

**TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ-2018 İLE UYUMLU
BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ
ANALİZİ VE SIVILAŞMA SONRASI OTURMA, YANAL
DEFORMASYON, KAYMA DAYANIMI KAYBI ve KAPAK
TABAKASI ETKİSİ HESAP CETVELİ
KULLANIM KILAVUZU**

EKİM 2019

ÖNEMLİ NOT:

Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi ve Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Deformasyon, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesap Cetveline ait telif hakları, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu gereğince TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odasına ait olup, izin almaksızın içeriğinde herhangi bir değişiklik yapılamaz. Hesap cetveli JMO logolu olarak kullanılmak kaydıyla ücretsiz herkesin kullanımına açıktır. Ancak Oda logosunun hesap cetvelinden çıkarılarak kullanılmasının tespit edilmesi durumunda 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanun gereğince ilgili kişi hakkında gerekli hukuki yollara başvurulur.


İçindekiler

Bölüm – 1

- Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi Hesabı 1

Bölüm – 2

- Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Deformasyon, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesabı 17



BÖLÜM-1
BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN
SIVILAŞMA POTANSİYELİ ANALİZİ
HESABI

BÖLÜM-1

TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY-2018) İLE UYUMLU BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ ANALİZİ (v.1)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ekinde yer alan Madde 16.6. “Deprem Etkisi Altında Zeminin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi” başlığı altında sıvılaşma riski ile ilgili hususlar belirtilmiş olup, Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için **Yönetmelik eki 16.1’de** ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercekler halinde bulunan ve yine **Yönetmelik eki Tablo 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 edilmesinin zorunlu olduğu belirtilmiştir.

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 tanımlanmıştır (**TBDY-2018 Madde 16.6.2**).

TBDY-2018 Madde 16.6.4’e göre potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan **kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum** karışımları olarak tanımlanmıştır.

Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak bu hesaplamada SPT verileri kullanılmaktadır. **TBDY Madde 16.6.5’e** göre; temel altı zeminlerin 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.

Sıvılaşma değerlendirmesi yapılırken aşağıdaki durumlar göz önüne alınacaktır.

Deprem tasarım sınıfının DTS=4 olduğu ve aynı zamanda aşağıdakilerden en az birinin sağlandığı durumlarda sıvılaşma tetiklenme analizi yapılmayabilir (**TBDY Madde 16.6.6**).

- Kil içeriğinin %20’den fazla ve plastisite indisinin %10’dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde;
- İnce dane yüzdesinin %35’den fazla ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, $N_{1,60}$, 20 vuruş / 30 cm’den yüksek olduğu kumlu zeminlerde;

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak **“Sıvılaşma Potansiyeli Analizi, Yanal Yayıma, Oturma Analizi ve Sıvılaşma Sonrası Kayma Dayanımı Kaybı”** için Microsoft Excel programı kullanılarak zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirmesi hesap cetveli hazırlanmıştır.

İlk bölüm zemin sıvılaşma (veya yumuşama) değerlendirmesine yönelik olarak yapılan SPT zemin araştırmaları, zeminin dane çapı dağılımı, doğal su içeriği ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içeren **sıvılaşma potansiyeli analizinden** oluşmaktadır.

EXCEL ZEMİN SIVILAŞMASI DEĞERLENDİRMESİ HESAP CETVELİNDE KULLANILAN PARAMETRELER

Aşağıda Excel hesap cetvelinde kullanılan veriler tek tek açıklanmaktadır.

1- Veri Girişi

PROGRAM VERİ GİRİŞİNDE ONDALIK SAYILARI YAZARKEN NOKTA VEYA VİRGÜL HASSASİYETİNE DİKKAT EDİLMELİDİR.

- Antet bölümü;

Proje Adı: Sıvılaşma analizinin uygulandığı “*Projenin adı*” yazılacaktır.

Ada No: Sıvılaşma analizinin uygulandığı yerin “*Ada no*” su yazılacaktır.

Parsel No: Sıvılaşma analizinin uygulandığı yerin “*Parsel no*” su yazılacaktır.

Koordinatlar: Ada ve parsel numarası belirlenmiş yerin koordinatlarıdır. Derece cinsinden “x” ve “y” sütunlarına yazılacaktır.

Datum: “x” ve “y” olarak verilen koordinatların, hangi koordinat referans sistemine ait olduğunu gösterir. Açılır pencereden uygun koordinat sistemi seçilecektir.

Kot: Sıvılaşma analizi yapılan parselde metre cinsinden ortalama yükseklik yazılacaktır.

Sondaj Kuyu No: Sıvılaşma analizinin yapıldığı alanda açılan sondaj kuyusunun numarası yazılacaktır.

Yeraltı Su Seviyesi: Sıvılaşma analizi yapılan alanda ölçülen yeraltı su seviyesi ve birimi “m” yazılacaktır.

Zemin Sınıfı: Sıvılaşma analizi yapılan zeminin TBDY Tablo 16.1’de yer alan “**zemin sınıfı**” “açılır pencereden*” seçilecektir. Yerel zemin sınıflarının seçimine özel önem verilecek, özellikle arazide açılan sondajlar sırasındaki karşılaşılan zemin birimlerinin tabaka kalınlığı, litolojisi, stratigrafik kesiti, yerinde yapılan deneyler ile yeraltı suyu seviyesinin tespitine özel önem verilecektir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar “Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatına” uygun olarak yapılan zemin ve temel etüt raporu dikkate alınarak belirlenecektir. Yerel zemin sınıflarının belirlenmesinde TBDY-2018’de aşağıda verilen Tablo 16.1 kullanılacaktır.

***Açılır Pencere:** Fare ile veri girişi yapılan kutucuğu seçtiğinizde kutucuğun sağ alt köşesinde beliren aşağı yönlü küçük ok tuşuna (▼) tıkladığınızda açılan menüden seçim yapmanızı sağlar.

Not: Bu metinde TBDY, 2018’de kullanılan terimlerin kullanılması prensip olarak benimsenmiştir. Bu durum Yer Bilimlerinde çalışan kişilerin kullandığı aynı anlama gelen farklı terimlerin kullanılmasının kabul edilmediği anlamı taşımamaktadır.

Tablo 16.1 – Yerel Zemin Sınıfları

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

TBDY-2018 Madde 16.4.2 – Tablo 16.1’de verilen zemin parametreleri, zemin profilinin temel veya kazık başlığı alt kotundan itibaren aşağıya doğru en üst 30 m kalınlığındaki kısmı için belirlenecektir.

Birbirinden belirgin şekilde farklı zemin ve kaya tabakalarını içeren zemin profillerinde üst 30 metredeki tabakalar, yeteri kadar alt tabakaya ayrılarak en üstte $i = 1$ ve en altta $i = N$ olacak şekilde sıralanacaktır. Üst 30 metredeki *ortalama kayma dalgası hızı* $(V_s)_{30}$, *ortalama standart penetrasyon darbe sayısı* $(N_{60})_{30}$ ve *ortalama drenajsız kayma dayanımı* $(c_u)_{30}$ **Denk.(16.2)** ile hesaplanacaktır:

$$(V_s)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{s,i}} \right)} \quad ; \quad (N_{60})_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{N_{60,i}} \right)} \quad ; \quad (c_u)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{c_{u,i}} \right)} \quad (16.2)$$

NOT: Yeni hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası’nda bütün zemin koşullarının tanımlanması mümkün olmadığından bu haritalar, ülke genelinde standart tek bir zemin [mühendislik kayası] koşulu $(V_s)_{30} = 760$ m/s esas alınarak hazırlanmıştır (hipotetik olarak). Bu da yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi ZB-ZC zemin grubuna tekabül etmektedir.

Deprem Hesabı Verileri:

M_w : Tasarım depreminin moment büyüklüğüdür. Moment büyüklüğü saha etki alanı içinde bulunan ve depreme kaynaklık edecek bölgesel jeoloji, tektonik yapı, depreme kaynaklık eden süreksizlik sistemleri, fay segmentinin büyüklüğü ve uzunluğu, bu fay veya fay segmentlerin üretecekleri deprem büyüklükleri, tekrarlama periyodları gibi jeolojik özellikleri

ile deprem katalogları dikkate alınarak belirlenir. Ayrıca, Plana Esas Jeolojik, Jeoteknik ve Mikro Bölgeleme Raporları'nda belirtilen ve sahaya etki eden en büyük deprem moment büyüklüğü (M_w) değeri de alınabilir.

Ayrıca farklı araştırmacılar tarafından; inceleme alanını etkileyecek en büyük yer ivmesini elde edebilmek için olası deprem senaryoları öngörülmüştür. Bu amaç için önce MTA'nın en son 2012'de güncellediği Türkiye diri fay haritasından yararlanılarak söz konusu alana uzaklığı en fazla 100 km olan faylar seçilir ve daha sonra Wells ve Coppersmith (1994) tarafından önerilen aşağıda verilen eşitlik yardımıyla söz konusu fayların üretebileceği olası depremlerin Moment büyüklüğü (M_w) değerleri hesaplanabilir.

$$M_w = a + b \log (SRL)$$

Yukarıdaki eşitlikte,

SRL : Beklenen yüzey kırığının (ya da tasarım depremini üretmesi beklenen fay segmentinin) uzunluğu (km) olup,

a ve b katsayıları : Fayın türüne bağlıdır ve aşağıda verilen Çizelge.1'den alınmıştır.

Büyük fay zonlarının, deprem sırasında genel olarak tüm uzunlukları boyunca yırtılmadığı, fakat fay uzunluğunun bir kısmının veya yüzdesinin yırtılacağı (örneğin, Kuzey Anadolu Fay Sistemi) gözlenmiştir. Bir fay veya fay bölgesi tanımlandıktan sonra, potansiyel deprem kırılma uzunluğunu tahmin etmek için bazı özel durum ve teknikler kullanılabilir. Yarım uzunluk, kesirli fay uzunluğu ve segmentasyon teknikleri gibi çeşitli teknikler geliştirilmiştir (Slemmons, 1982).

Çizelge.1 Fay segmenti yaklaşımı ile senaryo deprem büyüklüğünü veren eşitlikteki a ve b katsayıları (Wells ve Coppersmith, 1994)

Fay Türü	a katsayısı	b katsayısı
Doğrultu atımlı fay	5.16	1.12
Normal fay	4.86	1.32
Ters fay	5.00	1.22
Tüm fay türleri	5.08	1.16

DTS: Deprem tasarım sınıfıdır. TBDY-2018 Tablo 3.2’den bina kullanım sınıfı ve S_{DS} değerine göre seçilmelidir.

Tablo 3.1 – Bina Kullanım Sınıfları ve Bina Önem Katsayıları

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kıışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	Diğer binalar BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

Yukarıdaki Tablo 3.1’de bina kullanım amacına göre bina önem katsayısı (I) 1.5 olan yapılar için Bina Kullanım Sınıfı BKS=1 denmiştir. Benzer biçimde bina önem katsayısı (I) 1.2 olan yapılar için Bina Kullanım Sınıfı BKS=2, bina önem katsayısı (I) 1 olan yapılar için Bina Kullanım Sınıfı BKS=3 olarak tanımlanmıştır.

Deprem Tasarım Sınıflarının seçimi sivilaşma analizi sonuçlarını etkilememektedir. Ancak Yönetmelikte (Madde 16.6.6)’da belirtilen Deprem Tasarım Sınıfı’nın DTS=4 olduğu ve aynı zamanda; 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; bu durumlardan en az birinin sağlandığı şartlarda sivilaşma tetiklenme analizi yapılmayabilir değerlendirmesi bulunmaktadır. Program bu durumda sivilaşma analizi yapmamaktadır.

Tablo 3.2 – Deprem Tasarım Sınıfları (DTS)

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \leq S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

DTS=1, 1a, 2, 2a ivmenin yüksek olduğu yerler için tanımlanmıştır. “a” harfi BKS=1 sınıfını yani önemli yapı olduğunu ifade eder.

Yukarıdaki tablo sadece DD-2 Deprem yer hareketi düzeyi için kullanılacaktır.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2): DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelendirmektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ	50 YILDA AŞILMA OLASILIĞI	TEKRARLANMA PERİYODU	SIKLIK
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)	%2	2475 yıl	Çok Seyrek
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)	%10	475 yıl	Seyrek
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)	%50	72 yıl	Sık
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4)	%68	43 yıl	Servis Deprem Yer Hareketi

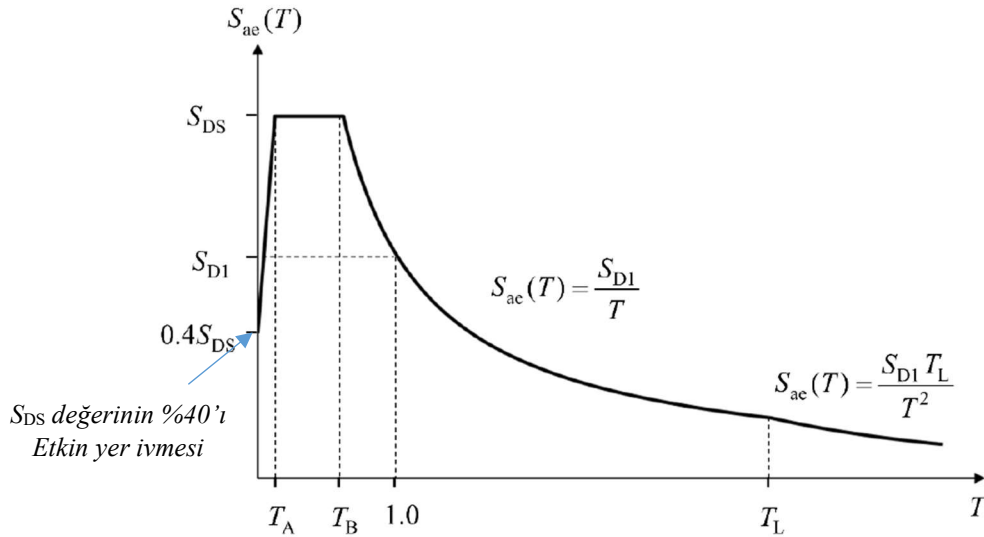
S_{DS} : Kısa periyot (0.2s) tasarım spektral ivme katsayısıdır (boyutsuz). S_{DS} 'nin S 'si Spektral ivme, alt indis "d"si Design/*tasarım*, alt indis küçük "s" Short/*kısa* anlamına gelmektedir.

$$S_{DS} = S_s \cdot F_s$$

S_s : Kısa periyot spektral ivme değeri;

F_s : Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı

S_{DS} , Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan deprem yer hareketi düzeyi, yerel zemin sınıfı, enlem ve boylama göre hesaplanır ve AFAD Başkanlığının (www.tdth.afad.gov.tr) web sayfasından alınır. ZF sınıfı zeminlerde S_{DS} "sahaya özel zemin davranış analizi" yapıldıktan sonra belirlenmelidir.



