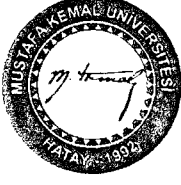


167506



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZEMİN SIVILAŞMASI

KADİR ERGÜVEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTAKYA

Ocak 2005

Mustafa Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne,

Yrd. Doç. Dr. Nurdane İLBEYLİ danışmanlığında, Kadir ERGÜVEN tarafından hazırlanan bu çalışma 31/01/2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç Dr. Nurdane İLBEYLİ

İmza

Üye : Doç Dr. Semir ÖVER

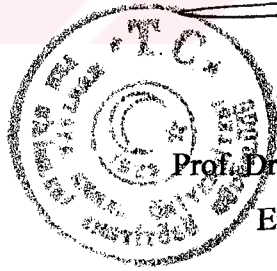
İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Naci ÇELİK

İmza

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Kod No: 221



İmza

31/01/2005

Prof. Dr. Abdurrahman YİĞİT

Enstitü Müdürü

Bu çalışma M.K.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca desteklenmiştir.

Proje No: 03 DO 201

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç.....	1
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. Materyal.....	5
3.1.1. Sıvılaşma Teorisi.....	5
3.2 Yöntem.....	6
3.2.1. Sıvılaşma Özelliklerini Etkileyen Faktörler.....	6
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	9
4.1 Sıvılaşma Direncinin Laboratuvar ve Arazi Şartlarında Karakteristikleri.....	9
4.1.1 Laboratuvar Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	9
4.1.2 Arazi Test Sonuçlarının Kullanımı.....	10
4.1.2.1 Standart Penetrasyon Direnci.....	10
4.1.2.2 Konik Penetrasyon Direnci.....	14
4.1.2.3 Kesme Dalga Hızı.....	15
4.1.2.4 Dilatometre Gösterge.....	16
4.2. Sıvılaşma Tahmini Methodları.....	17
4.2.1 Seed ve Idriss Tarafından Önerilen Genel Method.....	17
4.2.2 Standart Penetrasyon Bilgileri ile Sıvılaşma Analizi Yapılması.....	24
4.2.3 Sıvılaşma Tahmini: Eurocode Methodu.....	31
4.2.4 Sıvılaşma Tahmini: Japon Methodu	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	43
5.1 Temel İnşaatında Dizayn Standartları ve Öneriler.....	43
5.2 Bina Temellerinin Dizaynına Dair Tavsiyeler.....	45
5.3 Sonuç.....	50
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	56

ÖZET

ZEMİN SIVILAŞMASI

Sivilaşma potansiyeli hesabında zeminler yapısal karakteristikleri ve sismik etkenlerle birlikte değerlendirilir. Bu çalışmamızın amacı zeminlerin sivilaşma olasılığının hangi yöntemlerle nasıl hesaplandığını basit yaklaşımlardan daha tercih edilir birçok parametreyi bünyesinde barındıran yaklaşımlara doğru sıralayarak tespit etmektir. Tespit edilen sonuçlara karşılık nasıl bir çözüm yöntemi bulunacağına dair tavsiyelerle çalışmamız sona ermektedir.

Çalışmamızda laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Seed, SPT deneyi, Eurocode ve Japon methodları kullanılarak değişik malzeme ve deprem dalgaları için iki boyutlu sivilaşma analizleri yapılmıştır.



2005, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sivilaşma potansiyeli, Seed methodu, SPT deney methodu, Eurocode methodu, Japon methodu

ABSTRACT**LIQUEFACTION OF SOIL**

Soils are evaluated with their characteristics and seismic factors to determine liquefaction potential of deposits. The purpose of this thesis is to determine liquefaction potential of soils by which methods uses how estimate from simple approaches to step by step the approaches that contents lots of parametres. The recommendations that solutions are determined by the results of these approaches have given in the last of this thesis.

Two-dimentional liquefaction analyses are used for different material properties and earthquake waves by using Seed, SPT test, Eurocode, Japanese methods on results that obtained from either laboratory or site tests.

2005. 56 pages

Keywords: Liquefaction potential, Seed method, SPT test method, Eurocode method, Japanese method

ÖNSÖZ

Son yıllarda ülkemizde meydana gelen depremlerle birlikte zemin kaynaklı problemlerin hak ettiği önemi geçde olsa kazandığını görmekteyiz. Ancak zeminin birçok alanında olduğu gibi dünyada da henüz anlaşılması güç bir olgu olan zemin sivilaşması hakkında literatürümüze eser kazandırma gerekliliğı aşıkardır. Yapı dizaynının ancak ve ancak tüm parametreler gözönüne alınarak güvenli bir şekil alacağı anlaşılmalıdır. Çalışmamın bu uğurda bilgilenmek isteyen araştırmacılara sade ve anlaşılır bir rehber olacağı kanaatindeyim.

Çalışmamın oluşmasında değerli katkılarını esirgemeyen Sn. Yrd. Doç. Dr. Nurdane İLBEYLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SPT	: Standart Penetrasyon Testi
CPT	: Konik Penetrasyon Testi
CSR	: Siklik Gerilme Oranı
DMT	: Dilatometre Testi
ER	: Enerji Oranı Yüzdesi
CM	: Deprem Büyüklüğü Düzeltme Katsayısı



TABLÖLER DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Siklik Gerilim Yaklaşımı İçin Büyüklük Doğrulama Faktörü.....	12
Tablo 4.2 Temsili Siklik Gerilme Sayıları.....	21
Tablo 4.3 Başlangıç Analizleri İçin Kullanılan C_r Değerleri.....	24
Tablo 4.4 Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı C_M	32
Tablo 4.5 Dane çapı dağılımı ve SPT N değerine göre sınıflama tahmini.....	42
Tablo 5.1 Yatay yer altı reaksiyon katsayısının indirgenme faktörü.....	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 4.1 Sıvılaşmaya neden olan siklik gerilme oranı ile $M=7.5$ büyüklüğündeki bir depremde temiz kumlarda $(N_1)_{60}$ değerleri arasındaki ilişki.....	11
Şekil 4.2 Sıvılaşmaya neden olan siklik gerilme oranı ile $M=7.5$ büyüklüğündeki depremde siltli kumlarda $(N_1)_{60}$ değeri arasındaki ilişki.....	13
Şekil 4.3 CPT temelli sıvılaşma eğrisi: (a) temeli SPT bilgileri ile korelasyona dayanan; (b) tecrübe ve teorik sonuçlar temelli sonuçlar.....	15
Şekil 4.4 Kesme dalga hızı ve pik yer ivmesinden (10 devinim) sıvılaşma potansiyeli hesabı tablosu.....	16
Şekil 4.5 Sıvılaşma potansiyeli hesabı.....	18
Şekil 4.6 Sıvılaşma analizinde çeşitli zemin profilleri için r_d değerlerinin sıralaması.....	20
Şekil 4.7 10 devinimde kumlu zeminlerde sıvılaşmaya eden olan gerilme şartları.....	22
Şekil 4.8 30 devinimde kumlarda sıvılaşmaya neden olan gerilme şartları.....	23
Şekil 4.9 Kumların penetrasyon direnci ile sıvılaşmaya neden olan gerilme oranının korelasyonu.....	26
Şekil 4.10 τ_{H}/σ_0 (düşey) ve farklı gerilme seviyelerine neden olan devinim sayıları (yatay) arasındaki ilişki.....	28
Şekil 4.11 Seed'in arazi sıvılaşma korelasyonu ile Çin sıvılaşma kriter temelli korelasyon arasındaki karşılaştırma.....	29
Şekil 4.12 Büyük ölçek testlerden elde edilen penetrasyon direnci ile kumun arazideki sıvılaşma davranışı arasındaki ilişki.....	30
Şekil 4.13 Sıvılaşmaya neden olan gerilme oranları ile $M=7.5$ büyüklüğündeki depremler için temiz ve siltli kumlar için ölçülen $N_1(60)$ değerleri arasındaki ilişki.....	33
Şekil 4.14 $M=7.5$ büyüklüğündeki depremlerde normalize edilmiş kesme dalga hızı ile sıvılaşmaya neden olan gerilme oranı arasındaki ilişki.....	34
Şekil 4.15 Sıvılaşma olasılığı olan zemin gradasyonları.....	36
Şekil 4.16 Eşdeğer N değeri hesaplaması için tablo (aralıksız çizgiler efektif düşey basınç ile SPT N değeri arasında aynı relatif sıklıktaki ilişkiyi göstermektedir).....	37
Şekil 4.17-a Eşdeğer ivme ve eşdeğer N değeri temelli sıvılaşma tahmini için zemin katmanı sınıflandırılması; gradasyonu A bölgesinde olan zemin katmanı için.....	39
Şekil 4.17-b Eşdeğer ivme ve eşdeğer N değeri temelli sıvılaşma tahmini için zemin katmanı sınıflandırılması; gradasyonu B_f ve B_c bölgesinde olan zemin katmanı için.....	40
Şekil 4.18 İnce daneleri temel alan kritik SPT N değeri için indirgeme faktörü (Yalnızca A gradasyon bölgesine giren zemin katmanları için).....	41
Şekil 5.1 Sıvılaşma olasılığı ve SPT N değeri.....	44
Şekil 5.2 İnce danelerle, düzeltilmiş N değeri ΔN arasındaki ilişki.....	47
Şekil 5.3 Doygun zemin kütleleri için sıvılaşma direnci oranı ve düzeltilmiş SPT N değeri N_a arasındaki ilişki.....	48

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının hasar görmesindeki başlıca nedenlerden biri deprem esnasında doymun kum yığınlarında meydana gelen sıvılaşma olayıdır. Sıvılaşma esnasında yüzeyde çamur kaynamaları, çatlaklardan su sızması ve yapılarda zemine batma olayları görülebilir. Suya doymun kumları eğer yüzey titreşimine maruz bırakırsak, sıkışmaya ve nihayet hacim azalmasına meyillidir; eğer suyun drenajı engellenirse hacim azalması boşluk suyu basıncının artmasına neden olacaktır. Eğer boşluk suyu basıncı o zeminin tarihi boyunca maruz kaldığı maksimum yükleme basıncına eşit olduğu anda, yani aşırı yükleme basıncına eşit olduğu zaman efektif gerilme sıfır olur ve sıvılaşma durumu meydana gelir. Zemin bütün kesme direncini yitirdiği zaman bir sıvı gibi davranır. Uygun şartlarla titreşim deformasyonlarının meydana geldiği her bölgede sıvılaşma durumu meydana gelir.

1.1 Amaç

Depremde doymun kumların sıvılaşma olayı mühendislik yapılarına zarar vermektedir. Sıvılaşma olgusu üzerinde birçok araştırma yapılmış ve bazı methodlar geliştirilmiştir.

Bu methodlar arasında en çok kullanılanlar; Seed tarafından önerilen basitleştirilmiş bir hesap metodu, Eurocode method ve SPT N değerlerini esas alan Japon methodu bulunmaktadır. Zeminin sismik davranışı QUAD4M adlı sınır eleman programı kullanılarak bulunmaktadır. Zemin özelliklerinin boyutsal değişkenliği otokorelasyon fonksiyonu ve spektoral sıkılaşma fonksiyonu kullanılarak elde edilir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1960'lerden beri süregelen araştırmalardan anlaşılıyor ki zemin sıvılaşmasını etkileyen bir dizi kritik faktör belirlenmiştir. Bunlar zemin özellikleri, jeolojik şartlar ve deprem hareketinin karakteristiğidir.

Sıvılaşma potansiyelini elde etmek için birkaç method geliştirilmiştir. Casagrande (1936) kumlu zeminler için sıvılaşma olgusunu yorumlamıştır. Bu çalışma sıvılaşma olgusuna yönelik ilk çalışmadır. Casagrande kumlu zeminlerin sismik etkilere maruz kaldıkları zaman kritik boşluk oranından daha büyük boşluk oranına sahip iseler hacimde azalmaya meyilli olduklarını açıklamıştır. Casagrande'ye göre kritik boşluk oranı kesmeye maruz kaldığında hacim değişiminin olmadığı boşluk oranıdır. Bununla beraber boşluk oranı yaklaşımı sıvılaşma hesapları için uygun olmayabilir. Daha ileri çalışmalar sıvılaşmayı etkileyen başka faktörlerde olduğunu göstermiştir.

Varolan sıvılaşma hesap yöntemlerini iki ana gruba ayırabiliriz. İlk grubun temeli deprem esnasında ya da laboratuvarda (Seed ve Idriss 1971) sıvılaşmaya maruz temsili numunenin üzerinde meydana gelen sıvılaşma ile gözlenen siklik gerilmedir. İkinci grubun temeli ise uygulanan ampirik arazi deneyleridir (Seed ve Idriss 1983, Robertson ve Campanella 1985).

Seed ve Idriss standart penetrasyon deneyinden elde ettikleri bilgilerle sıvılaşma potansiyeli hakkında hesaplamaları mümkün kılan bir çalışma yayınlamışlardır. 7,5 büyüklüğündeki bir depremde daha önce sıvılaşma olayı görülmüş veya görülmemiş alanlarda arazi özellikleri sunulmuş ve bu deprem büyüklüklerine göre değerlendirilmiştir. Silt içeriği ile ilgili basit bir yaklaşım önerilmiştir. Method kumlu ve siltli zeminlerde boşluk suyu basıncının muhtemel büyüklükleri hakkında bilgi vermektedir.

Stark ve Olson konik penetrasyon deneyinden elde edilen uç direnci ile sıvılaşma potansiyeli arasında bir ilişki kurmuşlardır. CPT deneyinin daha önce yapıldığı alanlarda deprem neticesinde sıvılaşma durumu gözlenmiş ve gözlenmemiş 180 durum değerlendirmesi yapmışlardır. Bu bilgileri kullanarak CPT temelli bir skala geliştirmişlerdir. Aynı zamanda sıvılaşma durumu hakkında fikir veren SPT düşme sayısı ile CPT uç direnci arasında bir çevirim tablosuda oluşturmuşlardır. Kesin

olmamakla beraber sıvılaşma potansiyeli hakkında bilgi veren 7,5 büyüklüğündeki depremi görmüş 18 sıvılaşmış ve sıvılaşmamış arazi zemini ile temiz çakıl ve siltli çakıl hakkında yayın yapmışlardır.

Japon standartları SPT düşüş sayısı ve gradasyon temelli methodlar benimsemişlerdir (Port ve Harbour, 1997). Bu methodların temeli SPT düşüş değerleri ve gradasyon ile depremin tetiklediği üzerindeki efektif gerilmeler ile birlikte oluşan kesme gerilmelerinin kıyaslanmasıdır. Eğer kesme gerilmesi sıvılaşma direncini aşarsa sıvılaşma olabilir; eğer aşmamışsa sıvılaşma olmaz denilebilir. Bu method Japonya'nın iyileştirilmiş zeminlerde ve limanlarda çeyrek yüzyıldır gözlemlediği sıvılaşma olaylarının sonucunda geliştirilmiştir. Bu metodun uygulanabilirliği birçok sıvılaşma olayıyla gerçellenmiştir.

