bağlı PI dağılımı  
(2 numaralı örnek sondaj)





Şekil 6. Derinliğe bağlı İDİ dağılımı  
(1 numaralı örnek sondaj)



Şekil 7. Derinliğe bağlı İDİ dağılımı  
(2 numaralı örnek sondaj)

#### 4.1 Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri

Bölüm 2’de tariflenen esaslar doğrultusunda örnek iki temel araştırma sondajı ve zemin birimleri özelinde gerçekleştirilen sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri, aşağıdaki şekillerde verilmektedir.

| Veri Tipi | Veri Derinliği (m) | USCS | w <sub>a</sub> (%) | LL (%) | PI   | %İDİ   | SPT-N | SPT-N <sub>60</sub> | SPT-N <sub>1,60</sub> | SPT-N <sub>1,60,tk</sub> (Boulanger & Idriss) | SPT-N <sub>1,60,tk</sub> (Çetin vd.) |
|-----------|--------------------|------|--------------------|--------|------|--------|-------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| SPT-01    | 1.50               | SM   | 18.0               | NP     | NP   | 42.00  | 11    | 10                  | 18                    | 22.9                                          | 21.5                                 |
| SPT-02    | 3.00               | CL   | 28.0               | 41.00  | 20.0 | 62.00  | 7     | 7                   | 7                     | 12.9                                          | 10.4                                 |
| SPT-03    | 4.50               | C    | 28.0               | 41.00  | 20.0 | 62.00  | 16    | 19                  | 19                    | 24.5                                          | 23.0                                 |
| SPT-04    | 6.50               | S    |                    |        |      | 43.00  | 18    | 21                  | 24                    | 29.0                                          | 27.6                                 |
| SPT-05    | 7.50               | SM   | 31.0               | NP     | NP   | 43.00  | 6     | 7                   | 7                     | 13.2                                          | 10.7                                 |
| SPT-06    | 9.50               | C    | 58.0               | 74.00  | 44.0 | 100.00 | 4     | 5                   | 5                     | 10.5                                          | 8.0                                  |
| SPT-07    | 10.50              | C    | 58.0               | 74.00  | 44.0 | 100.00 | 5     | 6                   | 6                     | 11.7                                          | 9.3                                  |
| SPT-08    | 12.50              | C    | 58.0               | 74.00  | 44.0 | 100.00 | 6     | 8                   | 8                     | 13.0                                          | 10.5                                 |
| SPT-09    | 13.50              | CL   | 58.0               | 74.00  | 44.0 | 100.00 | 4     | 5                   | 5                     | 10.5                                          | 8.0                                  |
| SPT-10    | 15.50              | C    | 36.0               | 36.00  | 15.0 | 71.00  | 7     | 9                   | 9                     | 14.3                                          | 11.8                                 |
| SPT-11    | 16.50              | CL   | 36.0               | 36.00  | 15.0 | 71.00  | 11    | 14                  | 14                    | 19.3                                          | 17.8                                 |
| SPT-12    | 18.00              | C    | 36.0               | 36.00  | 15.0 | 59.00  | 16    | 20                  | 20                    | 25.5                                          | 24.0                                 |
| SPT-13    | 19.50              | CL   | 25.0               | 41.00  | 21.0 | 59.00  | 19    | 24                  | 24                    | 29.3                                          | 27.8                                 |

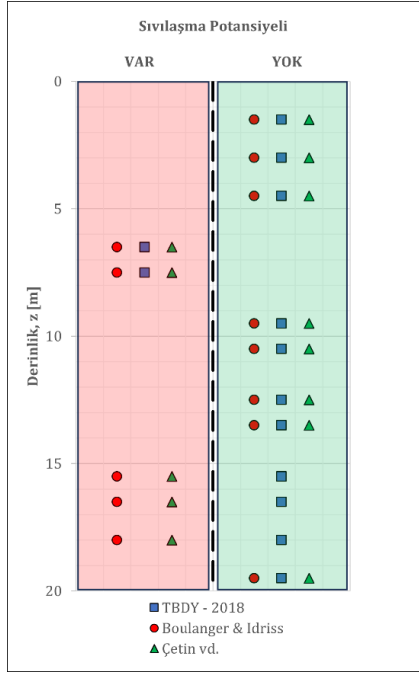
Şekil 8. 1 numaralı örnek temel sondajı yerinde deney sonuçları ve düzeltilmiş SPT vuruş sayıları

