

## 16.6 – DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ ZEMİNLERDE SIVILAŞMA RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

**16.6.1 – Bölüm 3’e göre Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için Tablo 16.1’de ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercekler halinde bulunan ve 16.6.6’da tanımlanan durumlar dışındaki kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığının, arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve analiz sonuçlarının ayrıntılı olarak rapor edilmesi zorunludur.**

**16.6.2 – 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 tanımlanacaktır.**

**16.6.3 – Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyi (CPT)’nin yapımına ek olarak, ilgili zemin tabakalarındaki dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir.**

**16.6.4 – Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.**

**16.6.5 – 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 yapılacaktır.**

**16.6.6 – Deprem Tasarım Sınıfı’nın DTS = 4 olduğu ve aynı zamanda aşağıdakilerden en az birinin sağlandığı durumlarda sıvılaşma tetiklenme analizi yapılmayabilir:**

**(a) Kil içeriğinin %20’den fazla ve plastisite indisinin %10’dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde;**

**(b) ince dane yüzdesinin % 35’den fazla ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının,  $N_{1,60}$ , 20 vuruş / 30 cm’den yüksek olduğu kumlu zeminlerde;**

**16.6.7 – Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.**

**16.6.8 – Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin SPT deney sonuçları kullanılarak yapılmasına dayanan yöntem EK 16B’de verilmiştir. Değerlendirmenin CPT veya kayma dalgası hızına göre yapılması durumunda uygulamada genel kabul gören yöntemler kullanılabilir.**

**16.6.9 – Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu Denk.(16.3)’te tanımlanmıştır.**

$$\frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10 \quad (16.3)$$

Burada  $\tau_R$  ve  $\tau_{deprem}$ , sırası ile, sıvılaşma direncini ve zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir. Denk.(16.3)’te verilen koşulun sağlanamaması durumunda, sıvılaşması beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yanal yayılma türündeki zemin hareketleri değerlendirilecektir.

**16.6.10** – Belirlenen sıvılaşma sonrası yer değiştirmelerin üstyapı/altyapı davranışına etkileri değerlendirilerek ihtiyaç duyulması halinde üstyapı ve/veya zemin iyileştirmeleri uygulanacaktır.

## **EK 16B – BASITLEŐTİRİLMİŐ ZEMİN SIVILAŞMA DEęERLENDİRMEŐİ**

### **16B.1. KAPSAM**

Zemin sıvılaşması tetiklenme analizleri kapsamında, saha zeminlerinin sıvılaşmaya karşı kayma direnci,  $\tau$  ; eğimsiz sahalar için geliştirilmiş, arazi penetrasyon deneyleri veya kayma dalga hızı değerlerine bağlı ampirik zemin sıvılaşması direnci bağıntısı ve eğrileri (gerekli düzeltmeler uygulanarak) kullanılarak bulunacaktır. SPT deney sonuçlarından yararlanılarak sıvılaşma direncinin hesaplanması için önerilen yöntem **16B.3'**de verilmiştir. Deprem sarsıntısı sırasında gelişen kayma gerilmeleri,  $\tau_{\text{deprem}}$  , basitleştirilmiş yöntem kullanılarak hesaplanacaktır.

### **16B.2. SPT VERİLERİNİN DÜZELTİLMESİ**

#### **16B.2.1. Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi**

**16B.2.1.1** – Araziden elde edilmiş ham SPT verileri,  $N$  , **Denk.(16B.1)** kullanılarak  $N_{1,60}$  değerine düzeltilecektir.

$$N_{1,60} = N \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (16B.1)$$

Burada  $C_N$  kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısını,  $C_R$  tij boyu düzeltme katsayısını,  $C_S$  numune alıcı tipi düzeltme katsayısını,  $C_B$  sondaj delgi çapı düzeltme katsayısını,  $C_E$  enerji oranı düzeltme katsayısını göstermektedir.

**16B.2.1.2** – Derinlik düzeltme katsayısı  $C_N$  **Denk.(16B.2)**'de verilen bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$C_N = 9.78 \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.70 \quad (16B.2)$$

**Denk.(16B.2)**'de verilen bağıntıda deney derinliğindeki efektif dūřey gerilme  $\sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapıldığı durumdaki arazi koşullarına göre hesaplanmaktadır. Deney sonrasında yapılan ek dolgu, temel gerilmesi veya zemin kazısı ve benzeri nedenler ile oluşan efektif gerilme değişiklikleri dikkate alınmayacaktır.