Christian ve Swiger sıvılaşma tahminleri için istatistiksel yaklaşımlar kullanmışlardır (Christian ve Swiger 1976). Gerçek depremlerden elde edilen verileri istatistiki olarak analiz etmişler ve malzemelerin grafiğini çizerek bir çizgi ile malzeme grafiğini sıvılaşma olabilecek ve olamayacak bölgelere ayırmışlardır. Sonuçları grafik formunda yayınlamışlardır.

Popescu ve arkadaşları doymuş zeminlerde sismik hareketin oluşturduğu davranış şekillerini zemin özelliklerinin üç boyutlu dağılımına göre incelemişlerdir. Monte Carlo simülasyon methodunu dinamik, non-lineer sınır elemanları analiziyle kullanmışlardır. Sıvılaşma potansiyelinin zeminin üç boyutlu çeşitliliğine özgü olarak etkilendiğini bulmuşlardır. Aynı zamanda sismik frekans ve sıvılaşma derecesini içeren parametrik çalışmalarda gerçekleştirmişlerdir. Sismik dizaynda zemin direncinin karakteristik yüzde değerlerini daha pahalı olan Monte Carlo simülasyon modeline göre sunarak daha ucuz bir çözüm bulmuşlardır. Zemin yığınının tipine göre analiz sonucu bulunan zemin direncinin %80'inin dizaynda kullanılmasını önermektedir. Bu çalışmaların sonucu olarak sismik olay neticesinde oluşan boşluk suyu basıncı artışının zeminin üç boyutlu çeşitliliğine göre ne kadar değiştiğini anlıyoruz.

Fenton ve Vanmarcke, sıvılaşmanın zemin içerisinde dağılımını hesaplamak için rasgele arazi teorisi methodunu ve temel konseptlerini kullanmışlardır (Fenton ve Vanmarcke, 1998). Zemini laboratuvar ortamında deprem hareketine maruz bırakarak zemin numunesinin üç boyutlu rasgele saha özelliklerini taşıdığını göstermişlerdir. Sıvılaşmanın boyutsal çeşitliliğini hesaplamışlar ve sıvılaşma riskini hesaplama

tekniklerini geliştirmişlerdir. Zemin sıvılaşmasının boyutsal değışkenliğinin zeminin depremden nasıl etkilendiğine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Uzaysal rasgele yaklaşım sıvılaşmanın bölgesel hesabını mümkün kılmıştır. Aynı zamanda çalışmalarının en önemli noktası tek bir noktadan yola çıkılarak yapılan sıvılaşma tahminine asla itimat edilmemesi gerektiğidir. Onlara göre hesaplamalarda farklı noktalardan alınan numuneler ayrı ayrı değeriendirilip dinamik modellemelerde kullanılmalıdır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Sıvılaşma Teorisi

Doygun kumlu zeminlerin boşluk suyu basıncının yükselmesine mukabil efektif gerilmesinin azalması ve kesme direncini kaybetmesiyle sıvılaşma durumu meydana gelir. Kumun direnci içsel sürtünme açısına bağlı olarak:

$$\tau = (\sigma_n - u) \tan \phi \quad (\text{Doygun durum}) \quad (3.1)$$

τ = Kesme Direnci, $\sigma_n = z (\gamma_{\text{doy}} \times z)$ derinliğindeki toplam aşırı yükleme basıncı, u = Boşluk suyu basıncı ($\gamma_w \times z$), ϕ = İçsel sürtünme açısı. Yukarıdaki eşitlik sadeleştirilirse;

$$\tau = \gamma_b z \tan \phi \quad (3.2)$$

γ_b = Zeminin su altındaki birim hacim ağırlığı.

Gevşek kumlu zeminler titreşime maruz kaldıklarında hacim azalmasına ve sıkışmaya meyillidirler. Eğer drenaj olmuyorsa boşluk suyu basıncı artar. Eğer boşluk suyu basıncındaki artış ($+\Delta u = \gamma_w h_w$) miktarında olursa kayma direnci;

$$\tau = (\gamma_b z - \gamma_w h_w) \tan \phi \quad (3.3)$$

görüldüyorki boşluk suyu basıncının artışı kayma direncini azaltmaktadır. Eğer kabul edilebilir boşluk suyu basıncı aşırı yükleme basıncına eşit duruma gelirse bu durum direncin kaybına neden olur.

Direncin kaybolması daneler arasında taşınan gerilmenin boşluk suyuna transferiyle gerçekleşir. Eğer yükün tamamı boşluk suyuna aktarılırsa direnç sıfırlanır. Bununla beraber eğer direnç kaybı kısmide olabilir. Siklik direnç şartlarında anlık efektif gerilmenin boşluk suyuna aktarımı sıkı kumlar için problem olmaktan ziyade

taşıma kapasitesi için faydalıdır. Efektif gerilmenin tamamının boşluk suyuna geçmesi bazen süreklilik arzeder, bu durumda zemin viskoz bir sıvı gibi davranmaktadır. Sıvılaşmanın etkileri bu durumda açıkça görülebilir. Eğer direnç transferi kısmi olursa sıvılaşmanın etkileri zemin içinde ortaya çıkar yüzeyde görülmez. Sıkışan basıncın azalmasıyla gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalır. Bu durum sıkı kumlarda da aynı şekilde olur ve efektif gerilmenin azalması rijitlikte azalma ve şekil değiştirmede artış anlamına gelmektedir. Zemin sıvılaşmaya maruz kaldığında viskoz bir sıvı gibi davranır. Bu zeminler üzerine dayanan yapılarda zemine batarlar. Sıvılaşma olayı olur olmaz yüzeyin deformasyonu ile konsolidasyon başlar ve daneler birbirine daha yakınlaşır. Bu esnada boşluk suyu basıncı düşer ve su zeminde yalnızca yukarı doğru hareket eder. Yukarı doğru akış neticesinde kılcal su çıkışları meydana gelir ve başta sıvılaşma olmamış zemin tabakalarında sıvılaşma olayı meydana gelebilir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Sıvılaşma Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Sıvılaşmayı etkileyen üç temel kategori vardır; zemin özellikleri, geoteknik şartlar ve yer hareketleri (Prakash, 1981). Bu faktörler;

1. Kumun dane çapı dağılımı: Sıvılaşma direnci kumun dane birim hacim ağırlığına göre değişir. Kaba kumların geçirgenliği ince kumlara göre daha fazladır. Titreşim neticesinde meydana gelen boşluk suyu basıncı iri daneli zeminlerde kolaylıkla düşmektedir. Bundan dolayı kaba daneli kum zeminlerin sıvılaşmaya olan meyili azalmaktadır. Aynı zamanda iyi derecelenmiş zeminlere nazaran üniform zeminler sıvılaşmaya daha çok meyillidir.

2. Başlangıç relatif sıkılığı: Başlangıç relatif sıkılığın fazla olması oturma ve boşluk suyu basıncının daha az değerlerde olmasına neden olur. Gerilme-Şekil değiştirme eğrisinin eğimi sıkı kumlara göre gevşek kumlarda daha azdır. Bunun anlamı daha az başlangıç relatif sıkılığına maruz zeminler daha sıkı zeminlere göre daha fazla oturma ve daha fazla zorlanma gösterirler. Böylece sıvılaşma ve oturma relatif sıkılıkla ters orantılı olarak değişir.

3. Titreşim karakteristikleri: Sıvılaşma ve oturma dinamik yükün doğasına, büyüklüğüne ve tipine bağlıdır. Kuru kumlarda yatay titreşimler dikey titreşimlere nazaran daha büyük oturmalarla neden olmaktadır (Prakash, 1967). Yapıların sıvılaşma sonucu hasar görmesi sıvılaşma durumuna ne kadar maruz kaldığıyla ilgilidir. İri kumlarda, yüksek permeabilite katsayılı, sıvılaşma süresi ince kumlara göre daha kısadır. Çok yönlü sarsıntılar tek yönlü sarsıntılara göre daha yıkıcıdır. (Seed, 1976) çok yönlü gerilme ve ya sarsıntı şartlarında boşluk suyu basıncı tek yönlü sarsıntıya göre daha hızlı yükselmektedir. Pik boşluk suyu basıncı için gerekli gerilme değeri çok yönlü sarsıntıda tek yönlü sarsıntıya göre %10 daha azdır.

4. Yığın boyutları ve drenaj bölgesi: Eğer kum yığınları büyük boyutlarda olursa drenaj yolu artabilir ve yığın drenaja müsait olmayabilir. Bundan dolayı böyle zeminlerin sıvılaşma riski artar. Drenaj yolu dren kanalları uygulanarak azaltılabilir. (Seed, 1979) potansiyel sıvılaşabilir kum yığınları için çakıl drenlerin dizaynı için analitik bir prosedür önermiştir. Bu drenler yapıldığı malzemenin içine konulduğu zeminden en az 200 kat daha permeabil olmalı ki tamamen etkili olabilsin.

5. Uygulanan yüklerin doğası ve büyüklüğü: Büyük ölçülerdeki başlangıç efektif gerilmesini danelere aktarmak için büyük yoğunlukta titreşim ve ya tekrarlı titreşim gereklidir. Bu yüzden başlangıç efektif gerilmesinin yüksek oluşu sıvılaşma riskini azaltmaktadır. Eğer gerilme şartları izotropik değilse sıvılaşma K_0 serbest zemin gerilme katsayısına bağlı olarak gelişebilir. K_0 5'den büyük olursa, sıvılaşma olayını başlatacak gerilme değerleri %50 kadar artar (Seed, 1979). Bunların sonucu olarak diyebiliriz ki üç eksenli basınç deneyi sonuçları arazi şartlarını tam olarak simüle edememekle beraber dikkate değer sonuçlarda vermektedir.

6. Zemin formasyon methodu: Araştırmalar gösteriyorki zemin numunesinin hazırlanması ve zemin şekli sıvılaşma olayını büyük ölçüde etkilemektedir. (Seed, 1979), aynı zemin dane yapısına ve yoğunluğuna sahip farklı kum numunelerinin aynı tekrarlı yükler altında deneye tabi tuttuğunda sıvılaşma için gerekli gerilme miktarının %200 kadar değiştiğini göstermiştir. Bu değişimin nedeni numune alma tekniğidir. Bundan dolayı zemin numunesi zeminin arazi şartlarını tam olarak yansıtmalıdır.

7. Sabit yükleme altında periot: Kum yığınının yaşı onun sıvılaşma karakteristiğini etkileyebilir. Örselenmemiş zemin numunesi ve taze hazırlanmış bir zemin numunesi arasında sıvılaşma testinde gerekli gerilme değeri %75 oranında

artmaktadır. Bunun nedeni ikincil yüklemenin zemin geçmişine daha önceden benzer yüklemeler olduğundan dolayı zemini fazla etkilememesi ve zemin danelerinin çimentolaşmasıdır.

8. Önceki yük geçmişi: Zemin yığını daha önce birkaç depreme maruz kalmışsa sıvılaşma için gerekli gerilme değeri değişir. (Seed, 1979), bu değişimin 1.5 kat civarında olduğunu göstermiştir. Bu durum zeminin aynı yoğunluğa sahip olması ile geçerlidir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Sıvılaşma Direncinin Laboratuvar ve Arazi şartlarında Karakteristikleri

4.1.1 Laboratuvar Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Laboratuvar test sonuçları göstermiştir ki sıvılaşma olayının oluşması için siklik yüklemelerin belli bir değeri gereklidir N_L ; kesme kuvveti artışıyla ve sıklığın azalmasıyla azalır. Büyük siklik gerilmelere maruz zayıf bir numune birkaç titreşimden sonra sıvılaşmaya uğrarken, sıkı zeminlerin sıvılaşmaya maruz kalması için binlerce titreşim gerekli olabilir. Siklik gerilme büyüklüğü, sıvılaşma çatlaklarının sayısı ve sıklık arasındaki ilişki grafik olarak laboratuvar siklik gerilme eğrisiyle açıklanabilir. Siklik gerilme eğrisi, başlangıç efektif aşırı yükleme basıncı ile normalize edilerek siklik gerilme oranı (CSR) elde edilir. CSR basit siklik kesme testinde siklik kayma direnci olarak da alınabilir $[(CSR)_{ss} = \tau_{cyc}/\sigma_{vo}']$. Aynı zamanda bu değer siklik üç eksenli basınç deneyinde siklik kayma direnci değeri olarak da alınabilir $[(CSR)_{tx} = \sigma_{dc}/2\sigma_{3c}']$. Siklik basit kesme ve üç eksenli basınç deneyinde gerilme oranları eşit değildir. Sıvılaşma testi için iki değer arasında şu geçiş değeri vardır. C_r = doğrulama faktörü.

$$(CSR)_{ss} = C_r(CSR)_{tx} \quad (4.1)$$

Siklik basit kesme ve siklik üç eksenli testin birbiriyle kıyaslanmasının nedeni depremin çok yönlü kesme gerilmesi oluşturmamasından dolayıdır. (Seed, 1979), gerçek zeminde sıvılaşmanın oluşması için gerekli CSR değeri laboratuvar deneyiyle elde edilen tek doğrultulu siklik basit kesme testinden % 10 daha azdır. Sonuç itibarı ile bir zeminin sıvılaşma direnci siklik gerilme oranı ile şu şekilde tarif edilebilir.