NOT: Sifir periyodu tamamen rijit bir yapıya karşılık gelir. Bu nedenle $T=0$ olduğu zaman spektral ivme pik yer ivmesine eşittir yani $a_{max} = 0.4 S_{DS}$ 'dir.

Türkiye Deprem Tehlikeleri Haritasında farklı tekrarlanma periyotları (43, 72, 475, 2475 yıl) için en büyük yer ivmesi (PGA), en büyük yer hızı (PGV), 0.2s ve 1.0s periyotlarında spektral ivmeler (S_5 ve S_1) ile toplamda 16 tane harita üretilmiştir. Binalar için standart tasarım deprem yer hareketi olan 475 yıllık harita tercih edilir.

SPT Verileri:

Numune Alıcı Tipi: Standart Penetrasyon Deneyinde kullanılan numune alıcı tipidir. Açılır pencereden seçilecektir.

Sondaj Delgi Çapı: Standart Penetrasyon Deneyinde kullanılan sondaj delgi çapıdır. Açılır pencereden seçilecektir. Birimi “mm” dir.

Tokmak Tipi: Standart Penetrasyon Deneyinde kullanılan tokmak tipidir. Açılır pencereden seçilecektir. Ancak; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2019 yılında yayınlanan “Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatı” na göre “otomatik darbeli” tokmak tipi zorunlu hale gelmiştir.

Enerji Oranı: Standart Penetrasyon Deneyinde kullanılan makine ve tokmak tipine göre belirlenen enerji oranıdır. TBDY-2018’de enerji oranı tokmak tiplerine bağlı olarak belirli aralıklarda belirlenmiş olup, kullanılan makine ve tokmak tipine göre değişiklik göstermektedir. SPT sisteminin kullanım kılavuzunda belirtilen veya belli aralıklarla yapılan/yaptırılan enerji ölçümü sonucunda belirlenen **enerji oranı**; ilgili kutucuğa veri girişi olarak yazılacaktır.

NOT: Sıvılaşmaya karşı duyarlı olabilecek veya farklı istiflenmeye sahip zeminlerde yapılacak çalışmalarda, sıvılaşmaya yatkın seviyelerin kaçırılmaması için SPT deney aralıklarının 1.5 m’den daha sık olmasına ve alınan tüm SPT örneklerinde sıvılaşma potansiyeli analizi için gerekli zemin parametrelerinin tayin edilmesine özen gösterilmesi önerilir.

- Tablo Bölümü;

TURUNCU RENKLİ BÖLÜMLERE, KULLANICI TARAFINDAN VERİ GİRİŞİ YAPILMASI GEREKMEKTEDİR.

1 No.lu Sütun - Sıra No: Sıvılaşma analizinde kontrolün kolay yapılabilmesi için verilen satır numarası yazılacaktır.

2 No.lu Sütun - Derinlik: Standart Penetrasyon Deneyinin yapıldığı başlangıç derinliği yazılacaktır. Sıvılaşmanın bittiği zemin tabakası başlangıç derinliği (sıvılaşma hesabı için SPT verisini içeren en son derinlik) ise tabloda belirtilen yere (derinlik sütununun sonuna) mutlaka yazılacaktır. Birimi metre’dir.

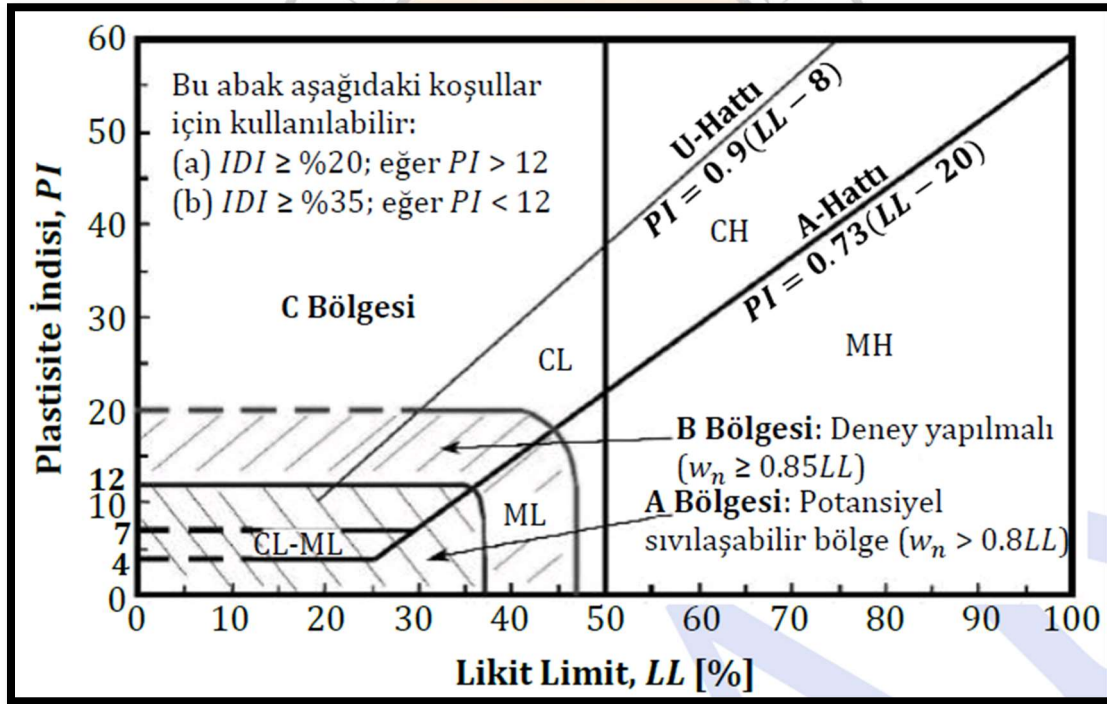
3 No.lu Sütun - SPT (N): Arazide her 1,5 m’de bir yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonucunda elde edilen SPT (N) verileri yazılacaktır (son iki 15 cm’nin toplamı). Deney sonucunda refü için “R” yazılacaktır.

4 No.lu Sütun - Zemin Tipi (UCSC): Sondaj derinliğine bağlı “malzemenin” tanımıdır. Laboratuvar verilerine göre tanımlanacaktır. Aşağıya doğru açılan pencereden seçilecektir.

5 No.lu Sütun - Zemin Tipi (TS-EN-ISO 14688-2): Sondaj derinliğine bağlı “malzemenin” tanımıdır. Aşağıya doğru açılan pencereden seçilecektir.

6 No.lu Sütun - Plastisite İndisi: SPT derinliğinde Atterberg kıvam limitleri deneyine bağlı olarak likit limit ve plastik limitin belirlenmesi sonucu bulunan plastisite indisi. NP (plastik olmayan-*Non plastic*) zeminler için PI değeri yerine “0” değerini giriniz. TBDY Madde 16.6.2’de yapılan sınıflama tanımında $PI < 12$ koşulunu getirmiştir. Analizlerde Plastisite indisinin 12 ’den büyük olması durumunda sınıflama potansiyeli otomatik olarak hesaplanmayacaktır.

UYARI: TBDY’de belirtilmemekle birlikte; Seed ve diğ. (2003) yaklaşımına göre; plastisite indisi 12 ’den ve likit limiti (LL) 37 ’den küçük zeminler doğal su içerikleri (w_n) likit limitlerinin 80 ’inden fazla ise ($w_n = 0.8 \cdot LL$) potansiyel olarak sınıflanabilir; plastisite indisi 12 ile 20 , likit limiti 37 ile 47 arasında olan zeminlerde ise doğal su içeriği (w_n) likit limitlerinin 85 ’inden fazla olması durumunda sınıflama potansiyeli daha detaylı testler (örneğin tekrarlı üç eksenli deneylerin yapılması gibi) ile incelenmelidir. Aşağıdaki şekilde; ince daneli zeminlerin sınıflama/yumuşama performansı değerlendirmesi için Seed ve diğ. (2003)’nin grafiği verilmiştir.



İnce daneli zemin karışımlarında Seed vd. (2003) tarafından önerilen sınıflanabilirlik koşulu (Seed vd., 2003)

Sınıflama hassasiyeti, sınıflamaya uygun koşulların olup olmadığının değerlendirilmesidir. Sınıflama potansiyeli anlamına gelmez. Kullanıcılar isterlerse **killerin sınıflanmaya karşı hassasiyetini** Excel hesap cetvelinde “**Killerin Sınıflama Duyarlılığı**” sayfasında gerekli parametreleri girerek laboratuvar verilerinin hangi bölgeye düştüğünü görerek değerlendirebilirler. Potansiyel olarak sınıflanabilir zeminler doymun haldeki; Şekil’de A bölgesine düşen silt, kil, kum karışımları olarak tanımlanır. Ayrıca Şekil’de B bölgesine düşen ve sınıflama davranışı önceden kestirilemeyen karışımlardan örselenmemiş numune alınarak

sıvılaşma tetiklenmesi laboratuvar ortamında test edilmelidir. C Bölgesindeki zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yoktur, ancak yumuşama potansiyeli değerlendirilmelidir.

Killerin Sıvılaşma Duyarlılığı Analizi Sayfası: Excel çalışma sayfasında en alt satırda yer alan “**Killerin Sıvılaşma Duyarlılığı**” isimli sayfa sekmesinin seçili olduğu durum.

7 No.lu Sütun - Kil İçeriği (%): SPT derinliğinde alınan numunelerde yer alan kil içeriğidir. Yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bu değer laboratuvarında hidrometre deneyi sonucunda elde edilir (sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde hidrometri deneyleri mutlaka yapılmalıdır).

TBDY-2018 Madde 16.6.6’da deprem tasarım sınıfının DTS=4 olduğu ve aynı zamanda kil içeriğinin %20’den fazla ve plastisite indisinin %10’dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmayabilir ifadesi hesaplarda dikkate alınmıştır.

8 No.lu Sütun – Zeminin Tabii Birim Hacim Ağırlığı (γ) : SPT derinliğinde bulunan zeminin tabii birim hacim ağırlığıdır. Birimi kN/m^3 ’tür. Yeraltı suyu seviyesi altında tabii birim hacim ağırlık, doymun birim hacim ağırlığa eşit olur.

9 No.lu Sütun - Zeminin Suyu Doymun Birim Hacim Ağırlığı (γ_d) : SPT derinliğinde bulunan zeminin suya doymun birim hacim ağırlığıdır. Birimi kN/m^3 ’tür.

10 No.lu Sütun - İnce Dane İçeriği (IDI) : Her bir SPT derinliğinde bulunan zeminde yer alan “ince dane içeriğidir”. Yüzde (%) cinsinden ifade edilir. İnce dane miktarı (kil+silt) laboratuvarında elek analizinden belirlenir.

TBDY Madde 16.6.6’da belirtilen, deprem tasarım sınıfının DTS=4 olduğu ve aynı zamanda ince dane yüzdesinin %35’den fazla ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının ($N_{1,60}$) 20 vuruş/30 cm’den yüksek olduğu kumlu zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmayabilir ifadesi hesaplarda dikkate alınmıştır.

2- Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi

(Bu bölümde yer alan hesaplamalar Excel hesap cetvelinde turuncu bölümden girilen veriler göz önüne alınarak otomatik olarak gerçekleştirilir. Hücreler korumalıdır)

11 No.lu Sütun - Düşey Zemin Gerilmesi (σ_{vo}): SPT derinliğindeki düşey zemin gerilmesidir. Birimi kN/m^2 ’dir.

$$\sigma_{vo} = \gamma \times h$$

γ : Zeminin tabii birim hacim ağırlığı (Eğer zemin suya doymun ise suya doymun birim hacim ağırlığı, γ_d , kullanılmaktadır). Birimi kN/m^3 ’dür.

h : SPT derinliğidir (m).

12 No.lu Sütun - Efektif Düşey Zemin Gerilmesi (σ'_{vo}): SPT derinliğindeki efektif düşey zemin gerilmesidir. Birimi kN/m^2 ’dir.

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - (\gamma_{su} \times \text{YASS})$$

σ_{vo} : Düşey zemin gerilmesidir (kN/m^2).

γ_{su} : Suyun birim hacim ağırlığıdır (kN/m^3).

YASS :Yeraltı su seviyesidir (m).

13 No.lu Sütun – Örtü Yükü Düzeltme Katsayısı (C_N): Kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısıdır. TBDY Denklem 16B.2’de belirtilmiştir (birimsiz). Hesaplanan C_N değeri 1.70’den büyük çıkarsa maksimum değeri olan 1.70 alınmalıdır.

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

14 No.lu Sütun - Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C_R): SPT tij boyu düzeltme katsayısıdır. Yapılan hesaplamada SPT tij kılavuz boru uzunluğu 1,5 m olarak kabul edilmiştir. TBDY Tablo 16B.1’de belirtilmiştir (birimsiz). Kullanıcılar SPT için 3.0 m uzunluğunda tij kullandıklarında program 1.5 m klavuz tij borusu uzunluğunu otomatik olarak ilave etmektedir. Buna göre Tabloda 4.5 m tij uzunluğuna karşılık gelen değer “0.85” kullanılır.