| Veri Tipi | Veri Derinliği (m) | USCS  | w <sub>a</sub> (%) | LL (%) | PI   | %İDİ   | SPT-N | SPT-N <sub>60</sub> | SPT-N <sub>1,60</sub> | SPT-N <sub>1,60,tk</sub> (Boulanger & Idriss) | SPT-N <sub>1,60,tk</sub> (Çetin vd.) |
|-----------|--------------------|-------|--------------------|--------|------|--------|-------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| SPT-01    | 1.50               | GP-GM | 8.0                | NP     | NP   | 11.00  | 16    | 15                  | 26                    | 26.1                                          | 26.0                                 |
| SPT-02    | 3.00               | GM    | 28.0               | NP     | NP   | 11.00  | 20    | 21                  | 26                    | 26.8                                          | 26.6                                 |
| SPT-03    | 4.50               | SC    | 25.0               | 35.00  | 15.0 | 46.00  | 10    | 12                  | 12                    | 17.4                                          | 15.9                                 |
| SPT-04    | 6.00               | C     | 25.0               | 35.00  | 15.0 | 46.00  | 7     | 8                   | 8                     | 13.8                                          | 11.3                                 |
| SPT-05    | 7.50               | SC    | 31.0               | NP     | NP   | 23.00  | 28    | 33                  | 32                    | 38.0                                          | 36.4                                 |
| SPT-06    | 9.00               | SM    | 16.0               | NP     | NP   | 23.00  | 36    | 45                  | 41                    | 48.3                                          | 47.1                                 |
| SPT-07    | 10.50              | CL    | 53.0               | 38.00  | 15.0 | 84.00  | 4     | 5                   | 5                     | 10.5                                          | 8.0                                  |
| SPT-08    | 12.50              | C     | 53.0               | 38.00  | 15.0 | 84.00  | 6     | 8                   | 8                     | 13.0                                          | 10.5                                 |
| SPT-09    | 13.50              | CH    | 54.0               | 72.00  | 41.0 | 100.00 | 7     | 9                   | 9                     | 14.2                                          | 11.8                                 |
| SPT-10    | 16.50              | CL    | 43.0               | 33.00  | 12.0 | 77.00  | 17    | 21                  | 21                    | 26.8                                          | 25.3                                 |
| SPT-11    | 18.30              | GM    | 13.0               | NP     | NP   | 16.00  | 58    | 73                  | 50                    | 63.9                                          | 63.4                                 |
| SPT-12    | 19.50              | SC    | 19.0               | 42.00  | 23.0 | 45.00  | 28    | 35                  | 35                    | 40.5                                          | 40.0                                 |

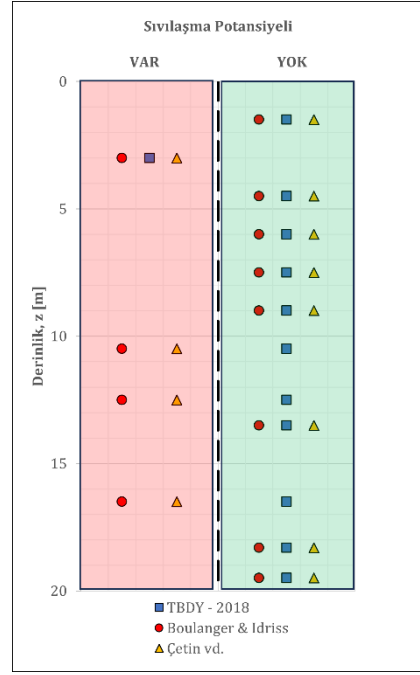
Şekil 9. 2 numaralı örnek temel sondajı yerinde deney sonuçları ve düzeltilmiş SPT vuruş sayıları