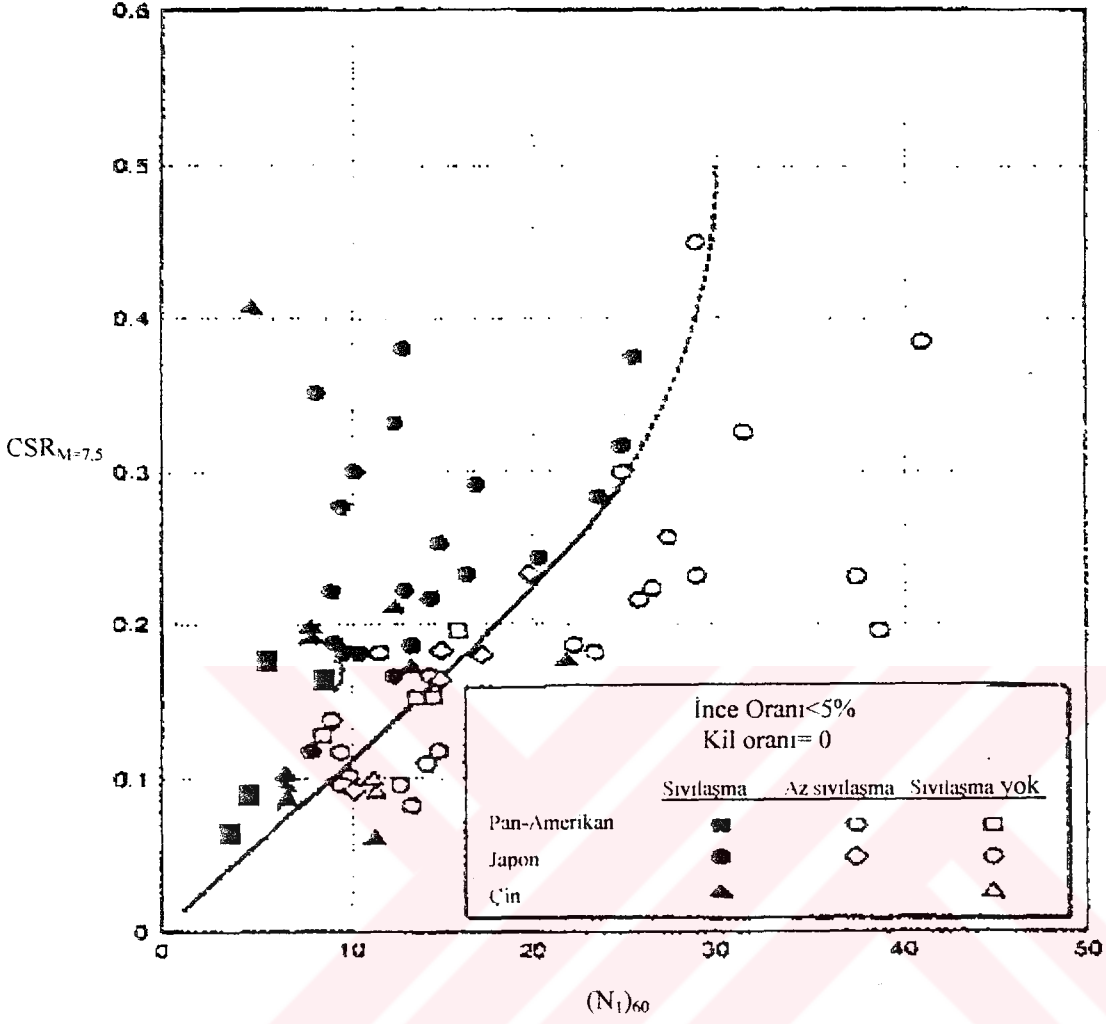
$$(CSR)_{saha} = \tau_{cyc}/\sigma_{vo}' = 0.9(CSR)_{ss} = 0.9C_r(CSR)_{tx} \quad (4.2)$$

4.1.2 Arazi Test Sonuçlarının Kullanımı

Sıvılaşma direncinin karakteristiği ile ilgili en çok kullanılan arazi deneylerinden biri SPT deneyidir. SPT bir zeminin tanımlama, ince danelerin oranı gibi birçok özelliğin elde edilmesi için numune almada kullanılmaktadır. Aynı zamanda diğer zemin deneylerine göre en fazla gerçek durumlarla karşılaştırma imkanı bulunan deneydir. Fakat CPT deneyi sıvılaşma direnci tahmini için daha sık kullanılan deney olmaya başlamıştır. CPT, SPT deneyine nazaran daha ucuz ve daha hızlı sonuçlar vermektedir ve devamlı batma direnci kaydı verir (Sıvılaşma potansiyeli olan ince katmanlı zeminlerde önemlidir). CPT temelli sıvılaşma direnci dane çapı karakteristiği, tamamlayıcı sondaj numuneleri ile birlikte daha etkili kullanılabilir.

4.1.2.1 Standart Penetrasyon Direnci

Sıvılaşma direncini arttıran faktörler (sıkılık, ilk sismik gerilme, over-konsolidasyon oranı, yanal zemin basıncı ve yük geçmişi gibi) SPT uç direncini de artırır. (Seed ve ark. 1983) temiz kum (Şekil 4.1) ve siltli kumun (Şekil 4.2) düzeltilmiş SPT uç direnci ve siklik gerilme oranı arasındaki farkı karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmayı yaptığı zeminler $M=7.5$ büyüklüğündeki depreme maruz kalmış ve sıvılaşma olayı gözlenmiş veya gözlenmemiş temiz kumlu zeminlerdir. Bu zeminlerin SPT uç direnci ile sıvılaşma olayının umulduğu minimum siklik gerilme oranını karşılaştırarak aşağıdaki şekilleri çıkarmıştır. İnce danelerin bulunuşu SPT direncini etkileyebilir, böylece sıvılaşma direnci hesaplanırken dikkate alınmalıdır. Yüksek oranda ince dane içeriyorsa, zemin sıvılaşmaya karşı daha mukavim olmaktadır. Aynı zamanda ince danelerin plastisitesi sıvılaşma direncini etkiler; plastik danelerin adezyonu bağımsız daneleri bir arada tutarak birbirlerine göre zemin danelerinin hareketini zorlaştırır. Böylece zeminin boşluk suyu basıncının deprem esnasında artışının azalmasına sebep olur.



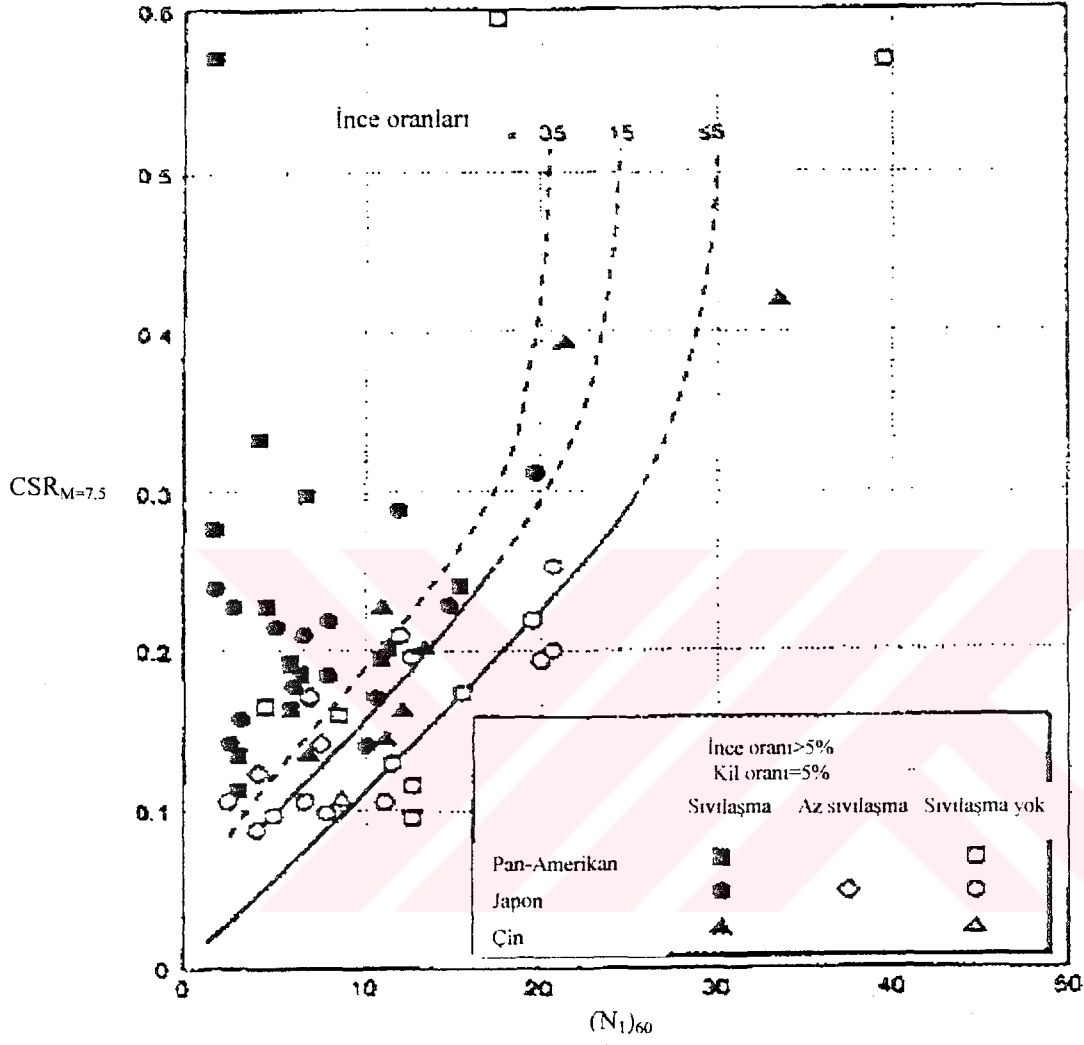
Şekil 4.1 Sivilaşmaya neden olan sıklık gerilme oranı ile $M=7,5$ büyüklüğündeki deprem için temiz kumlarda $(N_1)_{60}$ değeri arasındaki ilişki.

Depremin büyüklüğü ile birlikte artan depremin etkili hareket süresi, sivilaşmanın oluşması için gerekli sıklık gerilme oranını azaltır. Minimum sıklık gerilme oranının diğer deprem büyüklüklerine göre değişimi $M=7,5$ büyüklüğü esas alınarak Tablo 4.1’de değişim faktörleri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 4.1 Siklik gerilme yaklaşımları için büyüklük doğrulama faktörü.

Büyüklik, M	$CSR_M / CSR_{M=7.5}$
5,25	1,50
6	1,32
6,75	1,13
7,5	1,00
8,5	0,89





Şekil 4.2 Sıvılaşmaya neden olan sıklık gerilme oranı ile $M=7,5$ büyüklüğündeki depremde siltli kumlarda $(N_1)_{60}$ değeri arasındaki ilişki.

Şekil 4.1 ve 4.2'deki bilgiler sıg yığınlı sıvılaşabilir zeminlerden elde edilmiştir.

4.1.2.2 Konik Penetrasyon Direnci

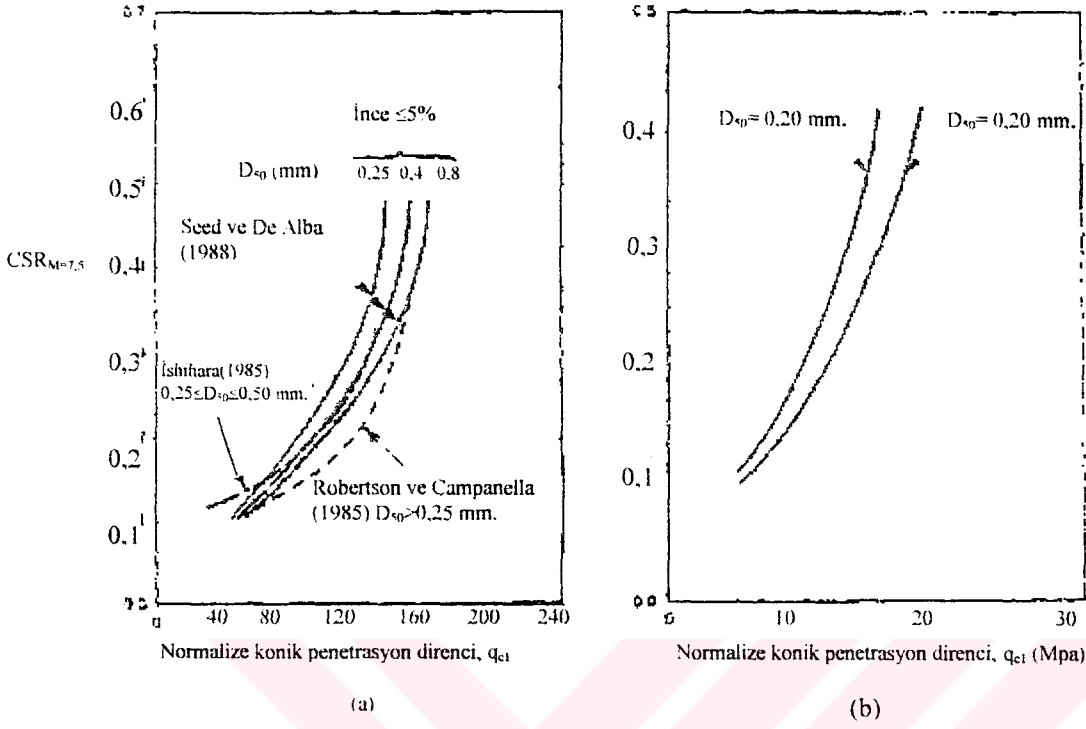
CPT uç direnci aynı zamanda sıvılaşma olgusunun bir ölçüsü olarak da kullanılabilir. Teorik olarak elde edilmiş CPT direnç değerleri ile laboratuvar testlerine dayalı bir eğri geliştirmişlerdir. (Şekil 4.3 a-b). CPT temelli sıvılaşma hesaplarında, uç direnci standart efektif aşırı yükleme basıncı ile normalize edilir. σ_{vo} ton/ft² olmak kaydıyla 1 ton/ft²= 96 kPa'dır.

$$q_{cl} = q_c \left[\frac{P_a}{\sigma_{vo}} \right]^{0.5} \quad (4.3)$$

veya

$$q_{cl} = q_c \left[\frac{1.8}{0.8 + \sigma_{vo}} \right] \quad (4.4)$$

M=7,5 büyüklüğü dışındaki depremler için Tablo 4.1'de verilen CSR çevirim değerleri kullanılabilir.



Şekil 4.3 CPT temelli sıvılaşma eğrisi: (a) temeli SPT bilgileri ile korelasyona dayanan; (b) tecrübe ve teorik sonuçlar temelli sonuçlar.