15 No.lu Sütun - Numune Alıcı Tipi Düzeltme Katsayısı (C_S): SPT numune alıcı tipi düzeltme katsayısıdır. TBDY Tablo 16B.1’de belirtilmiştir (birimsiz). İlgili kutucuğa tıklayarak açılan kutudan seçiminizi yapınız. İç tüpü olmayan numune alıcılar için tabloda 1.10-1.30 aralığı verilmiştir. Excel tablosunda ortalama değer (1.20) alınmıştır.

16 No.lu Sütun - Sondaj Delgi Çapı Düzeltme Katsayısı (C_B): SPT sondaj delgi çapı düzeltme katsayısıdır. TBDY Tablo 16B.1’de belirtilmiştir (birimsiz). İlgili kutucuğa tıklayarak açılan kutudan seçiminizi yapınız.

17 No.lu Sütun - Enerji Oranı Düzeltme Katsayısı (C_E): SPT enerji oranı düzeltme katsayısıdır. TBDY Tablo 16B.1’de belirtilmiştir (birimsiz).

Tablo 16.1 SPT Düzeltme Katsayıları

Düzeltilme 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_B	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

18 No.lu Sütun - Düzeltilmiş SPT Vuruş Sayısı ($N_{1,60}$): Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı TBDY Denklem 16B.1’de belirtilmiştir (birimsiz). Sıvılaşma analizlerinde her zaman $N_{1,60}$ kullanılır. N_{60} ’da C_N düzeltmesi yoktur.

$$N_{60} = N C_R C_S C_B C_E$$

$$N_{1,60} = N_{60} \cdot C_N$$

Burada;

N : Araziden elde edilmiş SPT darbe sayısı,

C_N : Örtü yükü düzeltme katsayısı,

C_R : Tij boyu düzeltme katsayısı,

C_S : Numune alıcı düzeltme katsayısı,

C_B : Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı,

C_E : Enerji verimliliği düzeltme katsayısıdır ve

$N_{1,60}$: Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı.

19 No.lu Sütun - İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Vuruş Sayısı ($N_{1,60f}$): İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı, ince dane içeriğine göre α ve β katsayıları kullanılarak TBDY Denklem 16B.3’de belirtilmiştir (birimsiz) [Youd vd., 2001].

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

$$\alpha = 0 ; \beta = 1$$

$$(IDI \leq \%5)$$

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

$$(\%5 < IDI < \%35)$$

$$\alpha = 5.0 ; \beta = 1.2$$

$$(IDI \geq \%35)$$

3- Sıvılaşma Direncinin Hesaplanması

20 No.lu Sütun - Moment Büyüklüğü 7.5 Olan Depreme Karşı Gelen Çevrimsel/Tekrarlı Dayanım Oranı ($CRR_{M7.5}$): Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranıdır. İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı TBDY Denklem 16B.4b’de belirtilmiştir (birimsiz) [Youd vd. 2001]. Aşağıdaki formülde ince dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı “34” olduğunda, çevrimsel dayanım oranı tanımsız olmaktadır. Bu nedenle $N_{1,60f}$ 34 ve üzeri için sıvılaşma hesabı yapılmamıştır.

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

$N_{1,60f}$: İnce dane oranına göre düzeltilmiş SPT-N vuruş sayısı.

21 No.lu Sütun – Tasarım Depremi Moment Büyüklüğü Düzeltme Katsayısı (C_M):

Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısıdır. Tasarım deprem büyüklüğüne (M_w) göre TBDY-2018 Denklem 16B.4c’de belirtilmiştir (birimsiz). 7.5 büyüklüğündekinden farklı büyüklükteki olası depremler için uygulanacak düzeltme faktörü için Seed ve Idriss (1971) tarafından verilen aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

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

M_w : Tasarım depreminin moment büyüklüğüdür. $M_w=7.5$ için bu değer (C_M) “1.0” dir.

22 No.lu Sütun - Sıvılaşma Direnci (τ_R): Sıvılaşma direncidir. TBDY Denklem 16B.4a ile hesaplanacaktır. Birimi kPa ’dır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} \cdot C_M \cdot \sigma'_{vo}$$

4- Depremde Oluşan Kayma Gerilmesinin Hesaplanması

23 No.lu Sütun - Gerilme Azaltma Katsayısı (r_d): Gerilme azaltma katsayısıdır. İncelenen derinliğe (z) bağlı olarak TBDY Denklem 16B.6 ile hesaplanacaktır (birimsiz).

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765 \cdot z & z \leq 9.15 \text{m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 \cdot z & 9.15 \text{m} < z \leq 23 \text{m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008 \cdot z & 23 \text{m} < z \leq 30 \text{m} \\ r_d &= 0.50 & z > 30 \text{m} \end{aligned}$$

24 No.lu Sütun - Zeminde Depremden Oluşan Ortalama Tekrarlı Kayma Gerilmesi (τ_{deprem}): Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesidir. TBDY-2018 Denklem 16B.5 ile hesaplanacaktır. Birimi kPa ’dır.

$$\tau_{deprem} = 0.65 \cdot \sigma_{vo} \cdot (0.4 \cdot S_{Ds}) \cdot r_d$$

5- Sıvılaşma Güvenlik Koşulu

25 No.lu Sütun - Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Koşulu (τ_R / τ_{deprem}): Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu TBDY-2018 Denklem 16.3 ile hesaplanacaktır. Denklem 16.3 ile verilen koşul sağlanmaz ise “Sıvılaşma Olabilir”, koşul sağlanır ise “Sıvılaşma Yok” olarak ifade edilmektedir (birimsiz).

$$FS_L = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10 \quad (\text{Denk.16.3})$$

TBDY-2018’e göre Sıvılaşma güvenlik koşulu ile belirlenen sıvılaşma olabilir ($FS_L < 1.10$) ifadesi yeterli kabul edilmemektedir. Deprem sonrası sıvılaşmanın yapıya zarar verip vermediğinin de araştırılması ve gerekli analizlerin yapılması istenmektedir. Bunlar Yönetmeliğin aşağıda belirlenen ilgili maddelerinde ifade edilmektedir.

TBDY Madde 16.6.7 - Zemin sıvılaşması değerlendirilmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.

TBDY Madde 16.6.9 - ... Denklem 16.3'te verilen koşulun sağlanamaması durumunda, sıvılaşma beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yanal yayılma türündeki zemin hareketleri değerlendirilmelidir.

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

6- Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi

Iwasaki vd. Yöntemi (1982)

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi Iwasaki vd. (1982) tarafından sondaj lokasyonu için çoklu tabakaları oluşturan düşey zemin kolonunun yüzeyden 20 m'ye kadar olan sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilmiştir. 20 metrenin üzerindeki derinliklerde program hesaplama yapmamaktadır.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

Burada;

LPI : Iwasaki'ye göre sıvılaşma potansiyel indeksi

F(z) : Güvenlik katsayısının fonksiyonu olan sıvılaşma şiddeti

W(z) : Ağırlıklı (ortalama) fonksiyonu

dz : Derinlik artışını

z : Derinlik (0-20 m)

26 No.lu Sütun – Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı: $F_L < 1.0$ için sıvılaşan tabaka kalınlığını ifade eder. Birimi "m" dir.

27 No.lu Sütun - W(z): Derinlikle değişen sıvılaşma potansiyeli azaltma faktörüdür. Burada (z) zemin yüzeyinden zemin tabakasının orta noktasına olan derinliktir.

$$z < 20m \text{ için; } W(z) = 10 - 0.5 \cdot z$$

$$z > 20m \text{ için; } W(z) = 0$$

28 No.lu Sütun - F(z): Her bir sıvılaşan seviye için tanımlanan bir indekstir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı;

$$F_L < 1.0 \text{ için; } F(z) = 1 - F_L$$

$$F_L > 1.0 \text{ için; } F(z) = 0$$

F_L : Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu. F_L 'nin hesaplanmasında Youd vd. (2001)'de verilen yöntem izlenmiştir.

29 No.lu Sütun – Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (L_1): Sıvılaşma analizini gerektiren her bir SPT deney derinliğindeki sıvılaşma potansiyel indeksi değerlerinin toplamı o sondaj kuyusu için sıvılaşma potansiyeli indeksini belirleyecektir. Hesaplanan toplam sıvılaşma potansiyeli indeksi değerine göre derecelendirilen sıvılaşma potansiyeli “Sıvılaşma Potansiyel İndeksi”ne ait değer tablonun altında belirtilmiştir.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

Sıvılaşma Potansiyeli Sınıflaması (Iwasaki vd., 1982)

Sıvılaşma İndeksi (L_1)	Sıvılaşma Potansiyeli
0	Çok Düşük
$0 < L_1 \leq 5$	Düşük
$5 < L_1 \leq 15$	Yüksek
$15 < L_1$	Çok Yüksek

NOT: Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen Sıvılaşma İndeksinin (*Liquefaction index*) iki önemli sınırlaması bulunmaktadır; a) Sıvılaşma potansiyeli olmayan ($F_L > 1$) alanlar ayırtılamaz ve b) Orta sıvılaşma potansiyeli tanımlamada yer almamaktadır (Sönmez, 2003).

Sönmez ve Gökçeoğlu Yöntemi (2005)

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi Sönmez ve Gökçeoğlu tarafından çoklu tabakaları oluşturan düşey zemin kolonunun yüzeyden 20 m’ye kadar olan sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilmiştir. Sıvılaşma olasılığı kavramı getirilmiştir.

$$L_s = \int_0^{20} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

30 No.lu Sütun – Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı: $F_L < 1.411$ için sıvılaşan tabaka kalınlığını ifade eder. Birimi “m” dir.

31 No.lu Sütun - $W(z)$: Derinlikle değişen sıvılaşma potansiyeli azaltma faktörüdür. Burada (z) zemin yüzeyinden zemin tabakasının orta noktasına olan derinliktir.

$$z < 20m \text{ için; } W(z) = 10 - 0.5 \cdot z$$

$$z > 20m \text{ için; } W(z) = 0$$

32 No.lu Sütun - $P_L(z)$: Her bir seviye için Juang vd. (2003) tarafından tanımlanan sıvılaşma olasılığıdır.

$$F_L \leq 1.411 \text{ için; } P_L(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0.96}\right)^{4.5}}$$

$$F_L > 1.411 \text{ için; } P_L(z) = 0$$

F_L : Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu. F_L 'nin hesaplanmasında Youd vd. (2001)'de verilen yöntem izlenmiştir.

$P_L(z)$: Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısına bağlı olarak, sıvılaşma olasılığı oranı

33 No.lu Sütun – Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_s): Sıvılaşma analizini gerektiren her bir SPT derinliğindeki sıvılaşma şiddeti indeksi değerlerinin toplamı o sondaj kuyusu için sıvılaşma şiddeti indeksini belirleyecektir.

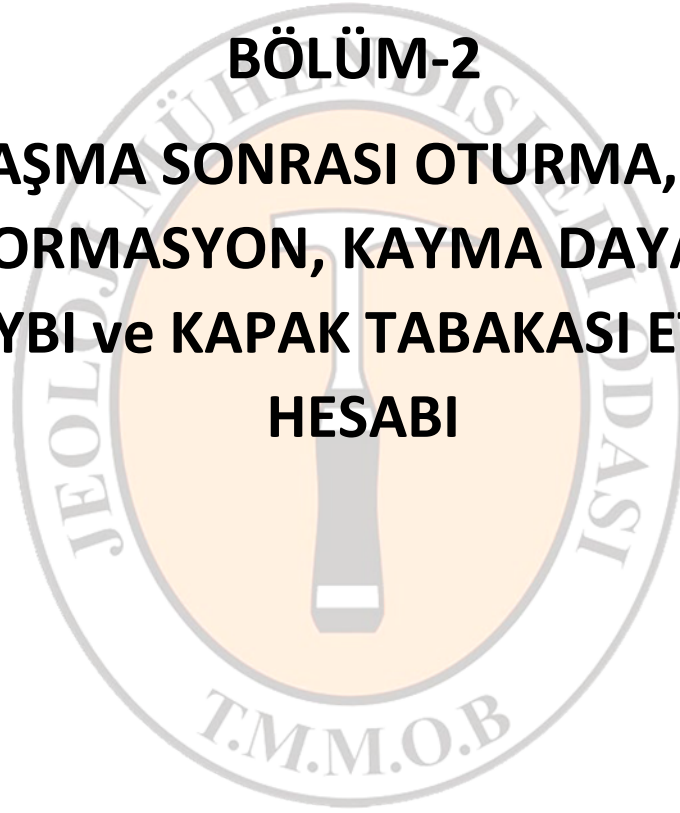
$$L_s = \int_0^{20} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

Hesaplanan toplam sıvılaşma şiddeti indeksi değerine göre derecelendirilen sıvılaşma potansiyeli, “Sıvılaşma Şiddeti İndeksi” ne ait değer tablonun altında belirtilmiştir.

Sıvılaşma şiddeti (L_s) indeksi sınıflaması (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005)

L_s	Sıvılaşma Şiddeti
$85 \leq L_s < 100$	Çok Yüksek
$65 \leq L_s < 85$	Yüksek
$35 \leq L_s < 65$	Orta
$15 \leq L_s < 35$	Düşük
$0 < L_s < 15$	Çok Düşük
$L_s = 0$	Sıvılaşmaz

BÖLÜM-2
SIVILAŞMA SONRASI OTURMA, YANAL
DEFORMASYON, KAYMA DAYANIMI
KAYBI ve KAPAK TABAKASI ETKİSİ
HESABI



BÖLÜM-2

TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ (TBDY-2018) İLE UYUMLU BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ ANALİZİ İLE SIVILAŞMA SONRASI OTURMA, YANAL YAYILMA, KAYMA DAYANIMI KAYBI ve KAPAK TABAKASI ETKİSİ HESABI (v.1)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ekinde yer alan, 16.6. “Deprem Etkisi Altında Zeminin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi” başlığı altında sıvılaşma riski ile ilgili hususlar yer almakta olup, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile Uyumlu Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi için hazırlanmış Excel hesap cetvelinde gerekli şartlar ve hesap kriterleri “BÖLÜM-1” de belirtilmiştir.