Şekil 10. 1 numaralı örnek sondajın üç farklı yaklaşıma göre sıvılaşma potansiyeli sonuçları



Şekil 11. 2 numaralı örnek sondajın üç farklı yaklaşıma göre sıvılaşma potansiyeli sonuçları

#### 4.2 Sıvılaşma Tetiklenmesi Değerlendirmeleri

Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri sonucunda sıvılaşma potansiyeli olan zemin birimleri için sıvılaşma tetiklenme analizleri, Bölüm 3'te detaylandırılan her bir yaklaşım için gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları sırasıyla 1 ve 2 numaralı örnek sondajlar için Şekil 12'de verilmektedir (PGA = 0.449g, Yerel zemin sınıfı = ZE,  $M_W = 7.5$ , DD-2 için  $S_{DS} = 1.123$ ).

| Veri Tipi | Veri Derinliği (m) | USCS | SPT- $N_{1,60f}$ | $\tau_R$ [kPa] | $\tau_{deprem}$ [kPa] | TBDY'ye Göre GS | Boulanger & Idriss (2014) |       |      | Çetin vd. (2018) |       |      |
|-----------|--------------------|------|------------------|----------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|-------|------|------------------|-------|------|
|           |                    |      |                  |                |                       |                 | CRR                       | CSR*  | GS   | CRR              | CSR*  | GS   |
| SPT-01    | 1.50               | SM   | 27               | 9.34           | 8.23                  | 5.00            | 0.248                     | 0.264 | 5.00 | 0.375            | 0.288 | 5.00 |
| SPT-02    | 3.00               | CL   | 13               | 6.53           | 16.26                 | 5.00            | 0.176                     | 0.361 | 5.00 | 0.152            | 0.357 | 5.00 |
| SPT-03    | 4.50               | C    | 28               | 21.40          | 24.10                 | 5.00            | 0.176                     | 0.409 | 5.00 | 0.411            | 0.398 | 5.00 |
| SPT-04    | 6.50               | S    | 34               | 405.83         | 34.27                 | 11.84           | 0.429                     | 0.419 | 1.03 | 0.468            | 0.413 | 1.13 |
| SPT-05    | 7.50               | SM   | 13               | 12.49          | 39.22                 | 0.32            | 0.141                     | 0.440 | 0.32 | 0.106            | 0.409 | 0.26 |
| SPT-06    | 9.50               | C    | 11               | 12.81          | 48.50                 | 5.00            | 0.202                     | 0.454 | 5.00 | 0.125            | 0.390 | 5.00 |
| SPT-07    | 10.50              | C    | 12               | 15.18          | 52.06                 | 5.00            | 0.186                     | 0.454 | 5.00 | 0.137            | 0.377 | 5.00 |
| SPT-08    | 12.50              | C    | 15               | 20.68          | 58.27                 | 5.00            | 0.160                     | 0.450 | 5.00 | 0.148            | 0.352 | 5.00 |
| SPT-09    | 13.50              | CL   | 11               | 17.29          | 60.93                 | 5.00            | 0.150                     | 0.447 | 5.00 | 0.113            | 0.342 | 5.00 |
| SPT-10    | 15.50              | C    | 16               | 26.92          | 65.36                 | 5.00            | 0.132                     | 0.438 | 0.30 | 0.122            | 0.328 | 0.37 |
| SPT-11    | 16.50              | CL   | 22               | 40.48          | 67.14                 | 5.00            | 0.125                     | 0.433 | 0.29 | 0.192            | 0.324 | 0.59 |
| SPT-12    | 18.00              | C    | 29               | 75.08          | 69.24                 | 5.00            | 0.116                     | 0.425 | 0.27 | 0.299            | 0.320 | 0.94 |
| SPT-13    | 19.50              | CL   | 34               | 1032.31        | 70.68                 | 5.00            | 0.108                     | 0.416 | 5.00 | 0.414            | 0.318 | 5.00 |