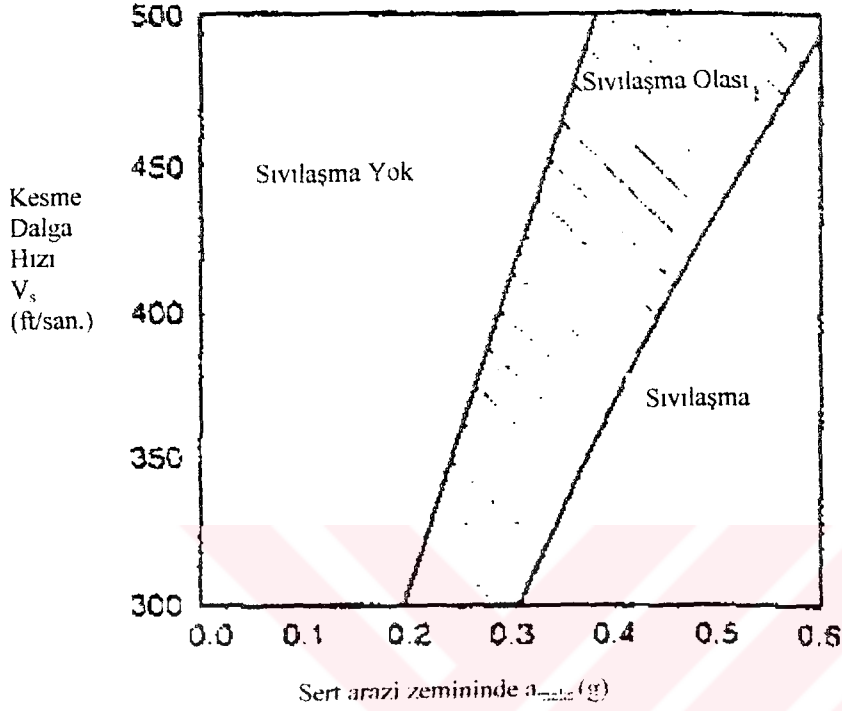
4.1.2.3 Kesme Dalga Hızı

Geliştirilen arazi deneyleri ile kesme dalga hızının sıvılaşma direnci tahmininde siklik gerilme yaklaşımına göre önemli bir ölçek olduğu anlaşılmıştır. Hesaplanan kesme dalga hızları standart efektif aşırı yükleme basıncıyla $1 \text{ ton/ft}^2 = 96 \text{ kPa}$ normalize edilebilir.

$$V_{sl} = V_s (\sigma_{v0}')^{-1/n} \quad (4.5)$$

σ_{v0}' ton/ft², n ise 3 veya 4. Siklik gerilme yaklaşımı ve eşit doğrusal karşılık analizlerini kullanarak tepe yer yüzey hızı ve kesme dalga hızı arasında bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 4.4). Kumların kesme dalga hızının sıvılaşma hesabında tek başına kullanılmadan başka faktörlerle (zemin yapısı, over-konsolidasyon oranı, başlangıç

sıklık gerilme gibi) birlikte değerlendirerek sıvılaşma direncinin hesaplanması gerekliliği tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.4 Kesme dalga hızı ve pik yer ivmesinden (10 devrim) sıvılaşma potansiyeli hesabı tablosu .

4.1.2.4 Dilatometre Gösterge:

Dilatometre testi (DMT) horizontal gerilme indeksiyle sıvılaşma potansiyeli korelasyonları için önermeler de mevcuttur .

4.2 Sıvılaşma Tahmini Methodları

4.2.1 Seed ve İdriss Tarafından Önerilen Genel Method

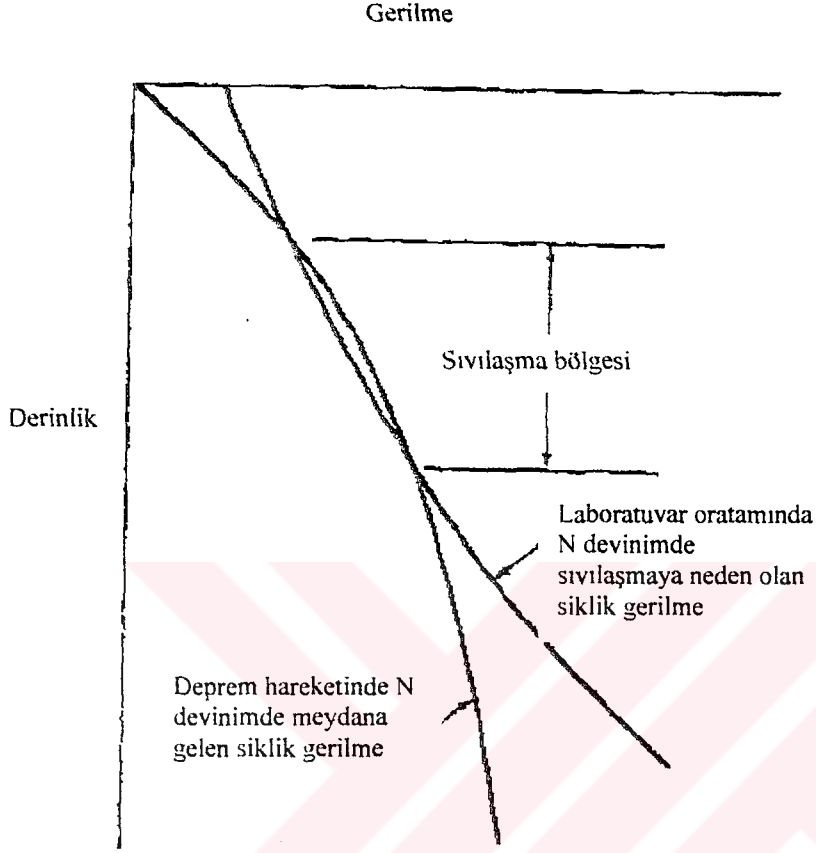
(Seed ve İdriss 1983) sıvılaşma potansiyel hesabı için aşağıda adımları belirtilen genel bir method önermişlerdir.

1. Deprem dizaynı yaptıktan ve zemin şartlarını belirledikten sonra, yığın içerisinde depremlerden kaynaklı kayma gerilme geçmişinin belirlenmesi gerekmektedir.

2. Deprem esnasında çeşitli sıklık gerilmelerden etkilenecek oluşan gerilme seviyeleri ile gerilme geçmişinin eşit sayıda üniform sıklık gerilmeye çevrilmesiyle derinliğe göre değişen bir grafik çizilir (Şekil 4.5).

3. Mevcut arazi bilgileri ve temsili numune üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri arasında kıyaslama yapılarak, çeşitli sınırlanmış basınçlar altında, özel bir deprem büyüklüğünde çeşitli derinliklerde aynı sayıda sıklık gerilme altında sıvılaşmaya neden olacak sıklık kayma gerilmesi hesaplanır.

4. Sıvılaşmaya neden olacak kayma gerilmesi ile deprem esnasında oluşacak kayma gerilmesi karşılaştırılarak, zemin içerisinde sıvılaşma meydana gelebilecek yerler tespit edilir.



Şekil 4.5 Sıvılaşma potansiyeli hesabı.

Aşağıda yalnızca dört faktör içeren basit bir method tarif edilmiştir. Bunlar zemin tipi, relatif sıklık ve ya boşluk oranı, başlangıç boşluk basıncı, duyarlılık ve yer sarsıntısının süresi. Diğer faktörleri hesaplamak için, (Seed 1976) çevirme katsayıları gibi çoklu faktörler önermiştir. Bu basit method şu adımları içermektedir.

1. Yığındaki maksimum kayma gerilmesinin hesaplanması:

Deprem esnasında kesme dalgalarının yukarı doğru yayılması esnasında zeminin her noktasında kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Zemin yığını eğer h derinliğinde rijit davranan bir zemin elemanı üzerinde ise ve maksimum yer yüzey ivmesi a_{max} ise maksimum kayma gerilmesi şöyle olabilir;

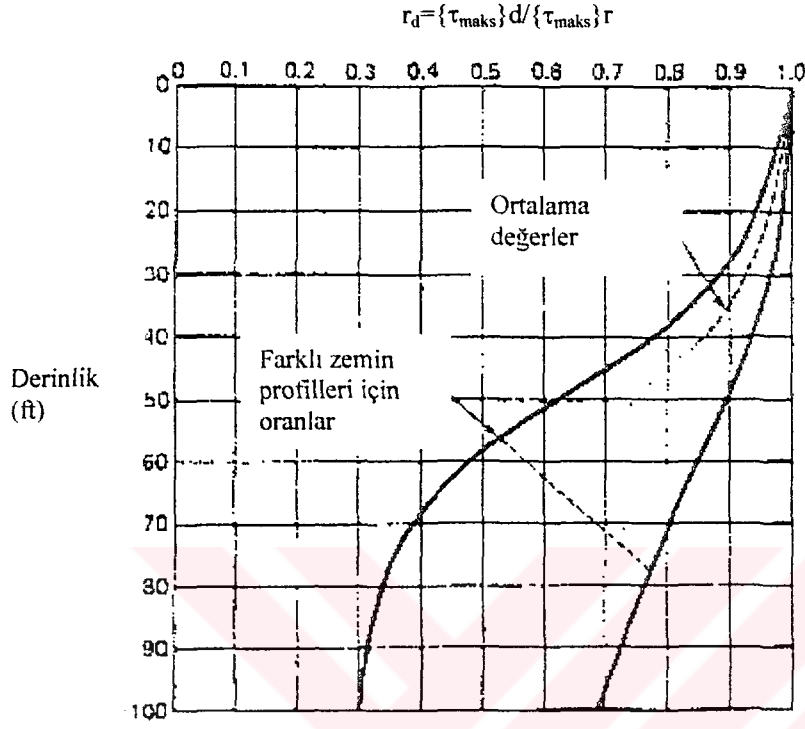
$$(\tau_{\text{maks}})_r = \frac{\gamma h}{g} a_{\text{maks}} \quad (4.6)$$

γ = Zeminin toplam birim hacim ağırlığı. Yığın deforme olabileceğinden dolayı, h derinliğindeki asıl kayma gerilmesi, $(\tau_{\text{maks}})_d$, yer tepki analizlerinden elde edildiği gibi, $(\tau_{\text{maks}})_r$ ile birden küçük bir katsayı olan r_d 'nin çarpılması ile de bulunabilir:

$$(\tau_{\text{maks}})_d = r_d (\tau_{\text{maks}})_r \quad (4.7)$$

50 ft.'den daha derin kum içeren zemin yığınları için değişik zemin şartları ve deprem hareketlerinde r_d değeri Şekil 4.6 'deki gibi bulunabilir. 40 ft. Derinliğindeki bir zeminde ortalama kesinlikte maksimum kayma gerilmesini tespit etmek için r_d değeri Şekil 4.6'den alınmak kaydıyla,

$$(\tau_{\text{maks}})_r = \frac{\gamma h}{g} a_{\text{maks}} r_d \quad (4.8)$$



Şekil 4.6 Sıvılaşma analizinde çeşitli zemin profilleri için r_d değerlerinin sıralaması.

2. N_c sıklık gerilmelerin eşdeğer sayılarının elde edilmesi:

Zemin yığını içerisinde deprem esnasında oluşan kayma gerilmelerinin geçmişinden, eşit üniform ortalama bir kayma gerilmesi değeri belirlenmesi gerekmektedir. Ortalama bir kesinlikte bulunmuştur ki, eşit, üniform, ortalama kayma gerilmesi τ_{av} maksimum kayma gerilmesinin %65'idir. Sonuç itibarı ile;

$$\tau_{av} \cong 0,65 \times \frac{\gamma h}{g} a_{maks} \times r_d \quad (4.9)$$

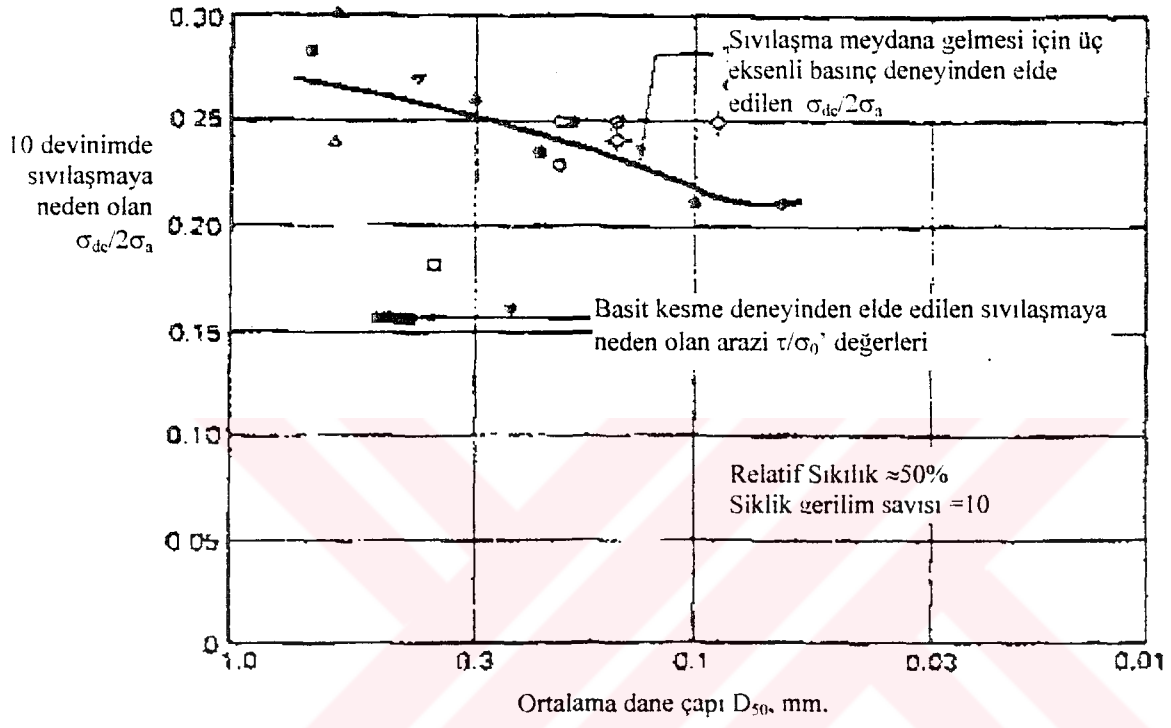
Deprem büyüklüğüne bağlı olarak yerin sallanma süresi N_c uygun sayıda kayda değer derecede siklik gerilme sayısını değiştirir. Bu değişim ile ilgili temsili olarak Tablo 4.2 gösterilmiştir:

Tablo 4.2 Temsili siklik gerilme sayıları

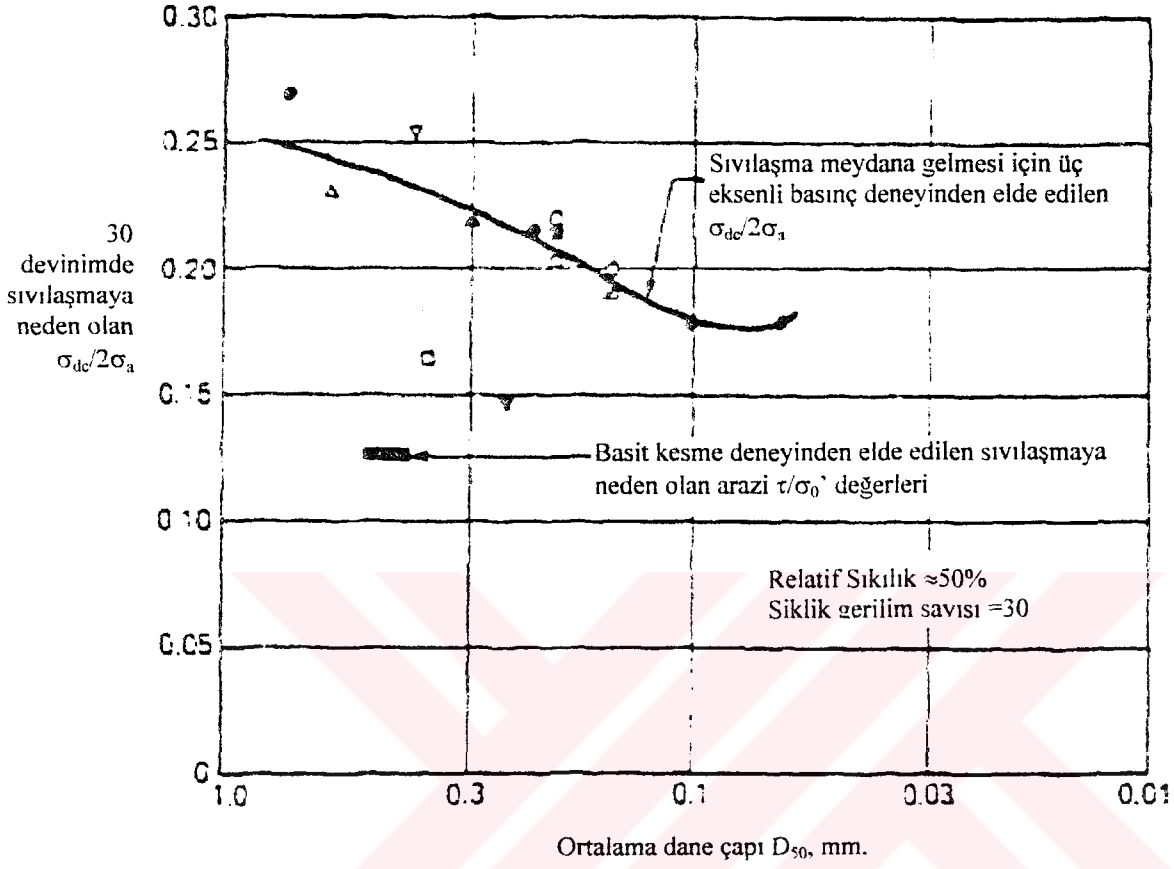
Deprem büyüklüğü	Kayda değer siklik gerilme sayısı N_c
7	10
7,5	20
8	30

3. Sıvılaşmaya neden olan gerilmelerin tayini:

Devinimli üç eksenli ve ya basit kesme aparatları ile, deprem büyüklüğüne göre değişen, verilen siklik hareketlere göre sıvılaşmaya neden olan gerilmeler hesaplanabilir. Farklı dane çaplarında yapılan üç eksenli basınç deneyleriyle, D_{50} ortalama çap ile relatif sıklığı %50 olan zemini Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu testlerin sonuçları şu terimlerle açıklanır: 10 ve 30 devinimde, sıvılaşmaya neden olan oran $\sigma_{dc}/2\sigma_a$ ’dır. σ_{dc} , siklik gerilim farkı ve σ_a , konsolide olmuş zeminde başlangıç hava basıncıdır. Sıvılaşmaya neden olan kayma gerilmesi yaklaşık olarak relatif sıklıkla orantılıdır.



Şekil 4.7 10 devrimde kumlu zeminlerde sıvılaşmaya neden olan gerilme şartları.



Şekil 4.8 30 devrimde kumlarda sıvılaşmaya neden olan gerilme şartları.

Arazi şartlarında sıvılaşmaya neden olan gerilme oranı τ/σ_0' ve $\sigma_{dc}/2\sigma_a$ şu şekilde ilişkilendirilir;

$$\left[\frac{\tau}{\sigma_0'} \right]_I = \left[\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a} \right]_I \quad c_r \quad (4.10)$$

Üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen değerleri arazide sıvılaşmaya neden olacak gerilme değerlerine c_r katsayısı ile çevrilir. D_r relatif sıkılığında verilen bir zeminin sıvılaşmaya neden olan gerilme oranının hesaplanmasında şu formül kullanılır;

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_o'} \right) = \left(\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a} \right) c_r \frac{D_r}{50} \quad (4.11)$$

D_r , relatif sıkılık, 50 ise %50'sini temsil etmektedir. Başlangıç analizleri için Tablo 4.3'deki c_r değerleri kullanılabilir.

Tablo 4.3 Başlangıç analizleri için kullanılan c_r değerleri

Relatif Sıkılık D_r (%)	Düzeltilme Faktörü c_r
0-50	0,57
60	0,60
80	0,68

4. Sıvılaşma potansiyelinin hesabı:

Bir yığının sıvılaşma potansiyelinin hesabı için, derinliğine göre deprem esnasında oluşan kayma gerilmelerinin derinliğe göre sıvılaşma oluşturacak biçimde uygun büyüklükte olup olmadığına karar vermek gereklidir. Su seviyesinin 0 ila 10 ft. Arasında olması durumunda kritik derinlik 20 ft. civarındadır. Su seviyesi derinliğinin 15 ft. olduğu durumlarda kritik derinlik 30 ft. olmaktadır.

4.2.2 Standart Penetrasyon Bilgileri ile Sıvılaşma Analizi Yapılması

Sıvılaşmanın meydana geldiği veya gelmediği zeminlerde zemin davranışları ile standart penetrasyon testi ve benzer deneyleri başka araştırmacılarda araştırmıştır. (Seed, 1976) çeşitli bölgelerin arazi şartlarını barındıran, sıvılaşmanın daha önce meydana geldiğine veya gelmediğine dair kanıtlar bulunduran, geniş kapsamlı zemin

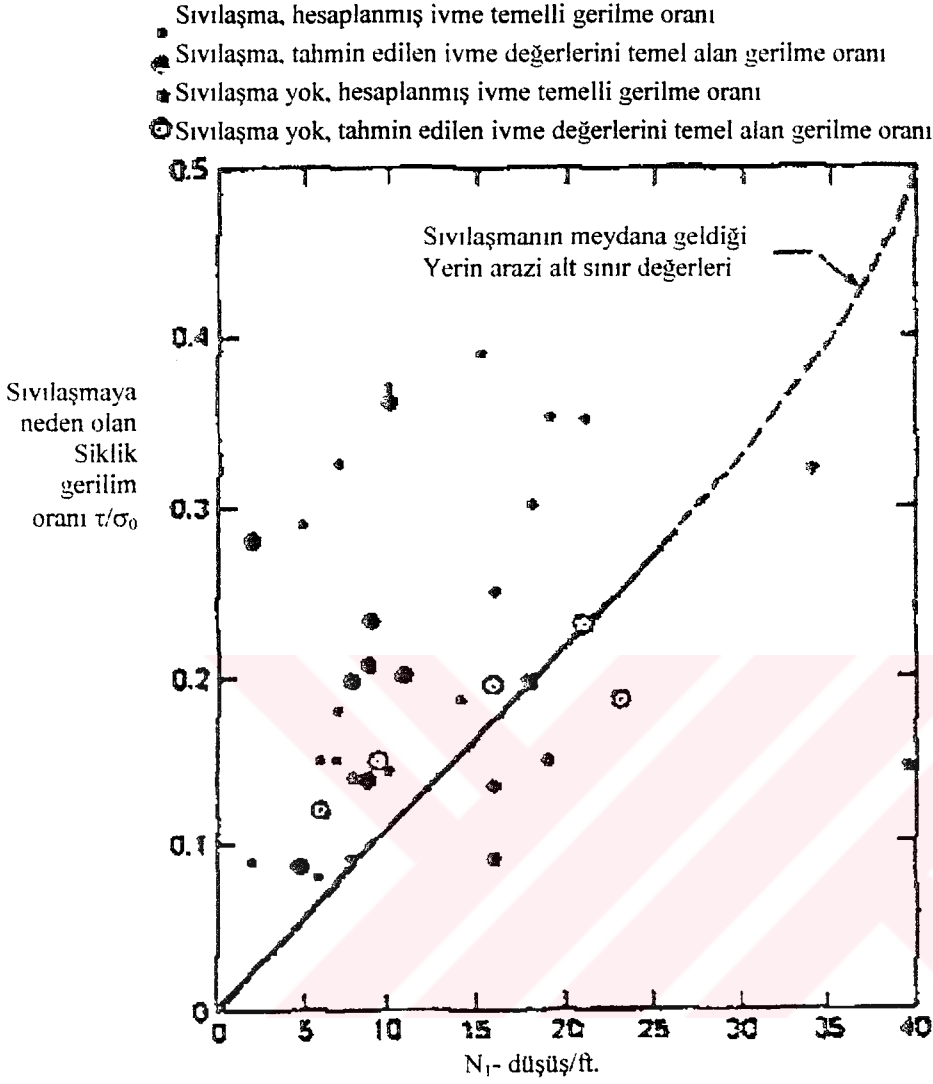
örneklerinin sunulduğu bir yayın çıkarmıştır. Bu bölgelerde siklik gerilme oranlarının arazi değerlerinin ilişkisini belirlemek için, onlar τ_h/σ_o' (τ_h = Deprem esnasında meydana gelen ortalama kayma gerilmesi, σ_o' = Etkilenen zemin bölgesinin başlangıç efektif aşırı yükleme basıncıdır) ve kumun relatif sıkılığını kullanmışlardır. Bu bilgiler Şekil 4.9'de gösterilmiştir. Kum yığınlarının düzeltilmiş ortalama penetrasyon direnci N_1 , sıvılaşmanın olduğu veya olmadığı ile ilgili deliller bulunan zeminlerin bilinen gerilme oranları değeri ile birlikte bir fonksiyon şeklinde çizilir. Temsilin bu formunda, N ölçülü penetrasyon direnci, efektif aşırı yükleme basıncına düzeltilir (1 t/ft^2). Bu şu şekilde elde edilebilir;

$$N_1 = C_N N \quad (4.12)$$

C_N = Peck, Hanson ve Thornburn tarafından önerilen bir düzeltme faktörüdür :

$$C_N = 0,77 \log_{10} (20/p) \quad (4.13)$$

P = Penetrasyon testine geçişte t/ft^2 cinsinden efektif aşırı yükleme basıncıdır. C_N 'nin maksimum değeri 2,0'dır. Sıvılaşmaya neden olan siklik gerilme oranı yerin herhangi bir derinliğinde kabul edilebilir bir kesinlikte eşitlik 4.9 ile bulunabilir.



Şekil 4.9 Kumların penetrasyon direnci ile sıvılaşmaya neden olan gerilme oranının korelasyonu.

Bu tabloyu kullanarak, sıvılaşma potansiyeli herhangi bir maksimum yer hızı ve herhangi bir alanda amprik olarak elde edilebilir. Bu durum kumlu zeminlerin uygun N_1 değerlerinin elde edilerek, sıvılaşmanın meydana geldiğine dair deliller bulunan zeminlerde τ_{av}/σ_o alt sınır değerlerinin anlaşılması ile araştırılan zeminin yapay bir depreme maruz bırakılarak oluşan değerlerin karşılaştırılması ile yapılabilir. Seed 'e göre prosedür aşağıdaki şekilde kısadır :

1. τ_{av}/σ_o yüksek değerine karşılık sıvılaşmaya neden olan şartların alt değerleri mevcut ise daha fazla saha bilgisine ihtiyaç vardır.

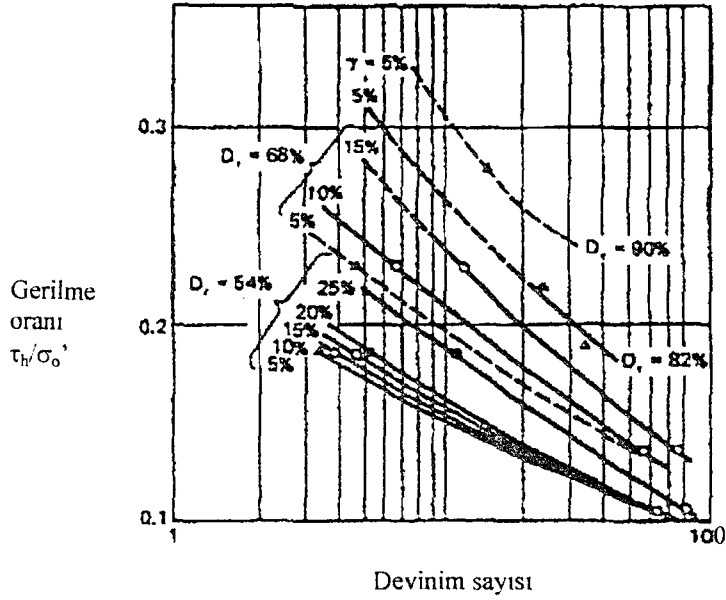
2. Bu cins hesabın amprik tabloları sıvılaşmayı etkileyen faktörler olan salınma süresi ve deprem büyüklüğünden muaf olarak diğer parametreleri içerir.

3. Penetrasyon direnci zeminin deprem esnasındaki siklik davranışları hakkında bilgi vermez.

5 Zeminin standart penetrasyon direnci sahada her zaman güvenilir olarak elde edilemeyebilir ve değerler önemli ölçüde değişebilir. Bu değişimin nedeni numune alma şartlarından kaynaklanmaktadır.

Az büyüklükteki depremlerde ve sallanma süresinin azlığında, Şekil 4.9 oldukça kullanışlıdır ve 6 büyüklüğündeki bir depremde gerilme oranları umulandan %25 daha fazla olabilir .

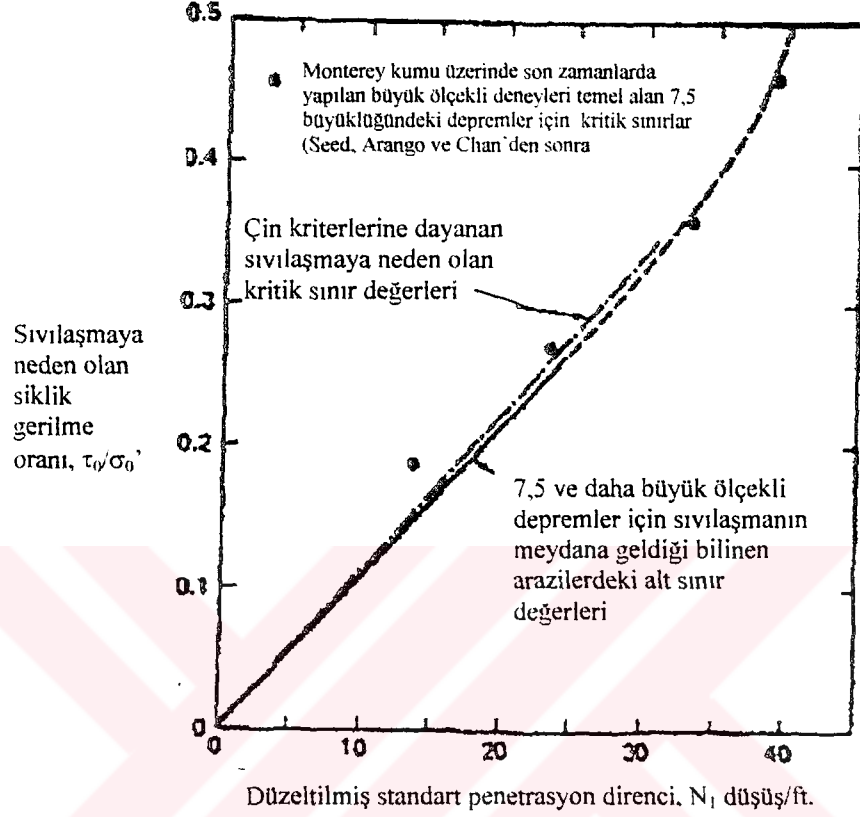
Yüksek sıklıkta ve yüksek penetrasyon direnç değerleri ile yüksek siklik gerilme oranında kumlarla ilgili az bulunan güvenilir kaynaklar bulunmaktadır. Bu bilgiler ancak büyük depremlerde toplanabilmektedir. De Alba ve ark. geniş ölçekli basit kesme deneyi kullandılar, ve çok yönlü sarsıntı ve yaş gibi modifiye edilmeye uygun önemli faktörler olarak bilinen bilgiler toplamışlardır. Seed ,Bieganousky ve Marcuson tarafından geliştirilen standart penetrasyon ve relatif sıklık değerleri arasındaki ilişkiyi kullanarak ve Şekil 4.10'daki çeşitli düzeltme faktörlerini de kullanarak, farklı büyüklüklerdeki eşit sayıda üniform siklik gerilme içeren depremlerde değerlendirilebilecek sonuçlar elde etmiştir.