Bununla birlikte; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Madde 16.6.9’da belirtilen, sıvılaşma direncinin, zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesine oranının 1,10 değerine eşit ya da büyük olması durumunda, sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulunun sağlandığı ancak bu koşulun sağlanmaması durumunda, sıvılaşması beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yan al yayılma türündeki zemin hareketlerinin değerlendirileceği ifade edilmektedir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde ve yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak **“Sıvılaşma Potansiyeli Analizi, Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Yayılma, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesabı”** için Microsoft Excel programı kullanılarak hesap cetveli hazırlanmıştır.

İlk bölüm Sıvılaşma Potansiyeli Analizinden oluşmakta olup, “BÖLÜM-1” de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

İkinci bölüm ise; Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Yayılma, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesabından oluşmaktadır.

İkinci bölümde yer alan hesaplamalar; ilk bölümde yer alan veriler ve hesaplamalardan bilgi aldığı için, **ilk bölüm veri girişleri ve sıvılaşma hesaplamaları tamamlanmadan kesinlikle ikinci bölüme geçilmemelidir.**

İkinci bölümde yer alan hesaplamalar, uygulamaya esas kullanımlar için yeni yaklaşımlar içermektedir. Bu yüzden yapılan hesaplamalardan sonra sonuçların dikkatlice yorumlanması gereklidir. Hesaplama cetvelinde yer alan bilgiler yeni gelişmeler ışığında güncellenecek ve genişletilecektir.

ÖNEMLİ NOT:

Kullanıcıların bilmesi gereken en önemli konu bu Excel tablosundaki hesaplamaların düz bir yüzey üzerinde (eğimsiz), herhangi bir yapının olmadığı durumdaki hesaplamaları içerdiği ve

bu hesaplamaların kesin olmadığı unutulmamalıdır. Bu hesaplamalar tasarımdan ziyade kullanıcıya sonuca yönelik bir fikir vermektedir. Örneğin yanal deformasyon miktarı birçok faktöre bağlıdır (Zemin eğimi, mekansal (spatial) konum, heterojenite, serbest bir yüzeye olan uzaklık ve gömülü yapılardan korunma vb.). Bu nedenle burada verilen yöntemler dışında daha ileri araştırma ve hesap yöntemlerine gereksinim duyulabilir.

Yapılarda hasara sebep olan deprem etkileri arasında kuvvetli yer sarsıntısı birincil etki olarak en büyük öneme sahip olmakla birlikte sivilaşma, taşıma gücü kaybı ve heyelan tetiklenmesi gibi ikincil etkilerin de toplam zemin davranışını belirlemede büyük önemi vardır. Yer sarsıntısına paralel olarak sözü edilen ikincil etkilerin hepsinin bir arada oluşma olasılığı düşüktür. Bazı durumlarda, çoğunlukla birkaçı bir arada oluşur veya birbirlerini tetikler.

EXCEL ZEMİN SIVILAŞMASI DEĞERLENDİRMESİ HESAP CETVELİNDE KULLANILAN PARAMETRELER

Bu çalışmada değişik araştırmacılar tarafından verilen abaklar ve denklemler kullanılmıştır. Excel hesap cetvelinde prensip olarak yöntemi geliştiren araştırmacıların önerdiği düzeltmeler kullanılmıştır.

Aşağıda Excel hesap cetvelinde kullanılan veriler detaylı olarak açıklanmaktadır.

- Antet bölümü;

Bu bölümde yer alan verilerin tümü (Proje Adı, Ada No, Parsel No, Sondaj Kuyu No, Koordinatlar, Datum, Kot, Yeraltı Su Seviyesi, Zemin Sınıfı, Deprem Hesabı Verileri, M_w , Deprem Tasarım Sınıfı [DTS], S_{DS} , SPT verileri, Numune Alıcı Tipi, Sondaj Delgi Çapı, Tokmak Tipi ve Enerji Oranı) “Sivilaşma Potansiyeli Analizi” sayfasından alınmaktadır.

Sivilaşma Potansiyeli Analizi Sayfası: Excel çalışma sayfasında en alt satırda yer alan “Sivilaşma Potansiyeli Analizi” isimli sayfa sekmesinin seçili olduğu durum.

1- Sivilaşma Potansiyeli Analizi Sayfasından Alınan Veriler

1 No.lu Sütun - Sıra No: Sivilaşma analizinde kontrolün kolay yapılabilmesi için verilen satır numaraları otomatik olarak yazılmıştır. Bu sütundaki veriler “sivilaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

2 No.lu Sütun - Derinlik: Standart Penetrasyon Deneyinin yapıldığı başlangıç derinliğidir. Sivilaşmanın bittiği zemin tabakası başlangıç derinliği (sivilaşma hesabı için SPT verisini içeren en son derinlik) ise tabloda belirtilen yere (derinlik sütununun sonuna) yazılmıştır. Birimi metre'dir. Bu sütundaki veriler “sivilaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

3 No.lu Sütun - SPT (N): Arazide her 1,5 m'de bir yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonucunda elde edilen SPT (N) verileri yazılmıştır (son iki 15 cm'nin toplamı). Deney

sonucunda refü için “R” yazılmıştır. Bu sütundaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

4 No.lu Sütun - Zemin Tipi (UCSC): Sondaj derinliğine bağlı “malzemenin” tanımıdır. Laboratuvar verilerine göre tanımlanacaktır. Bu sütundaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

5 No.lu Sütun - Zemin Tipi (TS-EN-ISO 14688-2): Sondaj derinliğine bağlı “malzemenin” tanımıdır. Bu sütundaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

6 No.lu Sütun - Efektif Düşey Zemin Gerilmesi (σ'_{vo}): SPT derinliğindeki efektif düşey zemin gerilmesidir. Birimi kN/m²'dir. Bu sütundaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

7 No.lu Sütun - Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Koşulu (τ_R / τ_{deprem}): Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu TBDY Denklem 16.3 ile hesaplanacaktır. Denklem 16.3 ile verilen koşul sağlanmaz ise “Sıvılaşma Olabilir”, koşul sağlanır ise “Sıvılaşma Yok” olarak ifade edilmektedir (birimsiz). Bu sütundaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınmaktadır.

$$FS_L = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1,10 \quad (\text{Denk 16.3})$$

2- Oturma ve Yanal Yer Değiştirme/Deformasyon Miktarı Hesabı

Bu tablodaki tüm değerler otomatik olarak hesaplanmaktadır.

TBDY-2018’de “Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşan zeminin mukavemet ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin de dikkate alınması gerekmektedir” şeklinde bir ifade yer almaktadır. Yönetmelikte buna özel bir yöntem tarif edilmemektedir. Bu yöntemler sürekli gelişim halindedir. Literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilen değişik yöntemler bulunmaktadır.

Laboratuvar çalışmaları ve arazideki gözlemler dinamik yükler altında temellerdeki göçmenin sadece temel zemininin sıvılaşmasından değil, zeminin direncini kaybetmesiyle oluşan taşıma gücü kaybından da meydana gelebileceğini göstermektedir.

Derin tabakaların yüzeysel oturmaya katkılarını değerlendirmek üzere bir ağırlık derinlik faktörü kullanılmamıştır.

- Ishihara ve Yoshimine [1992] Yöntemi

Idriss ve Boulanger (2008) Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından geliştirilen grafik çözümü eşitlik haline getirmişlerdir.

8 No.lu Sütun – Limit Kesme Birim Deformasyonu (γ_{lim}): Yanal yer değiştirme ve dinamik oturma hesapları için ince dane içeriğine (IDI) ve düzeltilmiş penetrasyon darbe sayısına ($N_{1,60f}$) göre hesaplanan limit kesme birim deformasyonudur.

$$\gamma_{lim} = 1,859 \times \left(1,1 - \sqrt{\frac{N_{1,60f}}{46}} \right)^3 \geq 0$$

9 No.lu Sütun - Parametre (F_α): Yanal yer değiştirme ve dinamik oturma hesapları için IDI'ye göre düzeltilmiş penetrasyon darbe sayısına ($N_{1,60f}$) göre hesaplanan parametredir.

$$F_\alpha = 0,032 + 0,69 \times \sqrt{N_{1,60f}} - 0,13N_{1,60f}$$

Bu ifade $N_{1,60f} \geq 7$ için geçerlidir.

10 No.lu Sütun - Maksimum Kesme Birim Deformasyonu (γ_{max}): Yanal yer değiştirme ve dinamik oturma hesapları için F_α parametresi ve sıvılaşma güvenlik koşuluna göre hesaplanan maksimum kesme birim deformasyonudur.

$$2 > \frac{\tau_r}{\tau_{deprem}} > F_\alpha \text{ ise; } \gamma_{max} = \min \left\{ \gamma_{lim}, 0,035 \times \left(2 - \left(\frac{\tau_r}{\tau_{deprem}} \right) \right) \times \left(\frac{1-F_\alpha}{\frac{\tau_r}{\tau_{deprem}} - F_\alpha} \right) \right\}$$
$$\frac{\tau_r}{\tau_{deprem}} \leq F_\alpha \text{ ise; } \gamma_{max} = \gamma_{lim}$$

11 No.lu Sütun – Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı (ΔH_i): SPT derinliklerine göre hesaplanan sıvılaşan tabaka kalınlığıdır. Birimi "metre"dir.

12 No.lu Sütun – Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yer Değiştirme (ΔLDI_i): Zeminin maksimum kesme birim deformasyonu altındaki yer değişimidir. Her bir SPT derinliği için yanal yer değiştirmeler hesaplanır. Hesaplanan her bir yanal yer değiştirme değeri toplanarak bulunan toplam yanal yer değiştirme değeri tabloda ilgili sütunun en alt satırına yazılır. Birimi "metre"dir.

$$\Delta LDI_i = \sum (\gamma_{max} \times \Delta H_i)$$

13 No.lu Sütun - Hacimsel Birim Deformasyon (ε_v): Maksimum kesme birim deformasyonu ve IDI'ye göre düzeltilmiş penetrasyon darbe sayısına ($N_{1,60f}$) göre hesaplanan deformasyondur. Yüzde ile ifade edilir.

$$\varepsilon_v = 1,5 \times \exp(-0,369 \sqrt{N_{1,60f}}) \times \min(0,08 \times \gamma_{max})$$

14 No.lu Sütun - Dinamik Oturma (ΔS_i):

Zemin yüzeyindeki oturma, ondalık olarak ifade edilen hacimsel birim deformasyon ile her bir zemin katmanının kalınlığının çarpımından elde edilir.

Her bir SPT deney derinliği için sıvılaştırılabilir nitelikteki tabakalar için dinamik oturmalar hesaplanır. Hesaplanan her bir dinamik oturma değeri toplanarak bulunan toplam dinamik oturma değeri tabloda ilgili sütunun en alt satırına yazılır. Birimi metre'dir.

$$\sum S = \sum (\varepsilon_v \times \Delta H_i)$$

Burada;

$\sum S$: Yüzeyde beklenen toplam oturma

ε_v : Hacimsel birim deformasyon

ΔH_i : Her bir zemin tabakası kalınlığı, m

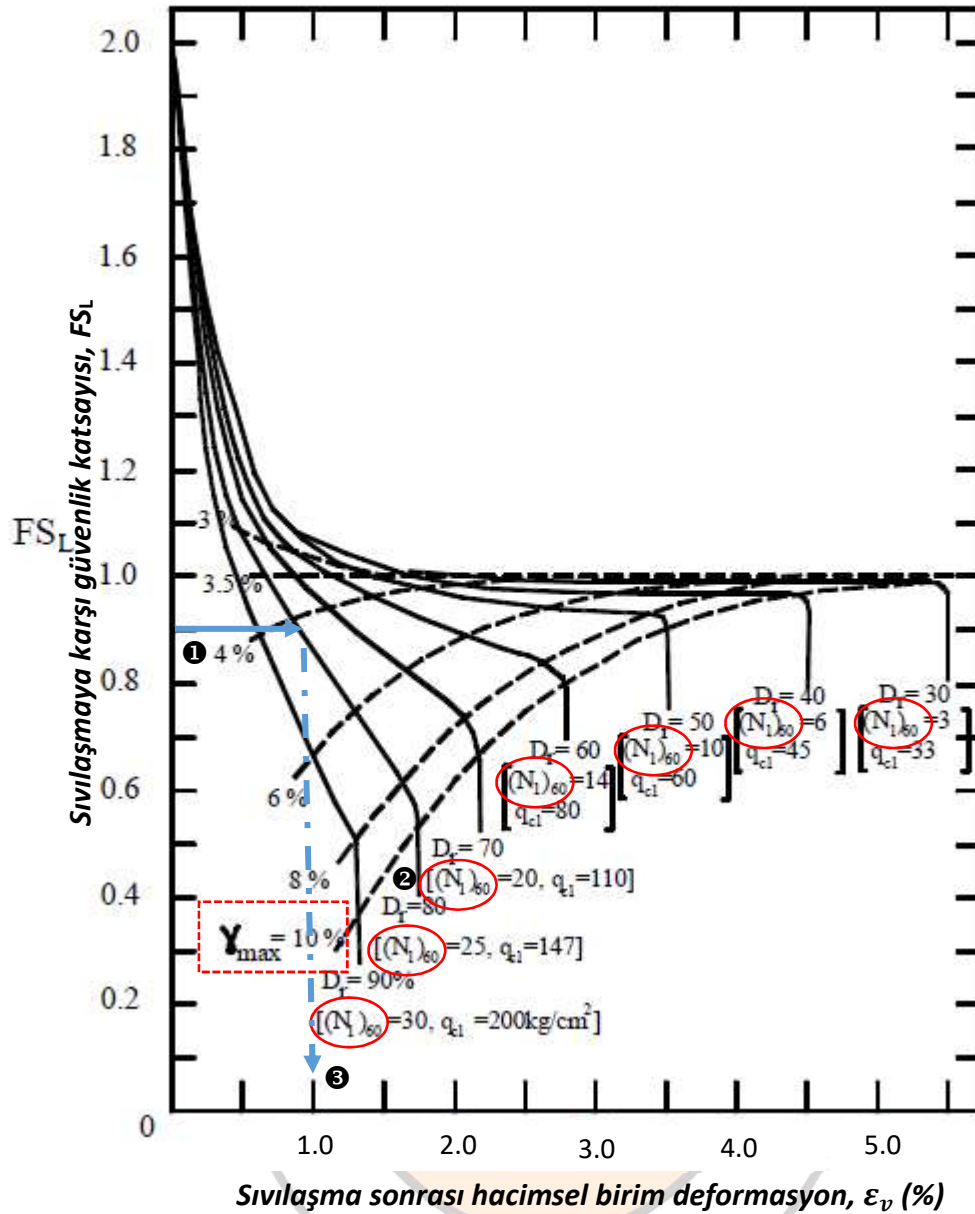
Abak çözümünün kullanılması:

Yukarıdaki denklem çözümü Excel hesaplama tablosunda verilmiştir. Kullanıcılar isterlerse abak çözümlerle de bu sonuçları kontrol edebilirler. Bu amaçla güvenlik sayısı (FS_L) düşey ekseninde **(1)** bulunur. Düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($N_{1,60}$) grafikten **(2)** belirlenir ve kesiştirilir. Bu kesişim noktasından düşey inilerek yatay ekseninde hacimsel birim deformasyon (ε_v) elde edilir **(3)**. Sıvılaştırılması beklenen her zemin tabakası için ayrı ayrı bulunacak hacimsel birim deformasyonlar ile tabaka kalınlıkları çarpılarak zemin tabakalarında meydana gelecek oturmalar belirlenir.