**16B.2.1.3** – **Denk.(16B.1)**'de yer alan diğer düzeltme katsayıları **Tablo 16B.1'**de verilmiştir.

#### **16B.2.2. SPT Verilerinin İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmesi**

İnce dane içeriğine (IDI) göre düzeltilmiş darbe sayıları  $N_{1,60f}$  **Denk.(16B.3a)** ile hesaplanacaktır:

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta \cdot N_{1,60} \quad (16B.3a)$$

**Denk.(16B.3a)**'daki  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları **Denk.(16B.3b)**'de verilmiştir:

$$\begin{aligned} \text{IDI} \leq \%5 ; & \quad \alpha = 0 , \quad \beta = 1 \\ \%5 \leq \text{IDI} \leq \%35 ; & \quad \alpha = \exp[1.76 - (190/\text{IDI}^2)] , \quad \beta = 0.99 + \text{IDI}^{1.5} / 1000 \\ \text{IDI} \geq \%35 ; & \quad \alpha = 5 , \quad \beta = 1.2 \end{aligned} \quad (16B.3b)$$

Tablo 16B.1. SPT Düzeltme Katsayıları

Düzeltme Katsayısı	Değişken	Değer
$C_R$	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
$C_S$	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
$C_H$	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
$C_E$	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

### 16B.3. SIVILAŞMA DİRENCİNİN HESAPLANMASI

**16B.3.1** – Sivilaşma direnci  $\tau_R$ , moment büyüklüğü 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 çarpılması ile hesaplanacaktır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{v0} \quad (16B.4a)$$

**16B.3.2** – Çevrimsel dayanım oranı **Denk.(16B.4b)**'de verilen bağıntı ile hesaplanacaktır:

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10 * N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (16B.4b)$$

Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı ( $C_M$ ), tasarım depremi büyüklüğüne ( $M_w$ ) bağlı olarak **Denk.(16B.4c)**'deki bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (16B.4c)$$

### 16B.4. DEPREMDE OLUŞAN KAYMA GERİLMESİNİN HESAPLANMASI

**16B.4.1** – Zeminde oluşan kayma gerilmesi **Denk.(16B.5)**'deki ilişki ile hesaplanacaktır.

$$\tau_{deprem} = 0.65 * \sigma_{v0} * 0.4 * S_{DS} * r_d \quad (16B.5)$$

Burada  $\sigma_{v0}$  sivilaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi,  $r_d$  ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını,  $S_{DS}$  ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını göstermektedir.

**16B.4.2** – Gerilme azaltma katsayısı,  $r_d$  incelenen derinliğe ( $z$ ) bağlı olarak **Denk.(16B.6)**'daki bağıntı ile elde edilecektir.

$$\begin{aligned} r_d &= 1 - 0.00765 * z & z \leq 9.15m \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 * z & 9.15m < z \leq 23m \\ r_d &= 0.744 - 0.008 * z & 23m < z \leq 30m \\ r_d &= 0.5 & z > 30m \end{aligned} \quad (16B.6)$$

## ÖRNEK

SPT değerleri ile sıvılaşma analizi yaparken sırasıyla aşağıdaki adımları uygulamak gerekir;

1. Zemin parametrelerinin belirlenmesi,
2. SPT değerlerinin düzeltilmesi,
3. Sıvılaşma direncinin( $\tau_R$ ) hesaplanması
4. Zeminde oluşan kayma gerilmesinin( $\tau_{deprem}$ ) hesaplanması
5. Güvenlik katsayısının hesaplanması

### 1 - Zemin Parametreleri ve SPT Değerleri

Zemin Sınıfı	Kalınlık(m)	İnce Dane İçeriği(%)	P.I.	N <sub>60</sub>	$\gamma_k(\text{kN/m}^3)$	$\gamma_s(\text{kN/m}^3)$
Kum	3	10	5	15	17	19
Kil	2	60	40	19	18	20
Siltli Kum	5	20	8	25	20	23

- **Tij Boyu** = 5m
- **Numunu Alıcı Tipi** = Standart Numune Alıcı(iç tüpü olan)
- **Sondaj Delgi Çapı** = 150 mm
- **Tokmak Tipi** = Halkalı Tokmak
- **Tasarım Deprem Büyüklüğü ( $M_w$ )** = 6
- **Su Seviyesi** = 1m
- **SDS** = 0.6

**NOT** : 2. Katmanın kilden oluşması ve plastisite indisinin 10'dan yüksek olması sebebiyle bu katman için sıvılaşma analizi yapılmasına gerek yok.

### 2 - SPT Değerlerinin Düzeltilmesi

$$N_{1,60} = N * C_N * C_R * C_S * C_B * C_E$$

Tablo 16B.1 den elde ettiğimiz değerler şu şekilde.