Şekil 4.10 τ_h/σ_0 (düşey) ve farklı gerilme seviyelerine neden olan devrim sayıları(yatay) arasındaki ilişki.

Sonuçlar Şekil 4.9'deki bilgilerle değerlendirerek 7.5 büyüklüğündeki depremler için Şekil 4.11'deki gibi elde edilir. Test sonuçları ile saha bilgileri arasındaki uyum mükemmeldir ve deprem büyüklüğüne göre doğrulama faktörlerinin sıralandığı görülmektedir. Daha da önemlisi, aynı prosedürü takip ederek diğer deprem büyüklükleri için karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesidir.

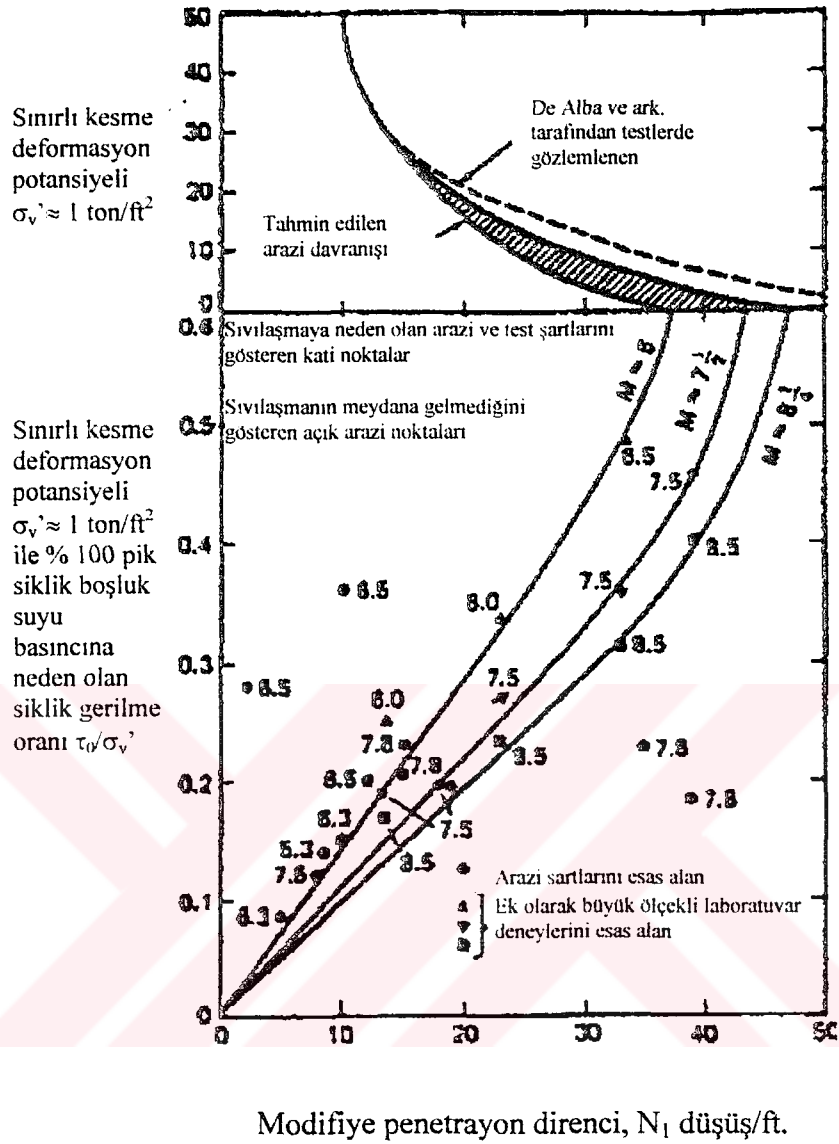
Aynı yolun takibiyle Şekil 4.12, saha çalışmalarından elde edilen tüm güvenilir bilgelerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bu durum 6. 7.5 ve 8.25 büyüklüğündeki depremler için daha alt sınır değer ilişkilerine müsaade eder.



Şekil 4.11 Seed'in saha sıvılaşma korelasyonu ile çin sıvılaşma kriter temelli korelasyon arasındaki karşılaştırma.

Şekil 4.11 ve 4.12'deki gerilme oranları, % 100 pik siklik boşluk suyu basıncı ve farklı penetrasyon direnç basınçlarında kumlar için $\pm$ % 5 kesme direncine gereksinim duyan gerilme oranlarıdır. Sıkı kumlarda bu şartların gelişmesi aynı zamanda sınırlı kayma gerilmesi, ve bu kayma gerilmelerinin büyüklüğünün relatif sıkılığa göre değişimi, sıkışan basınçlar ve diğer faktörlerle birlikte gerçekleşir.

Eğer, derinliğe göre aşırı yükleme basıncı ile düzeltilmiş standart penetrasyon kayıtları, birim ağırlıklar, su tablosunun bölgesi ve bölgede umulan deprem büyüklüğü biliniirse sıvılaşma analizi aşağıda tarif edilen biçimde olacaktır:



Şekil 4.12 Büyük ölçek testlerden elde edilen penetrayon direnci ile kumun sahadaki sıvılaşma davranışı arasındaki ilişki.

1. Eşitlik 4.9 yardımı ile depreme neden olan τ_{av} kayma gerilmesinin elde edilmesi.
2. τ_0/σ_v' değerini ve τ_0 değerini Şekil 4.12'den elde etmek.
3. τ_{av} ve τ_0 'ın karşılaştırılması ile sıvılaşmanın meydana gelip gelmeyeceğine karar verilmesi. Eğer $\tau_{av} > \tau_0$ ise sıvılaşma meydana gelir; eğer değil ise sıvılaşma meydana gelmez.

4.2.3 Sıvılaşma Tahmini: Eurocode Metodu

Sıvılaşma duyarlılığının hesabı ancak zemin temelinin dağınık katmanlardan, ince zayıf kum yığınlarından, silt/kil varlığından ve ya var olmamasından, su tablosunun yerinden ve bu bahsedilen özelliklerin yüzeye yakın olması durumunda yapılabilir. Bu seviye yeryüzey seviyesi ve su tablosu seviyesinin zemin yapısının tarihi boyunca ortaya çıkan şartlardan ötürü oluşmaktadır. Bu amaç için yapılan araştırmalarda SPT arazi standart penetrasyon testleri, CPT konik penetrasyon testleri ve laboratuvarda yapılan dane çapı dağılım eğrisi kullanılmıştır. SPT için, N_{SPT} penetrasyon indeksinin değeri, beyan edilen 30 cm 'de bir düşüş sayısı, efektif serbest düşüş çarpma enerjisinin % 60'ı ve 100 kPa referans efektif aşırı yükleme basıncının değerlendirilmesi ile normalize edilir. 3 m'den daha az derinlikler için, hesap edilen SPT değerleri % 25 oranında azaltılır. Aşırı yükleme basıncına bağlı olarak yapılan düzeltme, SPT ölçümünün yapıldığı derinlikteki σ'_{vo} (kPa) efektif aşırı yükleme basıncı olmak kaydıyla $(100/\sigma'_{vo})^{0.5}$ faktörü ile çarpılarak düzeltilmiş N_{SPT} değeri elde edilir. Enerji normalizasyonu penetrasyon indeksi ile ER/60 değerinin çarpılması ile elde edilir [ER= (hesaplanan enerji oranı) x 100]. CPT için, hesaplanan penetrasyon direnci q_c referans aşırı yükleme basıncı 100 kPa ile normalize edilir. Bu normalizasyon hesaplanan q_c değerinin $(100/\sigma'_{vo})^{0.5}$ faktörü ile çarpılmasıyla bulunur (σ'_{vo} kPa olarak verilmiştir).

Yüzeysel temelli binalar için sıvılaşma hassasiyetinin hesabı, eğer doygun kumlu zemin yeryüzeyinden 15 m'den daha derinde ise ihmal edilebilir. Sıvılaşma tehlikesi $a < 0,15$ olmasının yanında aşağıda belirtilen durumların olması kaydıyla ihmal edebiliriz:

- Kumların kil oranları % 20'nin üzerinde ise,
- Kumların silt oranların % 10'un üzerinde ve aynı zamanda $N_1(60)$ [Normalize edilmiş standart penetrasyon (SPT) indeksinin] > 20 olması durumu,
- Kumların temiz olması durumu ile $N_1(60) > 25$ olması durumu.

Önceki saydığımız şartlar varolmadığı zaman, sıvılaşma riski arazide elde edilen değerlerle geçmiş depremlerde sıvılaşmaya neden olduğu bilinen kritik sıklık gerilme değerleri arasında korelasyon yapılarak elde edilebilir. Sahada yapılan farklı

deney sonuçlarına göre amprik olarak sıvılaşma hakkında fikir veren saha korelasyon tablosu Şekil 4.13’de verilmiştir. Bu yaklaşıma göre, sismik gerilme τ_e hesaplanması basitçe şu şekilde açıklanabilir;

$$\tau_e = 0,65 \times a \times S \times \sigma_{v0} \quad (4.14)$$

a yerine dizayn yer hız oranı, S yerine zemin parametresi ve σ_{v0} yerine toplam aşırı yükleme basıncı yazılmalıdır. Bu formüle 20 m.’den daha derin durumlarda başvurulmamalıdır.

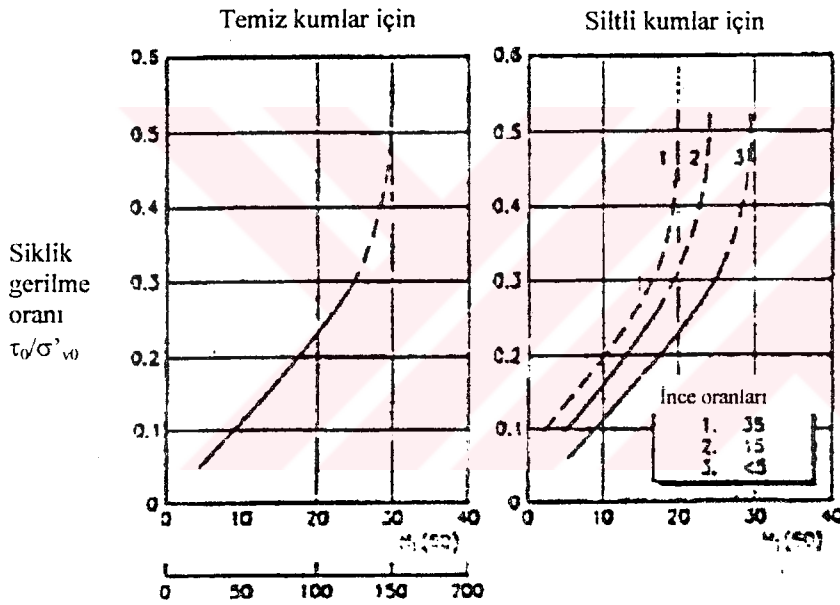
Bütün tablolarda gösterildiği gibi sıklık direnç eğrisinin sınırının oluşturduğu eğrinin sağında kalan bölge sıvılaşma olasılığının olmadığı solu ve üstü ise sıvılaşma olasılığının olacağını gösterir. CTP direncinin kullanıldığı tablolar hariç, bu amprik yöntem katmanlı ve ya kalınlığı birkaç santimden fazla olmayan sıvılaşabilir zeminler için uygun değildir. Zemin içinde sağlam çakıl bulunduğu zaman, amprik yöntemin yapı inşasında sıvılaşma olasılığı için henüz güvenilir olmadığını da düşünerek sıvılaşma olasılığı için karar verilemez bir yöntem olduğunu söyleyebiliriz.

SPT indisini temel alan tablolar: Temiz ve siltli kumlar için en çok kullanılan tablolar arasında Şekil 4.13 bulunmaktadır. Sıvılaşma τ_e eşiğinin altında kesin olarak olmamaktadır, çünkü zemin elastik davranır ve boşluk suyu basıncı yığılması oluşmaz. Bu nedenle, sınırlandırılmış eğri ile orijini tahmin edemeyiz. 7.5 büyüklüğünden farklı depremler için varolan kriterler CM faktörü ile (Tablo 4.4) düzeltilerek Şekil 4.13’ün ordinatı ile çarpılır.

Tablo 4.4 Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı CM.

M	CM
5,5	2,86
6,0	2,20
6,5	1,69
7,0	1,30
8,0	0,67

CPT direncini temel alan tablolar: SPT indisi ile CTP uç direnci arasında yapılan korelasyonlar ile ilgili birkaç çalışmanın temelindeki kriter normalize edilmiş q_{cl} konik penetrasyon direncidir. $q_{cl}/N_1(60) = 5$ varsayarsak Şekil 4.13'deki apsis değerleri q_{cl} değerine göre değiştirilerek aynı eğri bu şekilde kullanılabilir. Kullanılan ikinci yöntem ise daha önce deprem yaşanmış sıvılaşma olayı meydana gelmiş bölgelerden elde edilen CPT bilgilerinin kullanılmasıdır.



Şekil 4.13 Sıvılaşmaya neden olan gerilme oranları ile M=7,5 büyüklüğündeki depremler için temiz ve siltli kumlar için ölçülen $N_1(60)$ değerleri arasındaki ilişki.