Örneğin sıvılaştırılması beklenen tabaka kalınlığı 5 m ise ($FS_L=0.9$ ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $N_{1,60}=25$ olduğunu varsayınız) $\varepsilon_v=\%1$ hacimsel sıkışma elde edilir.

Örnek verecek olursak, bu durumda $500 \text{ cm} \times 0.01 = 5 \text{ cm}$ düşey deformasyon gerçekleşir.

FS_L 'nin 1'den büyük fakat 2'den düşük bir miktar olması durumunda, deprem esnasında zemin yapısında meydana gelen büzülme, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumuna yol açar ve bu aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesi de miktar olarak küçük bir oturmaya neden olur. Şekilde FS_L 'nin 2'ye eşit veya büyük olması durumunda hacimsel birim deformasyonun pratikte sifıra eşit olacağı görülmektedir.



Temiz kumda sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısının (FS_L) fonksiyonu olarak zemin yüzeyi oturmasını ve yanıl deformasyonu bulmada kullanılan abak / Chart for Liquefaction Volumetric Strain (After Ishihara and Yoshimine, 1992)

- D_r : Zeminin relatif sıklık değeri
- q_{c1} : Düzeltilmiş konik penetrasyon (CPT) uç direnci (kg/cm^2)
- $N_{1,60}$: Düzeltilmiş SPT-N değeri
- γ_{max} : Maksimum kayma birim deformasyonu
- ϵ_v : Hacimsel birim deformasyon

Sıvılaşma sonrası yanıl deformasyonun (*Post Liquefaction Lateral Displacement*) tahmin edilebilmesi için; Temiz kumda sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün (FS_L) fonksiyonu olarak zemin yüzeyi oturmasını bulmada kullanılan diyagramdaki γ_{max} çizgileri (kesikli çizgiler) kullanılacaktır. Abaktan FS_L ile $N_{1,60}$ değerinin kesişim noktasına en yakın kesikli çizgi belirlenecektir. Her bir tabakaya ait yanıl deformasyonu elde etmek için tabaka kalınlığı ile bulunan bu değeri çarpmak gerekir.

- Tokimatsu ve Seed [1987]

15 No.lu Sütun - Moment Büyüklüğü 7.5 Olan Depreme Karşı Gelen Çevrimsel Gerilim Oranı ($CSR_{M7,5}$): Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel gerilim oranıdır. Birimsizdir.

$$CSR_{7,5} = \frac{0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot r_d}{MSF}$$
 Formülde a_{max} ve MSF yerine değerleri yazılırsa

$$CSR_{M7,5} = \frac{0,65 \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}\right) \cdot 0,4 \cdot S_{DS} \cdot r_d}{2,5 - (0,2 \cdot M_w)} \quad FS_L \leq 1 \text{ için}$$

Burada;

$CSR_{7,5}$: Moment büyüklüğü 7.5 olan depremin oluşturduğu devirsel kayma gerilmesi oranı;

σ_v : İncelenen derinlikteki toplam düşey zemin gerilmesi;

σ'_v : Aynı derinlikteki efektif düşey zemin gerilmesi;

a_{max} : Yüzeyde oluşan en büyük yatay yer ivmesi olup ($0.4 \times S_{DS}$) değerine eşittir;

g : Yer çekimi ivmesi değeri;

r_d : Derinlikle meydana gelen kayma gerilmesi azalmasını gösteren bir düzeltme katsayısı; ve

MSF : Depremin moment büyüklüğü (M_w) düzeltme katsayısı [$MSF=2.5-0.2 \cdot M_w$]. Bu değer 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için 1'e eşittir.

NOT: Prensipten olarak burada verilen formülde yöntemi geliştiren araştırmacının önerdiği Moment Büyüklüğü (M_w) Düzeltmesine (MSF) sadık kalınmıştır.

16 No.lu Sütun - Hacimsel Birim Deformasyon (ε): Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel gerilim oranının ($CSR_{M7,5}$), düzeltilmiş SPT vuruş sayısına ($N_{1,60}$), oranının 0,01'den büyük olduğu durumlar için belirlenmiş, düzeltilmiş SPT vuruş sayısına ($N_{1,60}$) göre hesaplanan hacimsel birim deformasyondur. Yüzde olarak ifade edilir.

$$\left(\frac{CSR_{M7,5}}{N_{1,60}}\right) > 0,01 \text{ için ;}$$

$$\varepsilon = 10 \times (N_{1,60})^{-0,6} \times 0,01$$

17 No.lu Sütun - Toplam Dinamik Oturma (ΔS): Zeminin hacimsel birim deformasyon altındaki dinamik oturmasıdır. Her bir SPT deney derinliği için dinamik oturmalar hesaplanır. Hesaplanan her bir dinamik oturma değeri toplanarak bulunan toplam dinamik oturma değeri tabloda ilgili sütunun en alt satırında hesaplanır. Birimi metre'dir.

$$S = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \varepsilon_{vi}$$

Burada;

H_i : Her bir tabakanın kalınlığı;

ε_{vi} : Hacimsel birim deformasyon; ve

N : Tabaka sayısı.

Abak çözümünün kullanılması:

Düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($N_{1,60}$) verisi yatay eksende (2) ve düzeltilmiş çevrimsel gerilme oranı (CSR) verisi dikey eksende (1) kullanılarak şekilden hacimsel birim deformasyonlar (ε_v) belirlenebilir (3). Her tabaka için ayrı ayrı bulunacak hacimsel birim deformasyonlar ile tabaka kalınlıkları çarpılarak tabakalarda meydana gelecek oturmalar belirlenir. Bu işlem zemin profilindeki tüm zemin tabakaları için uygulanır. Bu hacimsel birim deformasyon değerleri derinlikle integre edilerek zemin yüzeyindeki oturmalar belirlenebilir.

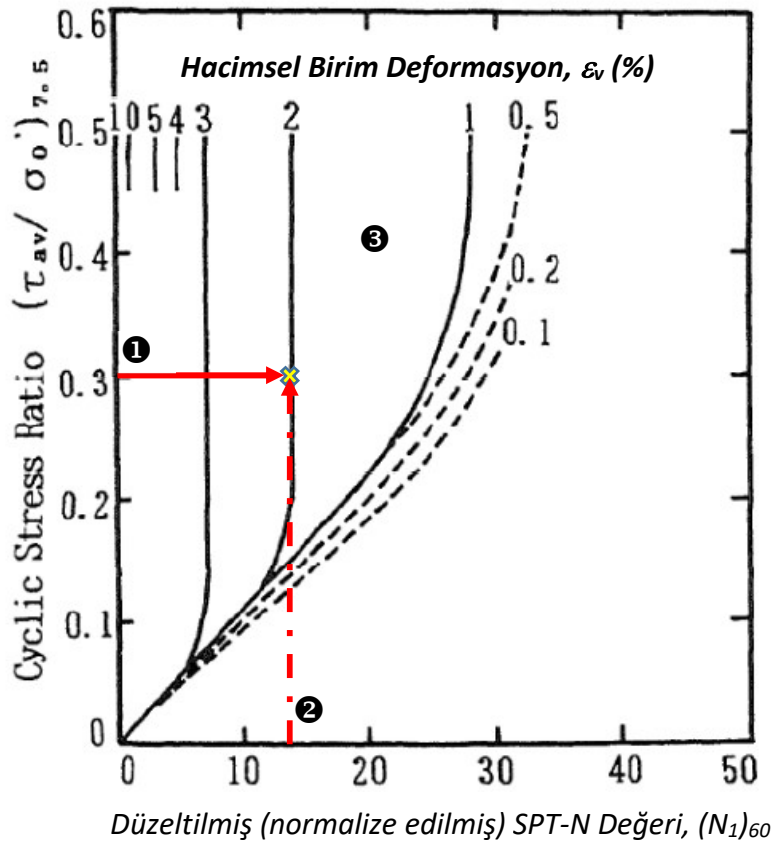
$$S = H \cdot \varepsilon_v$$

Burada,

S : Oturma

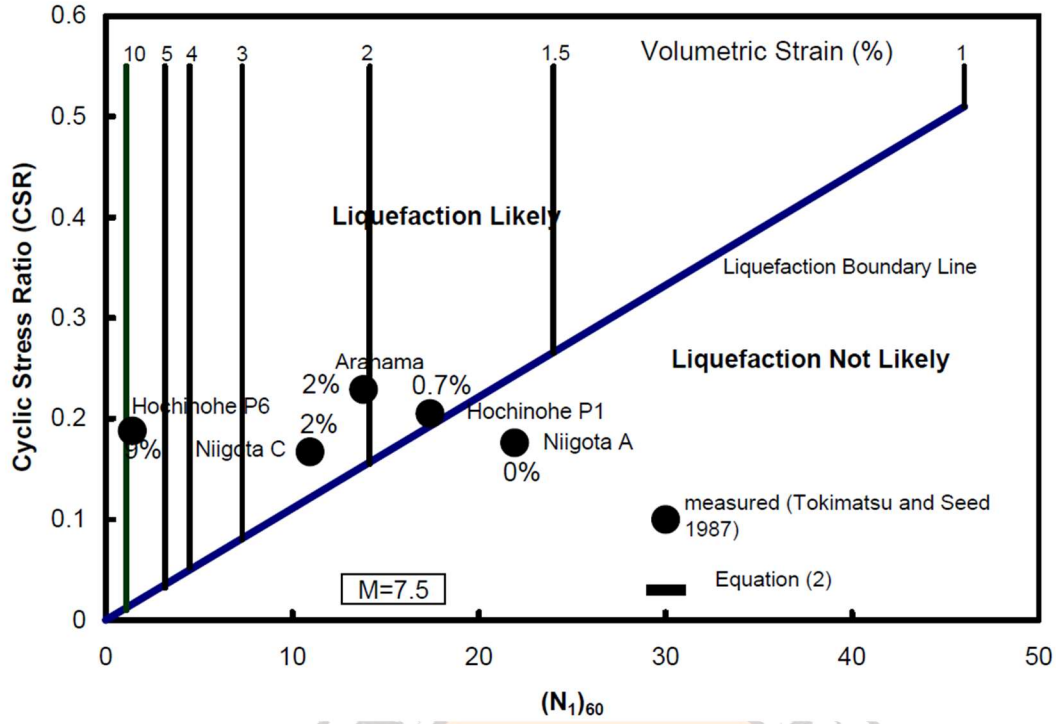
H : Katman kalınlığı ve

ε_v : Hacimsel birim deformasyon (*volumetric strain*)



$FS_L \leq 1$ (sürekli çizgi) veya $FS_L > 1$ (kesikli çizgi) olduğu temiz doymuş kumlarda Devirsel Gerilme Oranı (CSR) ile Standart Penetrasyon Direnci ($N_{1,60}$)'nden Hacimsel Birim Deformasyonu (ε_v) hesaplama (Tokimatsu ve Seed, 1987)

Yukarıdaki grafik çözüm yöntemi yanında Excel hesaplama cetvelinde denklem ile çözüm yöntemi sunulmuştur. Orijinal makalede bu çözüm yöntemi olmadığından literatürde başka bir araştırmacı C. Y. Lee, 2007 tarafından önerilen yüksek korelasyon katsayısı değeri veren aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.



Doygun kumlarda hacimsel birim deformasyon (ϵ_v), $(N_1)_{60}$ ile CSR arasındaki ilişki /Relationship between cyclic stress ratio, $(N_1)_{60}$ and volumetric strain for saturated sands (C. Y. Lee, 2007)

$$\epsilon_v = 10 [(N_{1,60})]^{-0.6}$$

$$\left[\frac{CSR}{(N_{1,60})} \right] > 0.01 \text{ koşulu için verilmiştir.}$$

Burada;

CSR = τ_{deprem} : Zeminde depremden kaynaklı oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi

ϵ_v : Hacimsel birim deformasyon (volumetric strain)

$N_{1,60}$: Örtü yükü düzeltilmesi yapılmış %60 enerji verimliğindeki SPT darbe sayısını temsil etmektedir.

3- Sıvılaşma Sonrası Dayanım Kaybının Hesabı

Dinamik yükler altında temellerdeki oturmanın sadece temel zeminin sıvılaşmasından değil, zeminin direncini kaybetmesiyle oluşan taşıma gücü kaybından da meydana geldiği görülmüştür. Aşağıda sıvılaşma sonrası zemin dayanımının ($C_{u,r}$) hesaplanmasına yönelik yöntemler verilmiştir. Sıvılaşan zemin kütlelerine artık drenajsız dayanım atanarak sıvılaşma sonrası taşıma gücü, şev stabilitesi vb. analizler yapılabilir.