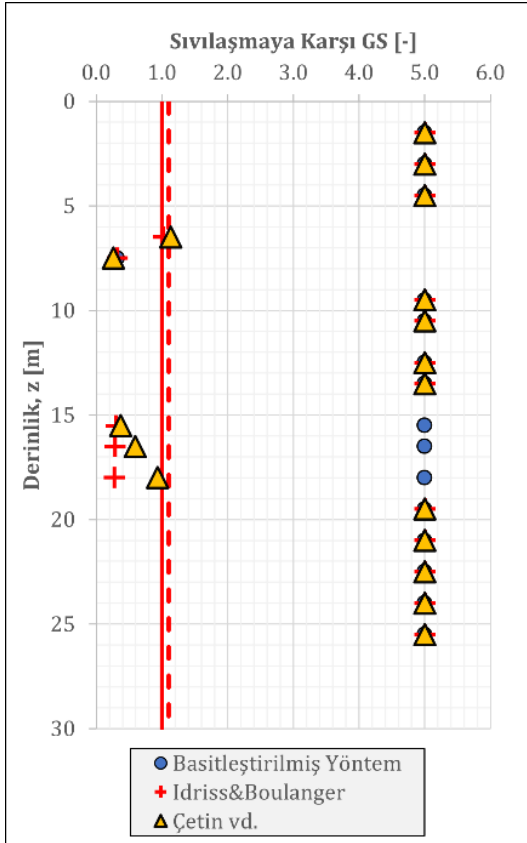
| Veri Tipi | Veri Derinliği (m) | USCS  | SPT- $N_{1,60f}$ | $\tau_R$ [kPa] | $\tau_{deprem}$ [kPa] | TBDY'ye Göre GS | Boulanger & Idriss (2014) |       |      | Çetin vd. (2018) |       |      |
|-----------|--------------------|-------|------------------|----------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|-------|------|------------------|-------|------|
|           |                    |       |                  |                |                       |                 | CRR                       | CSR*  | GS   | CRR              | CSR*  | GS   |
| SPT-01    | 1.50               | GP-GM | 28               | 10.43          | 8.57                  | 5.00            | 0.319                     | 0.275 | 5.00 | 0.503            | 0.303 | 5.00 |
| SPT-02    | 3.00               | GM    | 28               | 23.61          | 19.69                 | 1.20            | 0.339                     | 0.284 | 1.19 | 0.404            | 0.310 | 1.30 |
| SPT-03    | 4.50               | SC    | 19               | 15.34          | 25.11                 | 5.00            | 0.176                     | 0.341 | 5.00 | 0.169            | 0.347 | 5.00 |
| SPT-04    | 6.00               | C     | 15               | 13.65          | 33.09                 | 5.00            | 0.176                     | 0.376 | 5.00 | 0.115            | 0.384 | 5.00 |
| SPT-05    | 7.50               | SC    | 39               | 9.75           | 40.86                 | 5.00            | 2.000                     | 0.400 | 5.00 | 0.799            | 0.406 | 5.00 |
| SPT-06    | 9.00               | SM    | 49               | 33.76          | 48.44                 | 5.00            | 2.000                     | 0.429 | 5.00 | 1.890            | 0.417 | 5.00 |
| SPT-07    | 10.50              | CL    | 11               | 15.72          | 54.23                 | 5.00            | 0.176                     | 0.419 | 0.42 | 0.102            | 0.418 | 0.24 |
| SPT-08    | 12.50              | C     | 15               | 22.97          | 60.71                 | 5.00            | 0.176                     | 0.422 | 0.42 | 0.124            | 0.409 | 0.30 |
| SPT-09    | 13.50              | CH    | 16               | 26.30          | 63.48                 | 5.00            | 0.176                     | 0.421 | 5.00 | 0.158            | 0.402 | 5.00 |
| SPT-10    | 16.50              | CL    | 30               | 88.71          | 69.95                 | 5.00            | 0.176                     | 0.415 | 0.42 | 0.406            | 0.384 | 1.06 |
| SPT-11    | 18.30              | GM    | 55               | 72.06          | 72.49                 | 5.00            | 2.000                     | 0.371 | 5.00 | 6.278            | 0.378 | 5.00 |
| SPT-12    | 19.50              | SC    | 47               | 56.35          | 73.64                 | 5.00            | 0.176                     | 0.403 | 5.00 | 0.970            | 0.376 | 5.00 |