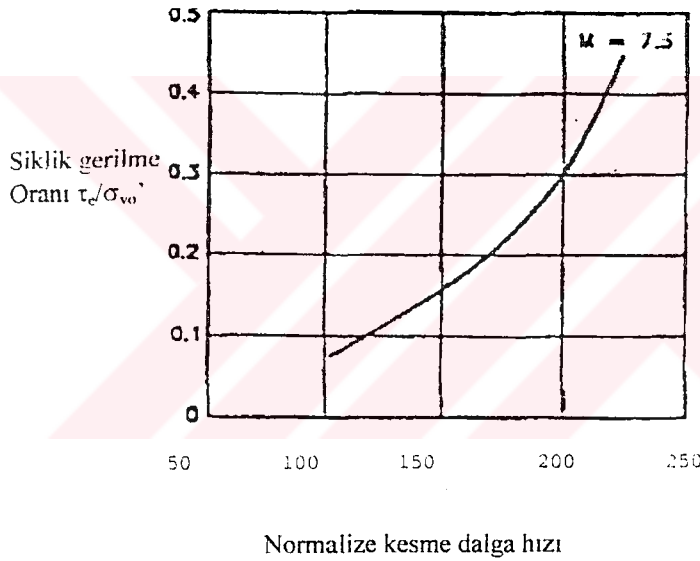
Kesme dalga hızı v_s temelli tablolar: Bu özellik özellikle silt ve kum gibi numune alması zor ve ya çakıl gibi penetrasyonu zor zeminlerde sıvılaşma tahmini için kullanılan bir hesap yöntemidir. Aynı zamanda, arazide v_s değerini ölçmek için son

yıllarda önemli bilimsel gelişmeler yaşanmıştır. Şekil 4.14 siklik gerilme oranı τ_e/σ'_{vo} ve normalize edilmiş kesme dalga hızı arasında bir ilişki göstermiştir.

$$V_{sl} = v_s (P_a/\sigma'_{vo})^{0.25} \quad (4.15)$$

P_a , σ'_{vo} ile aynı birimde olmak kaydıyla atmosferik basınçtır.

Tüm arazi deney verilerini kullanarak yapılan çalışmalar neticesinde sıvılaşmanın olup olmayacağına dair önceki depremlerden dolayı bilinen kritik gerilme oranının % 80'i 1,25 güvenlik katsayısı düşünülerek sıvılaşmaya neden olabilecek gerilme oranı olarak düşünülerek ona göre hesap yapılmalıdır.



Şekil 4.14 M=7,5 büyüklüğündeki depremlerde normalize edilmiş kesme dalga hızının sıvılaşmaya neden olan gerilme oranı arasındaki ilişki.

Eğer zemin sıvılaşmaya olası görülür ve bu sıvılaşma neticesinde temellerin taşıma kapasitesi ve stabiliteleri bozulursa, uygun zemin iyileştirme metodları ve/veya yükü aşağıda sıvılaşmayan zeminlere aktaran kazık uygulamaları ile yeterli temel güvenliğini sağlayabiliriz. Zemin iyileştirmelerinin temelinde sıvılaşabilir zeminin sıkıştırılması veya yer sarsıntısı neticesinde meydana gelen boşluk suyu basıncını

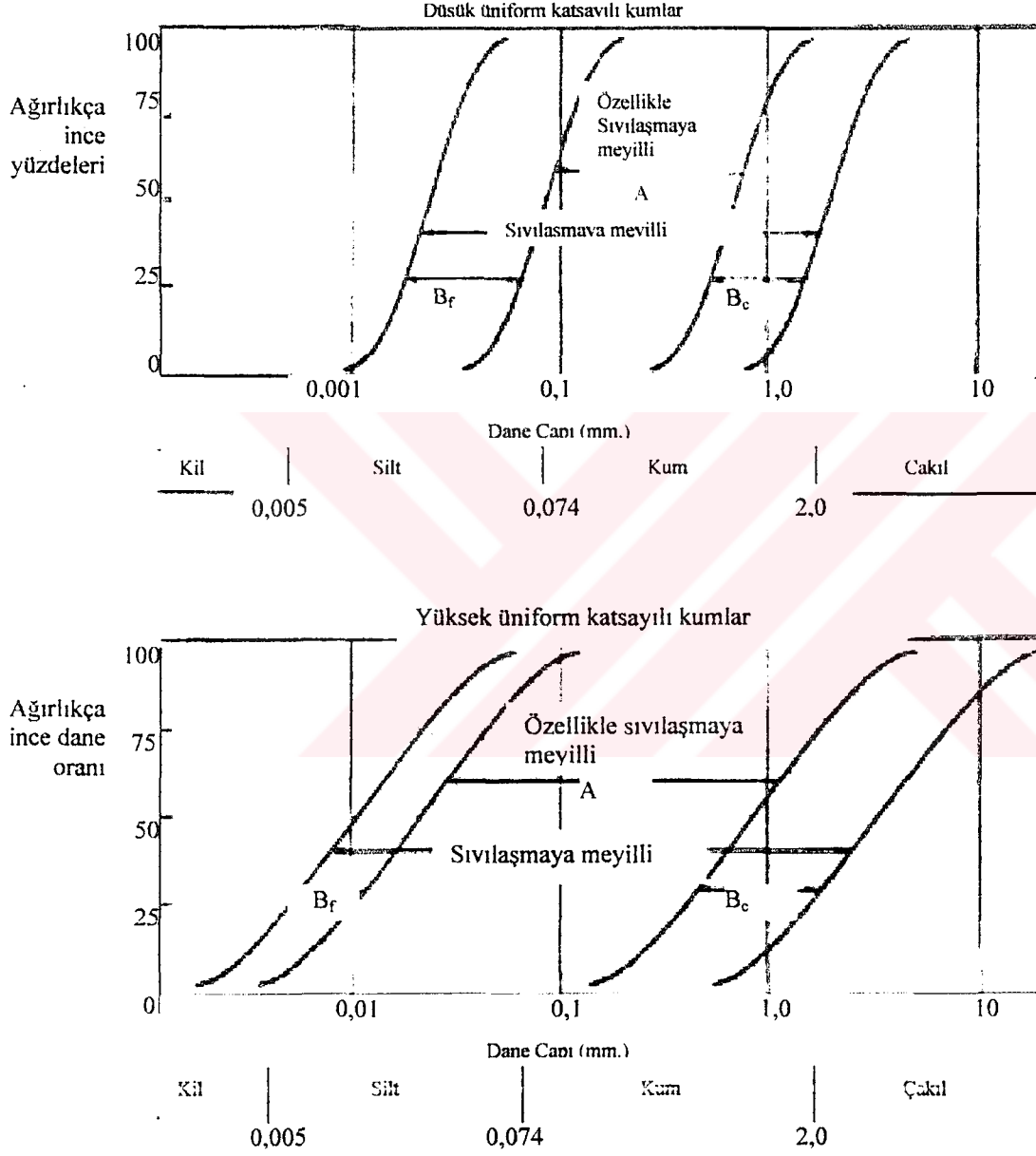
azaltacak yöntemler vardır. Kompaksiyon fizibilitesi, zemin içerisindeki ince danelerin içeriği ve derinliği ile yapılır.

4.2.4 Sıvılaşma Tahmini: Japon Metodu

Japonya’da liman ve havaalanlarının geçmişte yaşanmış sıvılaşma olayları ve kumlu zeminlerin deneylerinden elde edilen N değeri ve dane çapı dağılımı temelli tahmin metodudur.

1. Öncelikli olarak, zemin Şekil 4.15’de gösterildiği gibi gradasyon durumuna göre sınıflanır. Zeminin üniformluğuna göre şekillerden biri seçilir. $U_c = D_{60}/D_{10} = 3,5$ katsayısı seçimin kriteri olarak kullanılabilir (U_c = üniformluk katsayısı, D_{60} = 60% çap, D_{10} = efektif çap).

A, B_r ve B_c bölgeleri içinde kalan bölgeler sıvılaşabilen diğer bölgeler sıvılaşmayan bölgelerdir.

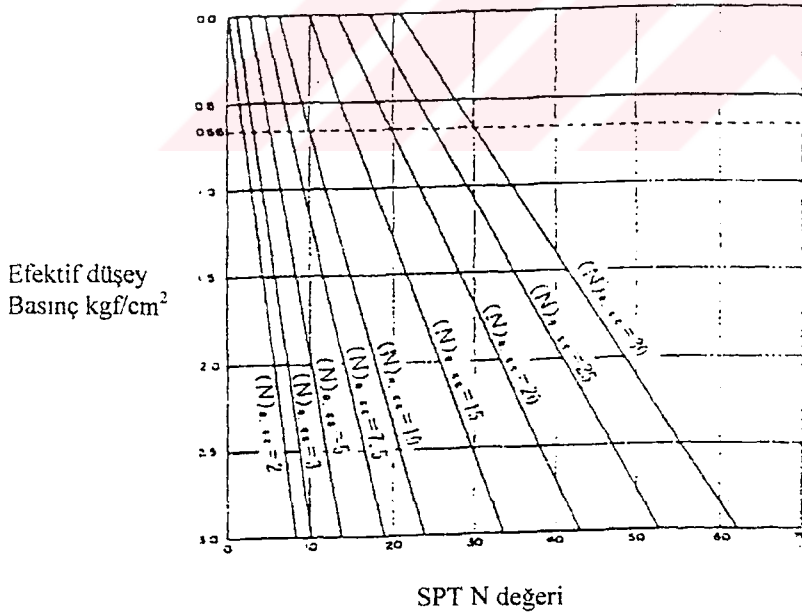


Şekil 4.15 Sıvılaşma olasılığı olan zemin gradasyonları.

2. Şekil 4.15'de A ve B_c bölgesine düşen zemin katmanları için, bir N değeri aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

$$(N)_{0,66} = \frac{N - 1,828(\sigma_v' - 0,66)}{0,399(\sigma_v' - 0,66) + 1} \quad (4.16)$$

$N_{0,66}$ = SPT N değerinin efektif düşey basınç 0,66 kgf/cm²'ye göre düzeltilmiş eşdeğer N değeridir, N = SPT N değeridir, σ_v' = zemin yığınının efektif düşey basıncıdır (efektif düşey basınç yer yüzeyi seviyesine göre standart penetrasyon testi sırasında elde edilerek kullanılmalıdır. Yukarıdaki eşitlik, $2 \leq N_{0,66} \leq 40$, $0 \leq \sigma_v' \leq 3$ kgf/cm² olduğunda geçerlidir. Yukarıdaki eşitlik ile ilgili ilişkiler Şekil 4.16'de verilmiştir. Şekil 4.15'de gösterilen dane çapı dağılımı B_f bölgesine düşen zemin katmanları için eşitlikteki N değeri SPT N değeri ile aynı olduğundan düzeltmeye gerek yoktur.



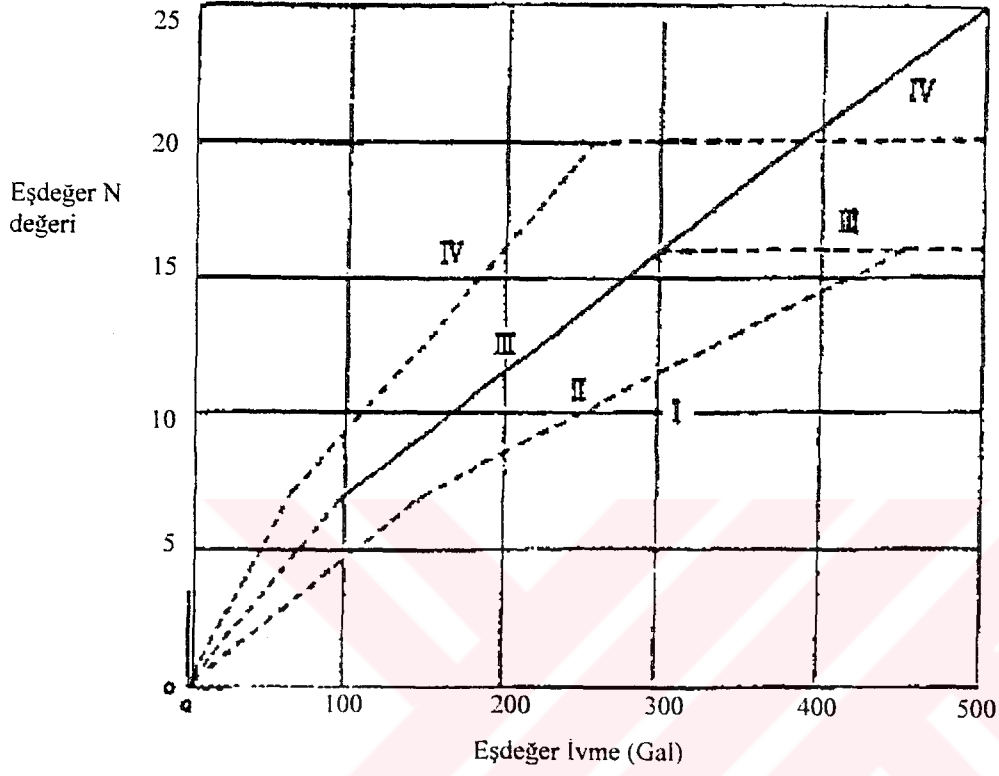
Şekil 4.16 Eşdeğer N değeri hesaplaması için tablo (aralıksız çizgiler efektif düşey basınç ile SPT N değeri arasında aynı relatif sıklıktaki ilişkiyi göstermektedir).

3. Dane çapı dağılımı A, B_f ve B_c bölgesine düşen zemin katmanlarının eşdeğer ivme hesaplanır. Depreme dayalı hesap yöntemleri ile elde edilmiş maksimum kayma gerilmesi temelli aşağıdaki eşitlik yardımıyla her katmanın eşdeğer ivmesi hesaplanır.