TBDY-2018 Madde 16.3.3 – Kohezyonsuz zeminlerde, deprem etkisinde oluşacak boşluk suyu basıncı artışları ve içsel sürtünme açısı değeri azalışları dikkate alınarak, toplam gerilme analizlerinde drenajsız kayma mukavemeti ($\tau_{cy,u}$) değeri kullanılacaktır.

NOT: Metinde belirtilen $C_{u,r}$ değeri Yönetmelikte belirtilen drenajsız kayma mukavemeti ($\tau_{cy,u}$) değerine karşılık gelmektedir.

Bu tablodaki tüm değerler otomatik olarak hesaplanmaktadır.

- Idriss ve Boulanger [2008] Yöntemi

18 No.lu Sütun – Düzeltilmiş SPT Vuruş Sayısı İçin İnce Dane İçeriği Düzeltmesi ($\Delta N_{1,60}$):

Idriss ve Boulanger [2008] yöntemine göre düzeltilmiş standart penetrasyon deneyi vuruş sayısı ($N_{1,60}$) değeri için Seed [1987]'e göre ince dane içeriği düzeltmesidir (birimsiz).

İnce Dane İçeriği (IDI) % No.200 elekten geçen %	($\Delta N_{1,60}$)
10	1
25	2
50	4
75	5

$\Delta N_{1,60}$ - IDI arasındaki ilişki (Seed, 1987)

Burada; düzeltilmiş standart penetrasyon deneyi vuruş sayısı ($N_{1,60}$) değerine, ince dane içeriği düzeltmesi (Seed, 1987) eklenerek, ilgili düzeltmelerin yapıldığı standart penetrasyon deneyi vuruş sayısı ($N_{1,60,tk}$) hesaplanır.

$$N_{1,60,tk} = N_{1,60} + \Delta N_{1,60}$$

Tabloda listelendiği gibi, Seed (1987) tarafından önerilen $\Delta(N_1)_{60}$ değerleri, düzeltmenin elde edilebileceği fiziksel verilerin (deneysel ya da ampirik) olmaması nedeniyle temel olarak mühendislik kararına dayanmaktadır. Ayrıca, "IDI" için yapılan bu düzeltmelerin sınılaşmayı tetikleyici korelasyonlar için önceden kabul edilmiş olan düzeltme değerlerinden farklı olduğunu unutmamak gerekir.

19 No.lu Sütun – Kayma Direnci Açısı (ϕ): Kayma direnci açısı SPT yapılan her seviyede kohezyonsuz zeminler için aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanmıştır. Birimi derecedir.

Kohezyonsuz (Kumlu) Zeminler için:

Schmertmann (1975) tarafından önerilen σ_{v0}' - SPT- N - ϕ' arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Kulhawy ve Mayne (1990), Şekilde verilen korelasyonun yaklaşık olarak bağıntı ile de temsil edilebileceğini ifade etmiştir.

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{N}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma_{v0}'}{p_a} \right)} \right]^{0.34}$$

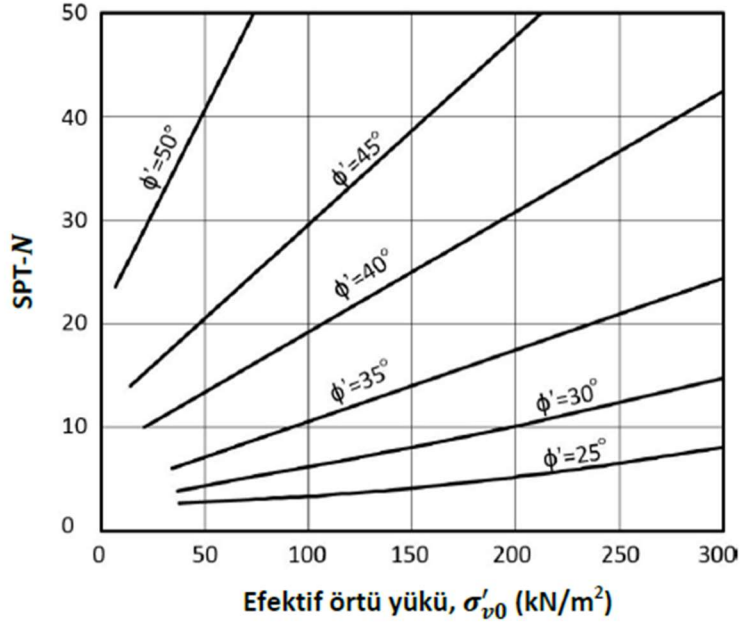
Burada;

p_a : Atmosferik basınç olup $\cong 100 \text{ kN/m}^2$ 'dir.

ϕ' : Kayma direnci açısı (derece)

N : SPT direnci (darbe/30 cm)

σ'_{v0} : SPT yapılan derinlikteki efektif düşey gerilme (kPa)



σ'_{v0} - SPT-N - ϕ' arasındaki ilişki (Schmertmann, 1975)

20 No.lu Sütun – Sıvılaşma Sonrası Rezidüel Kayma Dayanımı Durum-1 ($C_{u,r}$):

Burada sıvılaşma sonrası tekrarlı yükleme sonucunda azalan dayanımın tahmin edilmesine yönelik önerilen yöntemlerden biri verilmiştir.

Sıvılaşma durumunda zeminin kayma dayanımında azalma oluşmaktadır. Sıvılaşma tetiklenme analizleri sonucu hesaplanan Güvenlik sayısının hedef değerinin altında kaldığı durumlarda ($FS_L < 1.10$) Idriss ve Boulanger [2008], iki olası duruma göre, ilgili düzeltmelerin yapıldığı Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) vuruş sayısını ($N_{1,60,tk}$) baz alarak, temiz kumlar ve silt-kum karışımlarında sıvılaşma sonrası rezidüel kayma dayanımının ($C_{u,r}$) efektif gerilmeye oranını vaka analizleri kullanılarak [Seed, 1987, Seed ve Harder, 1990, Olson ve Stark, 2002] bir çalışma yapmıştır.

Bunlardan;

Durum-1'de sıvılaşma sonrası oluşan boşlukların, yeniden dağılımın oluşması beklenmeyen durumlarda, rezidüel kayma dayanımının ($C_{u,r}$) efektif gerilmeye oranını (σ'_{v0}) gösteren denklem aşağıda belirtilmiş olup, hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Bu koşulda zeminin tabakalanma durumu aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesine engel olmayarak, sönmelenme sonucunda zeminde sıkılaşma oluşur. Idriss ve Boulanger (2008) yönteminde düzeltilmiş standart penetrasyon deneyi darbe sayısı ($N_{1,60,tk} = N_{1,60} + \Delta N_{1,60}$) değerinde $N_{1,60}$ değeri $N_{1,60} = N(C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \cdot C_N)$ verilen şekilde hesaplanacak olup, ilgili düzeltme katsayıları

verilen Tablodan ($\Delta N_{1,60}$ - **IDI** arasındaki ilişki) alınacaktır. Durum 1 için (c_{ur}/σ'_{v0}) oranı SPT verilerine dayalı olarak yukarıdaki Şekil'den veya analitik olarak aşağıdaki Denklem'den elde edilmektedir. c_{ur}/σ'_{v0} oranı maksimum $\tan\phi'$ değerini almaktadır.

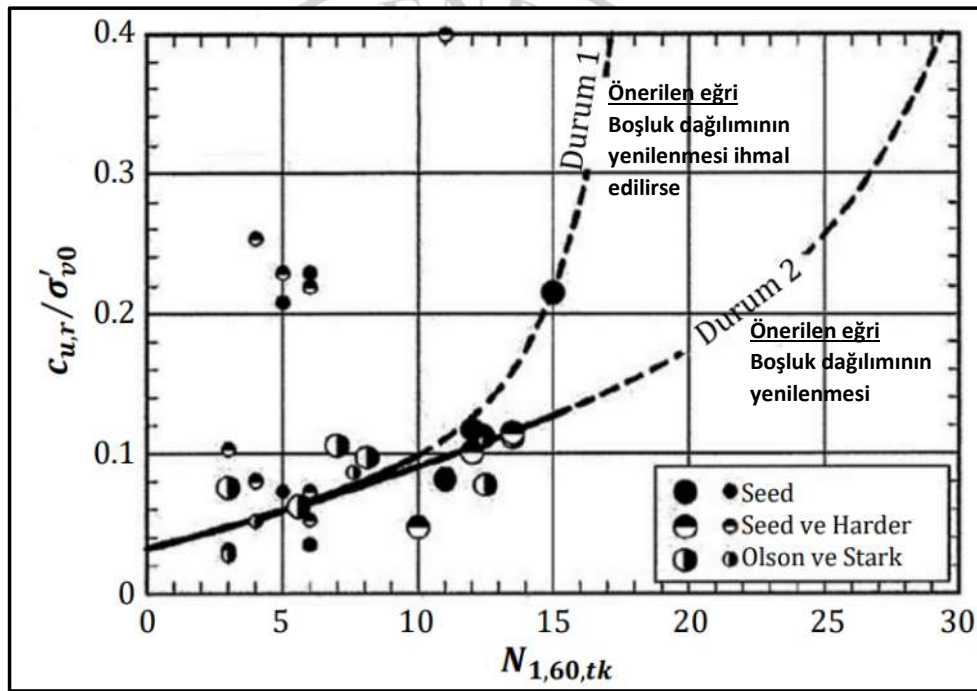
$$\frac{c_{u,r}}{\sigma'_{v0}} = \exp \left\{ \left(\frac{N_{1,60,tk}}{16} \right) + \left(\frac{N_{1,60,tk} - 16}{21,2} \right)^3 - 3,0 \right\} \times \left\{ 1 + \exp \left[\left(\frac{N_{1,60,tk}}{2,4} \right) - 6,6 \right] \right\} \leq \tan\phi'$$

Burada;

ϕ' : Kohezyonsuz zeminin statik durumdaki kayma direnci açısıdır.

$N_{1,60,tk}$: Örtü yükü ve ince dane içeriği düzeltilmesi yapılmış %60 enerji verimliğindeki SPT darbe sayısını temsil etmektedir.

NOT: Eşitlik, $\sigma'_{v0} < 400$ kPa için geçerlidir.



SPT direncine bağlı sıvılaşma sonrası kayma dayanımı (Idriss ve Boulanger, 2008)

Seed (1987), Seed ve Harder (1990) ve Olson ve Stark (2002) tarafından yayınlanan geçmiş vakaları kullanarak elde edilen $\sigma'_{v0} < 400$ kPa için kum ve eşdeğer temiz-kum SPT düzeltilmeli darbe sayısı ile c_{ur}/σ'_{v0} oranı ilişkisi.

21 No.lu Sütun – Sıvılaşma Sonrası Rezidüel Kayma Dayanımı Durum-2 ($C_{u,r}$):

Durum-2'de sıvılaşma sonrası oluşan boşlukların, yeniden dağılım oluşturması beklenen durumlarda, rezidüel kayma dayanımının ($C_{u,r}$) efektif yüke oranını (σ'_{v0}) gösteren denklem aşağıda belirtilmiş olup, hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Birimi kPa'dır. Bu koşulda zeminin tabakalanma durumu aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesine engel olur. Bu durum genelde sıvılaşan zemin biriminin üzerinde düşük geçirgenliğe sahip kohezyonlu bir birimin varlığı nedeniyle oluşur. Sıvılaşabilir birimde gelişen aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmemesi ve sıvılaşabilir tabaka ile üzerindeki tabaka arasında suyun ince

bir film oluşturmasına neden olur. Sonuçta, lokal olarak gevşeme ve dayanım kaybına sebebiyet vermesi ile gerçekteşir. c_{ur}/σ'_{v0} maksimum $\tan\phi'$ değerini almaktadır.

$$\frac{c_{u,r}}{\sigma'_{v0}} = \exp \left\{ \left(\frac{N_{1,60,tk}}{16} \right) + \left(\frac{N_{1,60,tk} - 16}{21,2} \right)^3 - 3,0 \right\} \leq \tan\phi'$$

Burada;

ϕ' : Kohezyonsuz zeminin statik durumdaki kayma direnci aısidır. SPT yapılan her bir zemin tabakası derinliği için hesaplanmıştır.

$N_{1,60,tk}$: Örtü yükü ve ince dane içeriği düzeltmesi yapılmış %60 enerji verimliğindeki SPT darbe sayısını temsil etmektedir.

σ'_{v0} : SPT yapılan derinlikteki efektif düşey gerilme (kPa)

NOT-1: Eşitlik, $\sigma'_{v0} < 400$ kPa için geçerlidir.

NOT-2: Idriss ve Boulanger [2008]'nin eşitlikleri sıvılaşma sonrası rezidüel kayma dayanımının efektif gerilmeye oranını vermektedir. Bu oran kullanılarak istenilen düşey efektif gerilme düzeyindeki (düşey efektif gerilme belirlenirken zemin üzerinde bir yapı varsa, yapının zemine aktardığı gerilme de hesaba katılmalıdır) sıvılaşma sonrası rezidüel kayma dayanımı hesaplanabilir.