Şekil 12. Sıvılaşma tetiklenme analizi ve birimler özelinde güvenlik sayısı sonuçları

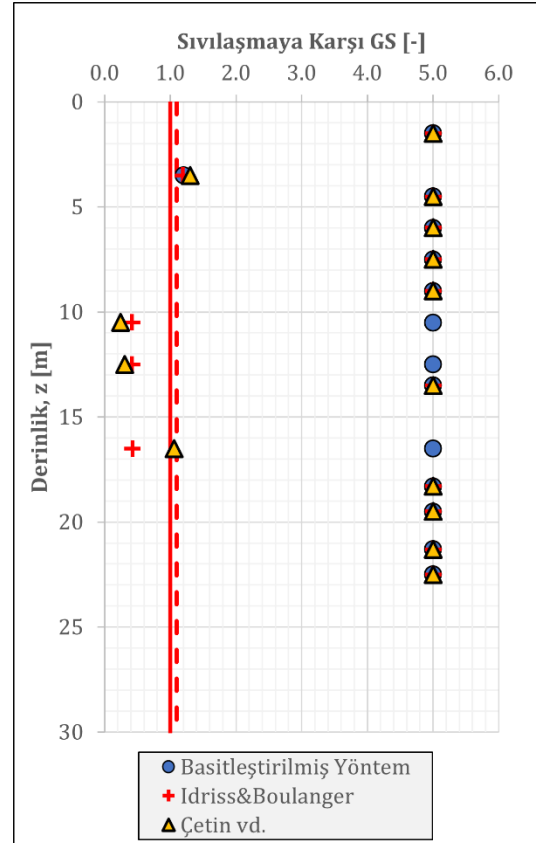




## 5. SONUÇLAR



Şekil 13. 1 numaralı örnek sondajın üç farklı yaklaşıma göre sıvılaşma potansiyeli sonuçları



Şekil 14. 2 numaralı örnek sondajın üç farklı yaklaşıma göre sıvılaşma potansiyeli sonuçları

Bu çalışma kapsamında basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi yöntemi ve Boulanger ve Idriss (2014) ile Çetin vd. (2018) yaklaşımları kullanılarak sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma tetiklenme değerlendirmeleri için uygulanan metodolojiler özetlenmiş olup, örnek iki temel araştırma sondajı üzerinden yapılan sıvılaşma hesapları verilmiştir. Şekil 12’de gösterildiği üzere TBDY’ye göre plastisite indisi 12’den büyük olup sıvılaşma potansiyelinin olmadığı kohezyonlu davranış gösteren lokal birimlerin, Boulanger & Idriss ve Çetin vd. yaklaşımlarına göre hem sıvılaşma potansiyelinin olduğu ve hem de tetiklenme analizleri sonucunda güvenlik sayılarının yönetmelikte belirtilen 1.00 değerinin altında kaldığı görülmektedir.