- $C_R = 0.85$
- $C_S = 1$
- $C_B = 1.05$
- $C_E = 0.7$

**NOT** :  $C_E$  değerini 0.45 ile 1 arasında seçme imkanımız olduğu için ortalama bir değer olarak 0.7 aldık.

$$C_N = 9.78 * \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.70$$

$\sigma'_{v0}$  deney derinliğindeki efektif düşey gerilmedir. Örneğimizde işlemleri kısa tutmak adına her katman için ortalama SPT değerleri verildiği için, efektif düşey gerilmeyi katmanların ortasına göre hesaplayacağız.

**NOT** : Bu işlemin sonucunun 1.7 den büyük çıkması durumunda  $C_N = 1.7$  kabul edilmesi gerekir

Efektif düşey gerilme hesabının nasıl yapıldığının bilindiğini varsayarak bu işlemleri atlıyoruz.

Katman	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$C_N$	$N_{60}$	$C_R$	$C_S$	$C_B$	$C_E$	$N_{1,60}$
Kum	21.6	1.70	15	0.85	1	1.05	0.7	16
Kil	45.57	1.44	19	0.85	1	1.05	0.7	17
Siltli Kum	88.74	1.03	25	0.85	1	1.05	0.7	16

Son olarak İnce Dane İçeriğine(IDI) göre düzeltme yaparak SPT değerlerini düzeltme aşamasını tamamlıyoruz.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta * N_{1,60}$$

$$IDI \leq \%5 ; \quad \alpha = 0 , \beta = 1$$

$$\%5 \leq IDI \leq \%35 ; \quad \alpha = \exp[1.76 - (190/IDI^2)] , \beta = 0.99 + IDI^{1.5} / 1000$$

$$IDI \geq \%35 ; \quad \alpha = 5 , \beta = 1.2$$

$$\mathbf{1. Katman için ; IDI = \%10 , N_{1,60} = 16 ; \quad \alpha = \exp[1.76 - (190/10^2)] , \beta = 0.99 + 10^{1.5} / 1000}$$

$$\alpha = 0.87 , \beta = 1.02 \quad N_{1,60f} = 0.87 + 1.02 * 16 = 17$$

$$\mathbf{3. Katman için ; IDI = \%20 , N_{1,60} = 15 ; \quad \alpha = \exp[1.76 - (190/20^2)] , \beta = 0.99 + 20^{1.5} / 1000}$$

$$\alpha = 3.61 , \beta = 1.08 \quad N_{1,60f} = 3.61 + 1.08 * 16 = 21$$

### 3- Sıvılaşma Direncinin( $\tau_R$ ) Hesaplanması

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10 * N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_W^{2.56}}$$

$$\tau_R = CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{v0}$$

Katman	$N_{1,60f}$	$CRR_{M7.5}$	$C_M$	$\sigma'_{v0}$	$\tau_R$ (kPa)
Kum	17	0.18	1.77	21.6	6.88
Siltli Kum	21	0.23	1.77	88.74	36.12

### 4- Zeminde Oluşan Kayma Gerilmesinin( $\tau_{deprem}$ ) Hesaplanması

$$\tau_{deprem} = 0.65 * \sigma'_{v0} * 0.4 * S_{DS} * r_d$$

Bu denklemden dikkat edilmesi gereken en önemli nokta efektif gerilme yerine toplam düşey gerilmenin kullanılıyor olması.

Gerilme azaltma katsayısı olan  $r_d$  hesap yapılan derinliğe(z) bağlı olarak aşağıdaki denklemler ile elde edilir.

$$\begin{aligned} r_d &= 1 - 0.00765 * z & z \leq 9.15\text{m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 * z & 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008 * z & 23\text{m} < z \leq 30\text{m} \\ r_d &= 0.5 & z > 30\text{m} \end{aligned}$$

Katman	Z(m)	$r_d$	$\sigma_{v0}$ (kPa)	$\tau_{deprem}$ (kPa)
Kum	1.5	0.988	26.5	4.08
Siltli Kum	7.5	0.942	152.5	22.41

### 5- Güvenlik Katsayısı Hesabı

TBDY 2018'e göre güvenlik katsayısı minimum 1.1 olmalıdır. Güvenlik katsayısını bu formülle elde ediyoruz;

$$G.K. = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}}$$

Katman	$\tau_R$ (kPa)	$\tau_{deprem}$ (kPa)	G.K	Sonuç
1.Katman(Kum)	6.88	4.08	1.71	Güvenli
3.Katman(Kum)	36.12	22.41	1.61	Güvenli