- Kramer ve Wang Yöntemi [2015]

Kramer ve Wang (2015) tarafından geliştirilen hibrid modele göre sıvılaşma sonrası rezidüel kayma dayanımı ile SPT- $N_{1,60}$ arasında verilen Şekil'den veya Denklem'den elde edilebilmektedir.

$$\overline{\ln C_{u,r}} = -8,444 + 0,109 \cdot N_{1,60} + 5,379 \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,1}$$

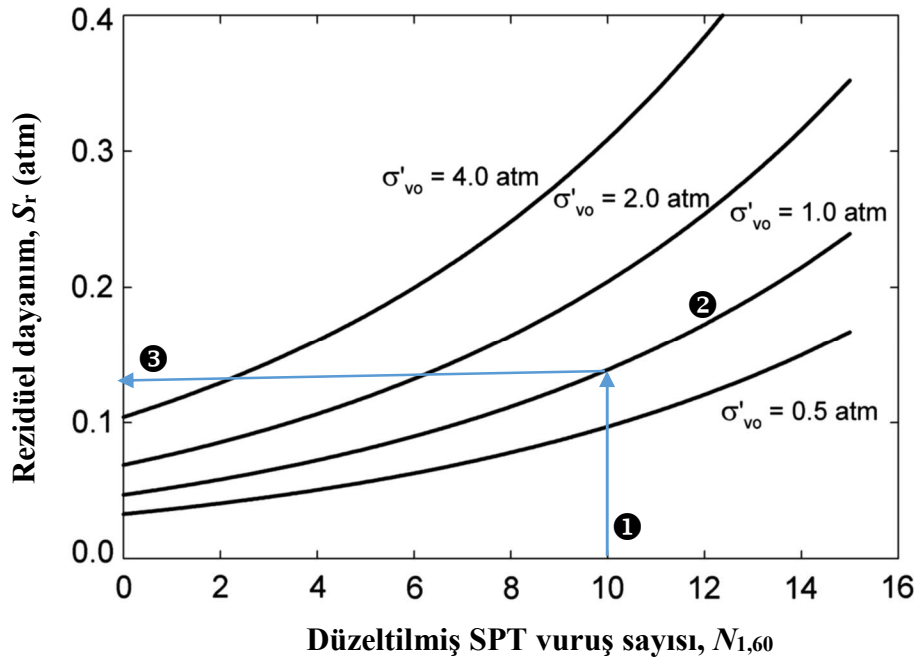
Burada;

C_{ur} : Rezidüel kayma dayanımı.

σ'_{v0} : Sıvılaşma tetiklenmesinin gerçekteşmesi öngörülen zemin tabakasındaki ortalama efektif örtü gerilmesidir [atm].

22 No.lu Sütün – Efektif Düşey Zemin Gerilmesi (σ'_{v0}): SPT derinliğindeki efektif düşey zemin gerilmesidir. Bu stndaki veriler “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasından otomatik olarak alınıp birimi değiştirilmiştir. Birimi atm'dir.

23 No.lu Sütün – Sıvılaşma Sonrası Rezidüel Drenajsız Kayma Dayanımı ($C_{u,r}$): Sıvılaşma sonrası rezidüel kayma dayanımını ($C_{u,r}$) gösteren denklem yukarıda verilmiş olup, hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Birimi kPa'dır. Bu denklemde efektif düşey yük (σ'_{v0}) birimi atmosferdir. Eşitlikten elde edilen sonuç 101.33 ile çarpılarak C_{ur} değeri kPa birimine dnştrlmştir.



SPT direncine bağılı rezidüel kayma dayanımı (Kramer ve Wang, 2015)

$N_{1,60}$ değerinin 10 (1) efektif gerilme değerinin 1 atm olduğunu kabul edelim.

Abakta 1 atm=100 kPa eğrisi (2) ile kesiştirilir ve düşey eksende;

$S_r = 0.13$ (3) değeri elde edilir.

$C_{u,r} = S_r = 0.13 \times 100 = 13$ kPa

- Weber vd. Yöntemi [2015]

24 No.lu Sütun – Sıvılaşma Sonrası Rezidüel Kayma Dayanımı ($C_{u,r}$): Sıvılaşma sonrası rezidüel drenajsız kayma dayanımını ($C_{u,r}$) gösteren grafik ve denklem aşağıda verilmiş olup, hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Bu yöntem sıvılaşma tetiklenmesi sonrası rezidüel kayma dayanımını/mukavemetini belirlemek üzere olasılıksal bir çözüm sunmaktadır. Deterministik değerlendirmelerde rezidüel kayma dayanımı aşağıdaki Şekil’de sunulan abak çözümü ya da aşağıdaki Denklem’de verilen bağıntı ile hesaplanacaktır. Birimi kPa’dır. Bu denklemde efektif düşey gerilme (σ'_{vo}) birimi atm ’dir.

$$C_{u,r} = \exp(0.1292 \cdot N_{1,60tk} + 4.322 \cdot \sigma'_{vo}{}^{0.12}) \times 0,04788$$

Burada;

$C_{u,r}$: Sıvılaşma sonrası rezidüel drenajsız kayma dayanımı [kPa],

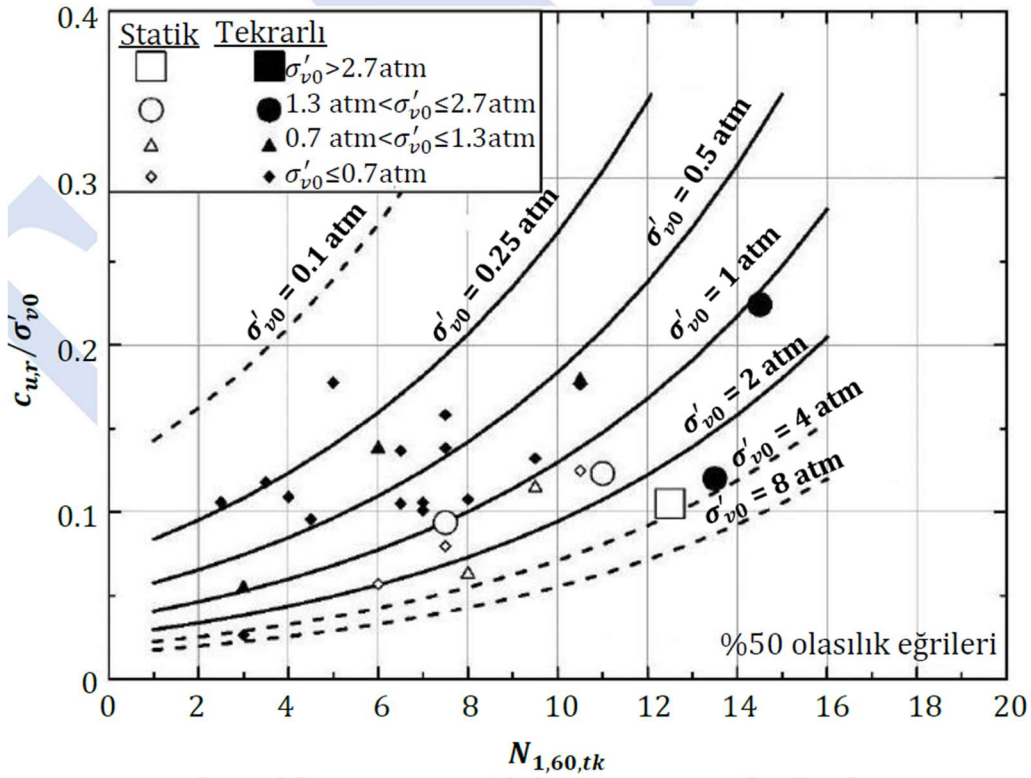
σ'_{vo} : Değerlendirilen derinlikteki düşey efektif gerilme [atm] ve

$N_{1,60,tk}$: Örtü yükü ve ince dane içeriği düzeltilmesi yapılmış %60 enerji verimliğindeki SPT darbe sayısını temsil etmektedir.

1lb/ft²=0.04788 kPa

NOT: Bu verilen hesapların tamamı düz ve serbest zemin yüzeyi için geçerli olup aynı zamanda yapının olmadığı durumda yapılan değerlendirmelerdir. Eğer zemin yüzeyinde bir yapı (bina, dolgu, baraj vb.) varsa yapılardan aktarılan gerilmelerde dikkate alınmalıdır.

Grafik çözümün kullanılması:



SPT direncine bağlı sıvılaşma sonrası rezidüel drenajsız kayma dayanımı (efektif gerilme ile düzeltilmiş) (Weber vd., 2015)

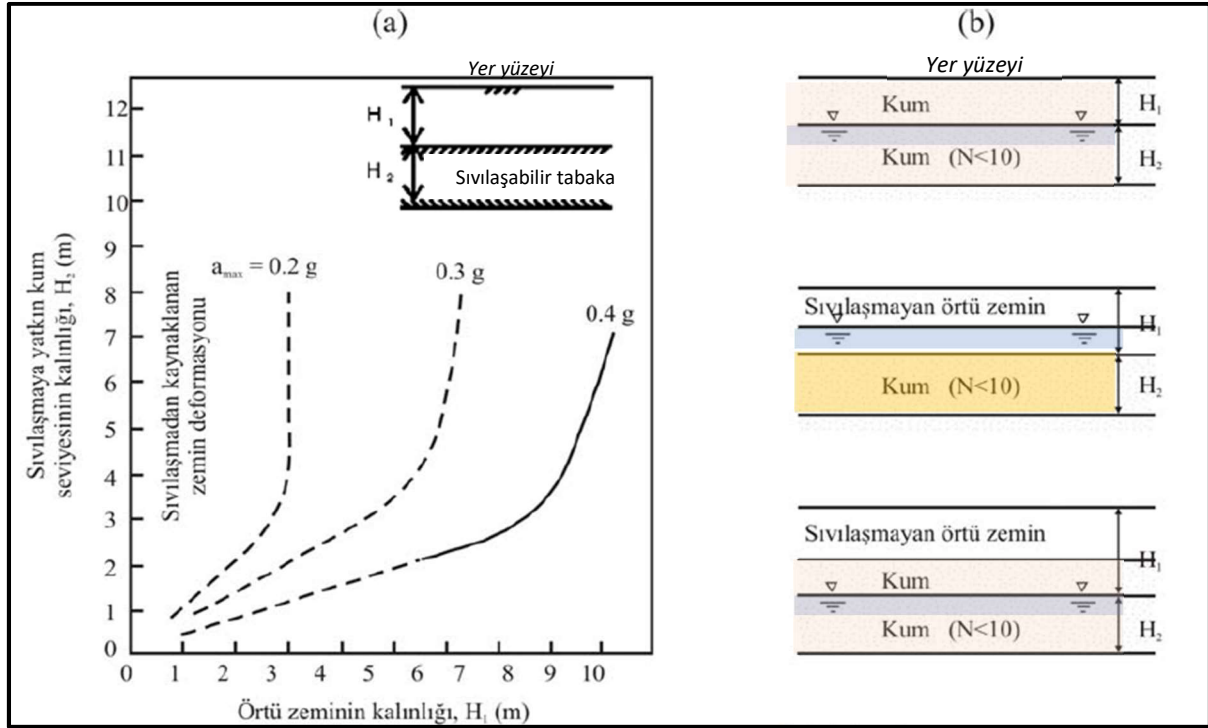
4- Kapak Tabakası Etkisi Hesabı

- Ishihara [1985]

Sıvılaşan zeminde oluşan boşluk suyu basıncının zeminin suyla birlikte yüzeye taşınabilecek kadar artabilmesi için sıvılaşan zeminin üzerindeki sıvılaşmaya karşı dirençli örtü zemininin (kapak zemini) kalınlığının az olması gerekir. Örtü zemininin çok kalın olması durumunda, aşırı boşluk suyu basıncının oluşturacağı yüzeye yönelmiş kuvvetler zemin tanelerini yüzeye kadar taşıyabilecek büyüklükte olamaz ve sıvılaşma yüzeyde kum kaynamaları ya da kum konileri şeklinde gözlenmez. Aynı şekilde sıvılaşan çok ince kum seviyelerine ait malzemede yüzeye kadar ulaşamayabilir. Bu tür zemin koşullarında sıvılaşmanın göstergesi olabilecek kum kaynamaları ve kum volkanları yüzeyde görülmemekle birlikte, bu durum sıvılaşmanın gelişmediği anlamına gelmemektedir (Ishihara, 1985).

Ishihara (1985) farklı yer ivmesi aralıkları için sıvılaşan zemin ile sıvılaşmaya dirençli örtü zemininin kalınlığı arasındaki ilişkiye bağlı olarak, sıvılaşmanın etkilerinin yüzeyde görülüp görülmeyeceğinin tahmini amacıyla aşağıda verilen abağı önermiştir.

Bu yöntemde zemin özelliklerinin çok sağlıklı bir şekilde tanımlanmış olması gerekmektedir. Aşağıdaki abağı kullanmak için H_1 ve H_2 tabaka kalınlıkları belirlenmelidir.



Sıvılaşmamış yüzeysel kalınlığının, sıvılaşmaya yatkın tabaka kalınlığının ve sıvılaşmanın etkilerinin yüzeyde görülüp görülmemesi arasında ayırım yapan pik zemin yüzeyi ivmesinin kombinasyonları (Ishihara, 1985).

a) Sıvılaşmanın oluşturduğu etkilerin yüzeyde görülüp görülmediğini değerlendirmek için kullanılacak grafik,

b) bu grafiğin kullanılmasında sıvılaşabilen kum seviyelerinin kalınlıkları ile ilgili veya örtü zemininin kalınlığının belirlenmesi için kılavuz kesitler.

a_{max} : Maksimum yatay yer ivmesidir.

H_1 ve H_2 kalınlıkları, yeraltı suyu tablasının derinliğine ve sıvılaşmayan zemin tabakasının durumuna göre 3 gruba ayrılır. Bu değerlendirme yöntemi kullanılırken dikkate alınması gereken sıvılaşmaya yatkın zemin (H_2) ile sıvılaşmayan örtü zemininin tabaka kalınlıkları (H_1) ve su tablasının durumu yukarıdaki abakta verilmiştir. Şekil b'de iki durum için sıvılaşmayan yüzey tabakası YASS'ın yukarısında yer alan zemin kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Bu durumlardan bir tanesinde ise tabakanın bir kısmı YASS altındadır. Vaka analizlerine dayalı olarak bu tabakayı sıvılaşmayan kohezyonlu zemin olarak düşünmüşlerdir. Pratik amaçlar için YASS altındaki sıvılaşmayan zemin tabakasını, H_1 tabaka kalınlığını belirlemek için kullanmışlardır. H_1 tabaka kalınlığına sahip zeminlerin güvenlik faktörü (FS_L) birden fazladır. Bununla beraber sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü (FS_L) bir değerini sadece biraz geçerse H_2 tabakasından suyun yukarı doğru akışından dolayı sıvılaşabilir. Yani sıvılaşmayan tabakanın bir kısmı YASS altında kalırsa mühendislik tecrübesine göre H_1 belirlenebilir.