Söz konusu fark, Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği (2020) içerisinde yer alan sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesinde yeraltı su seviyesinin altında yer alan, yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan plastik silt ve killi zeminlerin de sıvılaşma potansiyeline sahip olabileceği maddesinden kaynaklanmaktadır. İlgili zeminler için Seed vd. (2003) tarafından tanımlanan kriterler kullanılmaktadır. Bu kriterlere bakıldığında örnek verilen sondajlarda sıvılaşma potansiyeli olarak fark gözükten derinliklerdeki zeminin Atterberg limitlerine bakıldığında Seed vd. (2003) tarafından önerilen Şekil 1’deki şemada A veya B bölgelerinde kaldıkları gözlemlenmektedir. Bu durumda ilgili derinliklerinde zeminin sıvılaşma potansiyeli olduğu kabul edilmiş olup tetiklenme analizli gerçekleştirildiğinde sıvılaşmaya karşı GS değerleri 1’den küçük çıkmıştır. Öte yandan, kohezyonsuz davranış gösteren birimlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde 3 yöntem için bir uyumsuzluk görülmemiştir. Genel olarak örnek



sondaj verilerinde kohezyonsuz birimler için sıvılaşma potansiyeli görülmemiştir. Farklı olarak 2 numaralı örnek sondajda 3.5 metre derinlikteki potansiyel değerlendirmesinde her 3 yöntem için sıvılaşma potansiyeli gözlemlenmektedir ve bu nokta için sıvılaşma tetiklenme analizleri sonuçlandırıldığında ortaya çıkan sıvılaşmaya karşı GS değerleri yakın sonuçlar vermektedir.

Bu bağlamda, hem kohezyonlu hem kohezyonsuz birimler için ortaya çıkan sonuçlar göz önüne alındığında sıvılaşma hesaplamaları değerlendirilirken belirtilen farklı yaklaşımların da dikkate alınması, proje tasarım aşamasında daha emniyetli sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir.

## TEŞEKKÜR

Bildiriye olan katkılarından dolayı Yüksel Proje A.Ş.'ye teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Çetin, K. Ö., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., İlgaç, M. ve Chowdhury, K. (2018). "Examination of Differences Between Three SPT-Based Seismic Soil Liquefaction Triggering Relationships", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 113 (2018): 75 – 86
- Boulanger, R.W. ve Idriss, I. M. (2014). "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", Report No. UCD / CGM-14 / 01.Davis, CA: Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California; 2014, 134 syf.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, (2018)
- Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, (2020)

## SEMBOL LİSTESİ

| Sembol        | Açıklama                                                                                                                          | Sembol          | Açıklama                                                                                                                                                |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PI            | Plastisite indisi                                                                                                                 | $\tau_R$        | Sıvılaşma direnci                                                                                                                                       |
| $N_{1,60}$    | Standart penetrasyon darbe sayısı (%60 enerji verimliliğine göre ve örtü yükü düzeltmesi yapılmış)                                | $N_{1,60,f}$    | İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı                                                                                                   |
| $V_s$         | Ölçülmüş kayma dalga hızı                                                                                                         | CRR             | Tekrarlı direnç oranı                                                                                                                                   |
| $N_{1,60,tk}$ | Standart penetrasyon darbe sayısı (%60 enerji verimliliğine göre, örtü yükü ve temiz kum (ince dane içeriği) düzeltmesi yapılmış) | CSR*            | Deprem moment büyüklüğü, efektif gerilme $\sigma'v = 1 \text{ atm.}$ , $M_w = 7.5$ , $\alpha = 0$ için normalize edilmiş eşdeğer tekrarlı gerilme oranı |
| $M_w$         | Deprem moment büyüklüğü                                                                                                           | $K_\sigma$      | Yüksek örtü yükü ölçekleme katsayısı                                                                                                                    |
| GS            | Güvenlik sayısı                                                                                                                   | IDI             | İnce dane içeriği                                                                                                                                       |
| MSF           | Moment büyüklüğü ölçekleme katsayısı                                                                                              | LL              | Likit limit                                                                                                                                             |
| $C_M$         | Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı                                                                                               | $\tau_{deprem}$ | Deprem nedeniyle oluşan tekrarlı gerilme                                                                                                                |