İnceleme alanındaki ardalı sıvılaşabilir ve sıvılaşmayan seviyelerin varlığından oluşan tabaka kalınlıklarında sıvılaşmaya yatkın tabakaların kalınlıkları (H_2) için güvenlik faktörü (FS_L) bire eşit veya daha küçüktür.

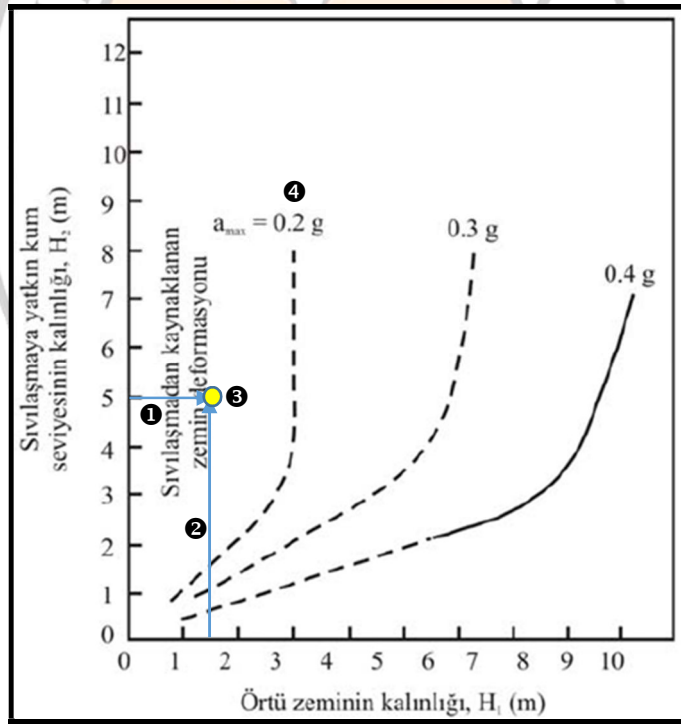
NOT: Bu verilen hesaplamaların tamamı düz bir arazi yüzeyi ve serbest zemin yüzeyi için geçerli olup aynı zamanda yapının olmadığı durumda yapılan değerlendirmelerdir.

25 No.lu Sütun – Sıvılaşmaya Yatkın Kum Zemin Kalınlığı (H_2): Sıvılaşabilir kum tabakası kalınlığıdır. 20 metreye kadar olan her bir SPT seviyesindeki sıvılaşabilir zemin tabakası kalınlıkları toplanarak sıvılaşabilir toplam zemin kalınlığı (H_2), sütunun en alt satırında verilmiştir. Birimi metredir.

26 No.lu Sütun – Örtü Zemin Kalınlığı (H_1): Arazide belirlediğiniz sıvılaşmayan örtü zemin tabakası kalınlığını (H_1) ilgili kutucuğa yazınız. Birimi metredir.

Sıvılaşmanın Oluşturduğu Etkilerin Yüzeyde Görünebilirliği: Sıvılaşmanın oluşturduğu etkilerin yüzeyde görülüp görülmemeye durumuna göre aşağı doğru açılan kutudan seçim yapılır.

Sıvılaşabilir kum tabakası kalınlığı (H_2) düşey eksen üzerinde belirlendikten sonra **(1)** bu değer ile yatay eksen üzerinde arazide belirlediğiniz sıvılaşmayan örtü zemin tabakası kalınlığı (H_1) karşılaştırılarak **(2)** abak üzerindeki yeri belirlenir **(3)**. Daha sonra kullanıcı tarafından maksimum ivme değerine ($a_{maks}=0,4 \cdot S_{DS}$) karşılık gelen eğrinin yeri abak üzerinde belirlenir **(4)**. Tasarım depremi (M_w) için oluşması beklenen olası hasar verici etkileri tek bir sondaj noktasında belirlemek için değerlendirme yapılır. Eğer kesim noktası bu eğrinin sol tarafında kalıyorsa sıvılaşmanın etkilerinin yüzeyde gözlenebilirliğiyle ilgili olarak “**sıvılaşma etkileri yüzeyde görülür**”; sağ tarafında kalıyorsa “**sıvılaşma etkileri yüzeyde görülmez**” şeklinde tanımlama yapılır.



Sıvılaşmanın oluşturduğu etkilerin yüzeyde görülüp görülmediğini değerlendirmek için kullanılacak abak

- Sönmez vd. [2008]

Kapak zemini kalınlığının zemin yüzeyinde sıvılaşma kaynaklı deformasyonlara etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada Ishihara (1985) tarafından önerilen ve önemli sınırlamalar içeren abağa alternatif olarak yeni bir abak oluşturulmuştur. Bu yeni yaklaşımın aşağıdaki özellikleri sağlaması öngörülmüştür.

- Örtü zemininin altında kalan seviyelerin sıvılaşma şiddeti,
- Örtü zemini altında ve pratikte kabul gören yüzeyden 20 m'lik etkin sıvılaşma zonu içerisindeki sıvılaşan ve sıvılaşmayan seviyelerin tümü,
- Depremin büyüklüğü, etkin yer ivmesi, zeminin jeoteknik özellikleri gibi sıvılaşmada etkili olan parametrelerin de dikkate alınması.

Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından önerilen Sıvılaşma Şiddeti İndeksi-*Liquefaction severity index* (L_s) eşitliğinde kullanılan parametreler yukarıda belirtilen tüm özellikleri içermektedir (bkz. sıvılaşma potansiyeli analizi bölüm-1).

$$L_s = \int_0^{20} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

$$P_L = \frac{1}{1+(F_L/0.96)^{4.5}} \quad F_L \leq 1.411 \text{ için;}$$

$$P_L(z) = 0 \quad F_L > 1.411 \text{ için;}$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad z < 20\text{m}$$

$$W(z) = 0 \quad z \geq 20\text{m}$$

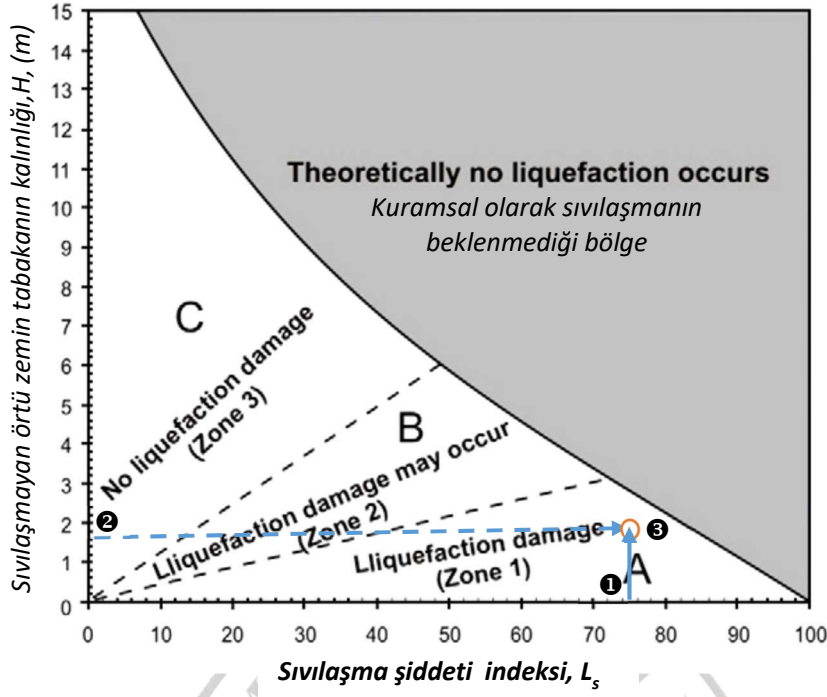
P_L : Sıvılaşma olasılığı oranı

F_L : Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

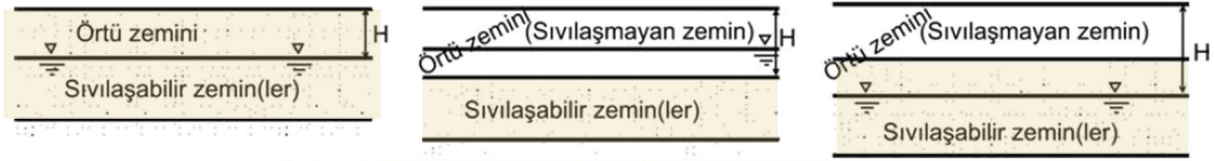
z : Zemin tabakasının orta noktasının metre cinsinden derinliği

Sıvılaşma şiddeti (L_s) indeksi sınıfları (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005)

L_s	Tanımlama
$85 \leq L_s < 100$	Çok Yüksek
$65 \leq L_s < 85$	Yüksek
$35 \leq L_s < 65$	Orta
$15 \leq L_s < 35$	Düşük
$0 < L_s < 15$	Çok Düşük
$L_s = 0$	Sıvılaşmaz



Sıvılaşmayan örtü zeminini kalınlığı (H) ile L_s değerlerinin işlendiği abak



Abağın kullanılmasında örtü zemininin kalınlığının belirlenmesi için kılavuz kesitler

Örneğin yatay ekseninde 20 metre derinliğe kadar Sönmez ve Gökçeoğlu (2005)'na göre hesaplanmış L_s değeri 75 (1), dikey ekseninde sıvılaşmayan örtü zeminin (kapak zemin) kalınlığı (H) 1.5 m ise (2), kesişim noktası (3) "Zone 1" içerisine düşer. Bu durumda **yüzeysel hasar durumu** için "sıvılaşma hasarı var" tanımı yapılır.

Abağın oluşturulmasında derinlik açısından üç sınıfa ayrılan bölgeler (Sönmez vd., 2005)

Zonlar	Simgeler	Hasar Durumu
Zon 1	A	Sıvılaşma hasarı var
Zon 2	B	Sıvılaşma hasarı oluşabilir
Zon 3	C	Sıvılaşma hasarı yok

25 No.lu Sütun – Sıvılaşmaya Yatkın Kum Zemin Tabakası Kalınlığı (H_2): Sıvılaşabilir kum tabakası kalınlığıdır. 20 metreye kadar olan her bir SPT seviyesindeki sıvılaşabilir zemin tabakası kalınlıkları toplanarak sıvılaşabilir toplam zemin kalınlığı (H_2), sütunun en alt satırında verilmiştir. Birimi metredir.

26 No.lu Sütun – Örtü Zemin Tabakası Kalınlığı (H_1): Arazide belirlediğiniz sıvılaşmayan örtü zemin tabakası kalınlığı (H_1) ilgili kutucuğa yazılır. Birimi metredir.

Sönmez vd., 2008’de program Sıvılaşmaya Yatkın Kum Zemin Tabakası Kalınlığı (H_2) ve Örtü Zemin Kalınlığı (H) değerlerini “Kapak tabakası” başlığı altındaki ilgili kutucuklardan otomatik olarak almaktadır.

27 No.lu Sütun – Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_s): Bu kutucuktaki değer “sıvılaşma potansiyeli analizi” sayfasındaki Sıvılaşma Şiddeti İndeksi-LSI (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005)’den otomatik olarak alınmaktadır. Hesaplanan “Sıvılaşma Şiddeti İndeksi” ne ait değer tablodaki kutucukta L_s değeri olarak verilmiştir.

Yüzeysel Hasar Durumu: Abak üzerinde yüzeysel hasar durumunu noktanın düştüğü yere göre belirleyip aşağıya doğru açılan kutudan seçim yapılır.

NOT-1: Sönmez vd. (2008)’in geliştirdiği abak, sıvılaşabilen tabakaların sürekliliği gibi sıvılaşma kaynaklı yüzey deformasyonları üzerinde etkili olan faktörleri dikkate almamaktadır. Bu nedenle eğimli topoğrafya, yapı özellikleri ve örtü zeminine ait özelliklerin değerlendirilmesi konusunda herhangi bir açıklama içermemektedir.

AÇIKLAMALAR:

- 1- Bu Excel sayfasında yatay zemin yüzeyi serbest zemin koşulları varsayımı ile sıvılaşma kaynaklı oturmalar, yanal deformasyonlar değerlendirilmektedir. Bu nedenle özellikle sahada topoğrafik eğimin olduğu durumda da yanal yayılma değerlendirilmeli, sıvılaşma kaynaklı şev duraylılığı değerlendirilmeli, yapıların olduğu durumlarda ise sıvılaşma kaynaklı temel-zemin göçmesi değerlendirmeleri ayrıca yapılmalıdır.
- 2- TBDY, 2018 Madde 16.6.10 – Belirlenen sıvılaşma sonrası yer değiştirmelerin üstyapı/altyapı davranışına etkileri değerlendirilerek ihtiyaç duyulması halinde üstyapı ve/veya zemin iyileştirmeleri uygulanacaktır.
- 3- TBDY-2018 zemin iyileştirme yöntemlerinin saha zeminlerinin karakteristikleri ile uyumlu seçiminin uzman mühendislerce yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Seçilen zemin iyileştirme uygulamasının başarısı iyileştirme sonrası deneyler ile yerinde teyit edilmelidir.

Referanslar

- C. Y. Lee, 2007, Earthquake-Induced Settlements In Saturated Sandy Soils
- Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. 1982. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, UK, 925–939.
- Juang CH, Yuan H, Lee DH, Lin PS (2003) A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. J Geotech Geoenviron Eng 129 (1):66– 80.
- R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., & Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. Keynote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA.
- Seed, R. B., Cetin, K.O., Moss, R. E. S., Kammerer, A., Wu, J., Pestana, J., Riemer, M., Sancio,
- TBDY (2018), “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar”, Türkiye Cumhuriyeti, Ankara.
- Sonmez, H. Gokçeoglu, C. 2005, A liquefaction severity index suggested for engineering practice, Environmental Geology, 48(1), 81 – 91.
- Sonmez, B., Ulusay, Resat., Sonmez, Harun., 2008, A study on the identification of liquefaction-induced failures on ground surface based on the data from the 1999 Kocaeli and Chi-Chi earthquakes.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., & Stokoe, K.H. 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 127 (10): 817–833.