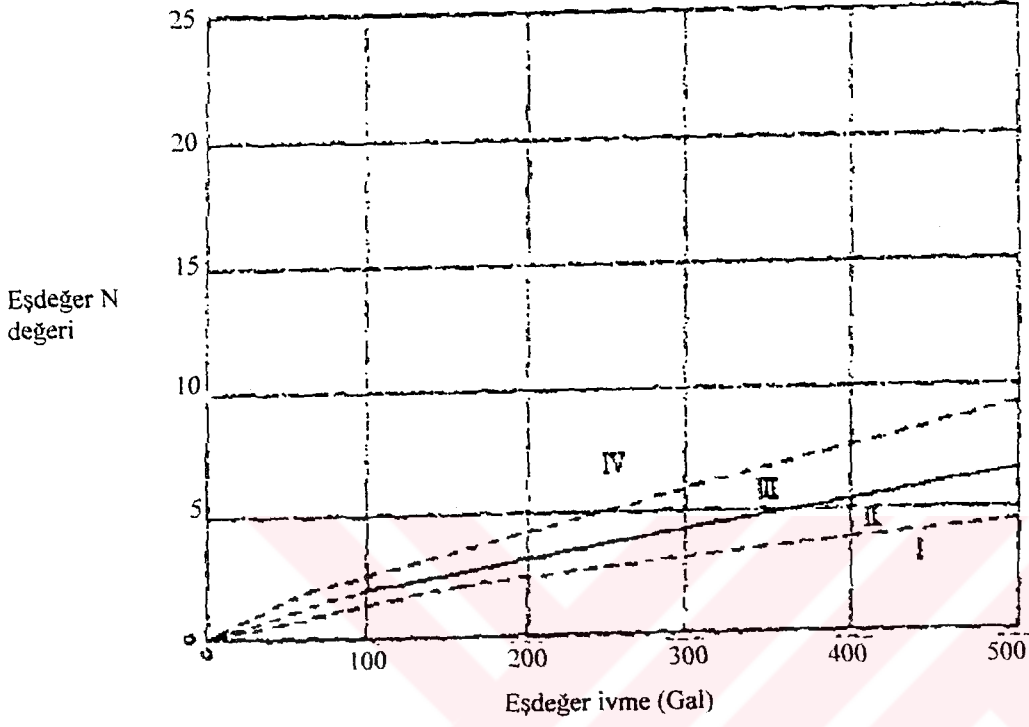
$$\alpha_{eq} = 0.7 \times \frac{\tau_{maks}}{\sigma_v'} \times g \quad (4.17)$$

α_{eq} = Eşdeğer ivme (Gal), τ_{maks} = Maksimum kesme gerilmesi (kgf/cm²), σ_v' = Efektif düşey basınç (kgf/cm²) (Burada kullanılan efektif düşey basınç deprem esnasında yer yüzeyi seviyesine göre hesaplanmıştır), g = Yerçekimi ivmesi (980 Gal).

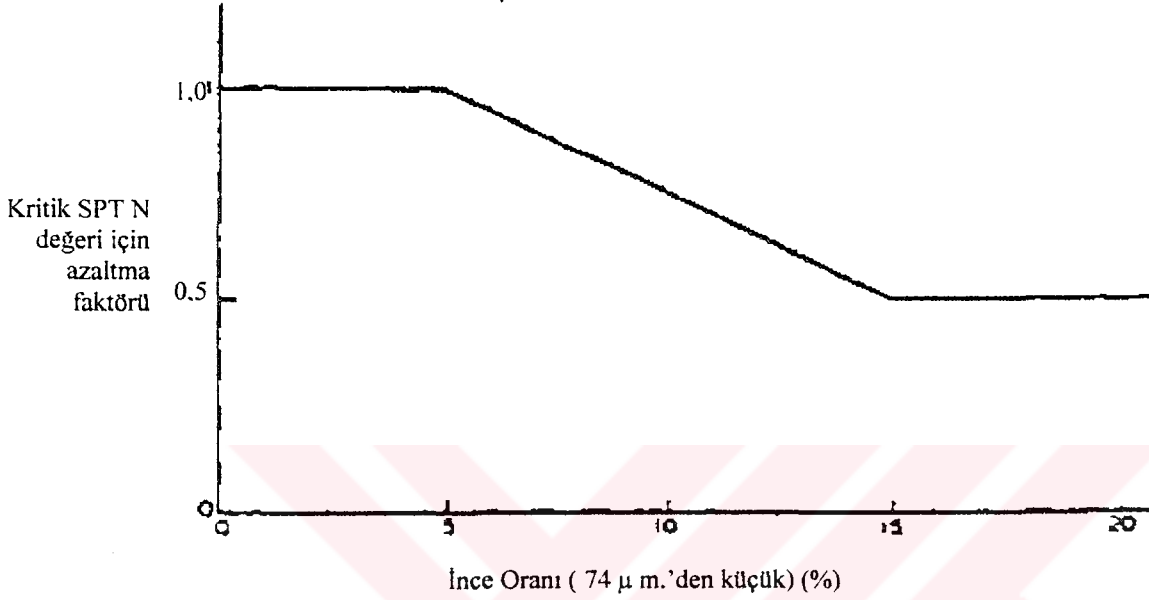
5. Şekil 4.17'de zemin katmanlarının bulunduğu bölgeler eşdeğer N değeri ile ivmesi göz önüne alınarak belirlenir. Dane çapı dağılımı Şekil 4.15'de A bölgesine düşen zeminler için Şekil 4.17-a ile kontrol edilir, B_f ve B_c bölgesine düşen zeminler için Şekil 4.17-b ile kontrol edilir. A bölgesine düşen zeminler için ince danelerin oranının % 5'den fazla olduğu durumlarda (ince dane çapı 74 µm'den az olanlardır). Şekil 4.17-a'da gösterilen her bölge için sınır çizgisi Şekil 4.18'de gösterilen eşdeğer N değeri ile çarpılarak azaltılır. Alternatif olarak , sınır çizgisini azaltmak yerine, eşdeğer N değerini Şekil 4.18'de gösterilen kısaltma katsayısına bölünerek bir çevirim yapılabilir. Çevrilmiş eşdeğer N değeri Şekil 4.17-a'ya göre direk kontrol edilebilir. Şunu belirtmek gerekir ki, B_c bölgesine düşen zemin katmanları için eğer geçirgen olmayan kil ve silt zeminin üstünde bulunuyorsa A bölgesine düşen zeminler için kullanılan method kullanılır.



Şekil 4.17-a Eşdeğer ivme ve eşdeğer N değeri temelli sınıflama tahmini için zemin katmanı sınıflandırılması: gradasyonu A bölgesinde olan zemin katmanı için.



Şekil 4.17-b Eşdeğer ivme ve eşdeğer N değeri temelli sınıflama tahmini için zemin katmanı sınıflandırılması; gradasyonu B_f ve B_c bölgesinde olan zemin katmanı için.



Şekil 4.18 İnce daneleri temel alan kritik SPT N değeri için indirgeme faktörü
(Yalnızca A gradasyon bölgesine giren zemin katmanları için).

5. Zemin katmanını dördüncü adıma göre sınıflandırdıktan sonra Tablo 4.5'e göre sıvılaşma tahmini yapılır. Yapılar için güvenlik katsayısının büyük olduğu zaman sıvılaşma tahmini Tablo 4.5'de III'üncü bölgede daha fazla değerlendirme yapmak için sıklık üç eksenli basınç deneyi yapılmalıdır. Hesaplama yapılırken kullanılan sıklık üç eksenli basınç deneyi arazi şartlarına göre yapmak zor ise, bu durumda sıvılaşmanın III'üncü bölgeye düşen zeminler için meydana gelebileceğine karar verilir.

6. Beşinci adıma göre kalınlığı belirlenmiş sıvılaşabilir zeminlerin permeabiliteside öğrenildikten sonra sıvılaşma değerlendirilmesi yapılır.

Tablo 4.5 Dane çapı dağılımı ve SPT N değerine göre sıvılaşma tahmini

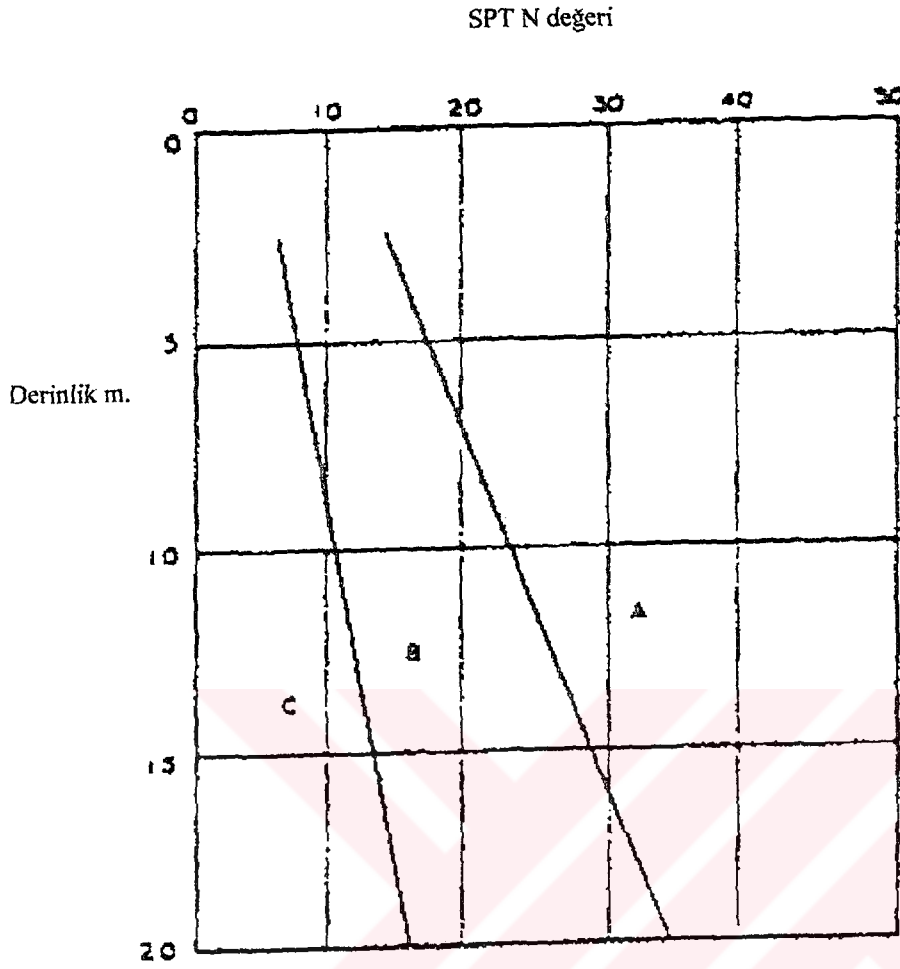
Şekil 3.13’de gösterilen bölgeler	Gradasyon ve SPT-N temelli sıvılaşma tahmini	Gradasyon ve SPT-N temelli sıvılaşma saptaması
I	Sıvılaşma olasılığı çok yüksek	Sıvılaşma meydana gelir
II	Sıvılaşma olasılığı yüksek	Sıvılaşmanın olacağına da karar verilebilir; daha fazla bilgi edinebilmek için siklik üç eksenli basınç deneyinin yapılmasına da
III	Sıvılaşma olasılığı düşük	Sıvılaşmanın olmayacağına da karar verilebilir daha fazla bilgi edinebilmek için siklik üç eksenli basınç deneyinin yapılmasına da ve eğer yapının güvenlik katsayısı yüksek ise sıvılaşmanın olacağına da karar verilebilir ve ya daha fazla bilgi edinebilmek için siklik üç eksenli basınç deneyinin yapılmasına da
IV	Sıvılaşma olasılığı çok düşük	Sıvılaşma meydana gelmez.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Temel İnşaatında Dizayn Standartları ve Öneriler (1974)

Japon standartlarında bir zemin katmanının aşağıdaki şartlarda sıvılaşma hesabının yapılması gerekmektedir.

- Yer yüzeyinin 15 ila 20 m. altında uzanan zemin bölgelerinde,
- Orta derecede üniform kum katmanlarında (Sıvılaşma riskinin kısmen yüksek olduğu üniformluk katsayısı U_c 'nin 10'dan daha az olduğu, riskin yüksek olduğu U_c 'nin 5'den az olduğu; Sıvılaşma riski silt ve kil oranının % 10'dan daha az olduğu durumlarda, ortalama dane çapı D_{50} oranının 0.075-2,0 mm. arasında olması ve özellikle orta derece daneli kumun D_{50} oranının 0,15-1,0 mm. olması durumunda yüksektir).
- Suya doymun bölgenin yer su seviyesinin altında olduğu durumlarda.
- Düşük derecede sıkışmanın ve SPT-N değerinin olduğu B ve C bölgesinde.



Şekil 5.1 Sıvılaşma olasılığı ve SPT-N değeri

Kesin olarak zemin sıvılaşması hakkında tahmin yapmak oldukça zordur, fakat daha detaylı inceleme yapılması gerekebilir.

Sıvılaşmaya karşı aşağıda sayılan iyileştirici önlemler önerilmektedir.

1. Relatif sıkılığın kompaksiyon ile artırılması.
2. Sıvılaşma olasılığı yüksek zeminin sıyırılması.
3. Yer yüzey suyunun seviyesinin azaltılması.

Method 1 itibarı ile, zemin kompaksiyonu 1964 Niigata ve 1968 Tokachioki depremlerinde etkili bir yöntem olduğunu ispatlamıştır. Derin kazıklarla sıvılaşabilir zeminlerden sıvılaşmanın olmadığı zeminlere yapılan temellerle, bu depremlerde

yapılara gelen zararlar minimize edilmiştir. Aynı zamanda kazıklarla birlikte kompaksiyon yapılırsa sıvılaşmanın hasara neden olmadığıda görülmüştür.

5.2 Bina Temellerinin Dizaynına Dair Tavsiyeler (1988)

Tavsiyeler (Japon kodlarında) sıvılaşma olasılığını dört faktörün arttırdığını göstermektedir;

1. Zemin içerisindeki ince danelerin azlığı;
2. Doygun yeraltının SPT-N değerinin daha düşük olduğu durumlarda;
3. Yer su seviyesinin yüzeye olan yakınlığı;
4. Daha büyük deprem hareketinin meydana gelmesi.

Sıvılaşma hesabının yapılması zemin tabakasının derinliğinin yer yüzeyine oranla 20 m. 'den az olması durumunda gereklidir. Daha önce meydana gelmiş depremlerden zemin içerisindeki ince danelerin oranının % 35'i aştığı durumlarda hasarın yoğunlaştığı görülmüştür. Siltler için likit limite yakın su muhtevası olan veya düşük plastisiteli siltlerde sıvılaşma hesabı gereklidir. Bu durum daha önce meydana gelmiş depremlerde ince danelerin oranının % 35'in üzerinde olduğu durumlarda dahi sıvılaşmanın oluşmasında dolayıcıdır.

Sıvılaşma potansiyeli hesabı için aşağıdaki prosedür geliştirilmiştir:

a) Eşdeğer siklik kayma gerilmesi oranı her derinlik için aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{\tau_d}{\sigma_z'} = r_n \frac{\sigma_{mak}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} r_d \quad (5.1)$$

τ_d = geniş bir alana sürekli olarak uygulanan eşdeğer siklik gerilim oranı (tf/m^2), σ_z' = her derinlikteki efektif aşırı yükleme basıncı (efektif düşey basınç) (tf/m^2), r_n = eşit sayıda siklik deprem yüküne bağlı düzeltme katsayısı $r_n = 0,1 (M-1)$, M dizayn deprem büyüklüğüdür, σ_{mak} = yeryüzeyinde maksimum yatay ivme (Gal), g = yerçekimi ivmesi (980 Gal), σ_z = her derinlikteki toplam aşırı yükleme basıncı (toplam düşey basınç) (tf/m^2), r_d = düzeltme faktörü ($= 1-0,015z$) z, yeryüzeyinden olan derinliktir.

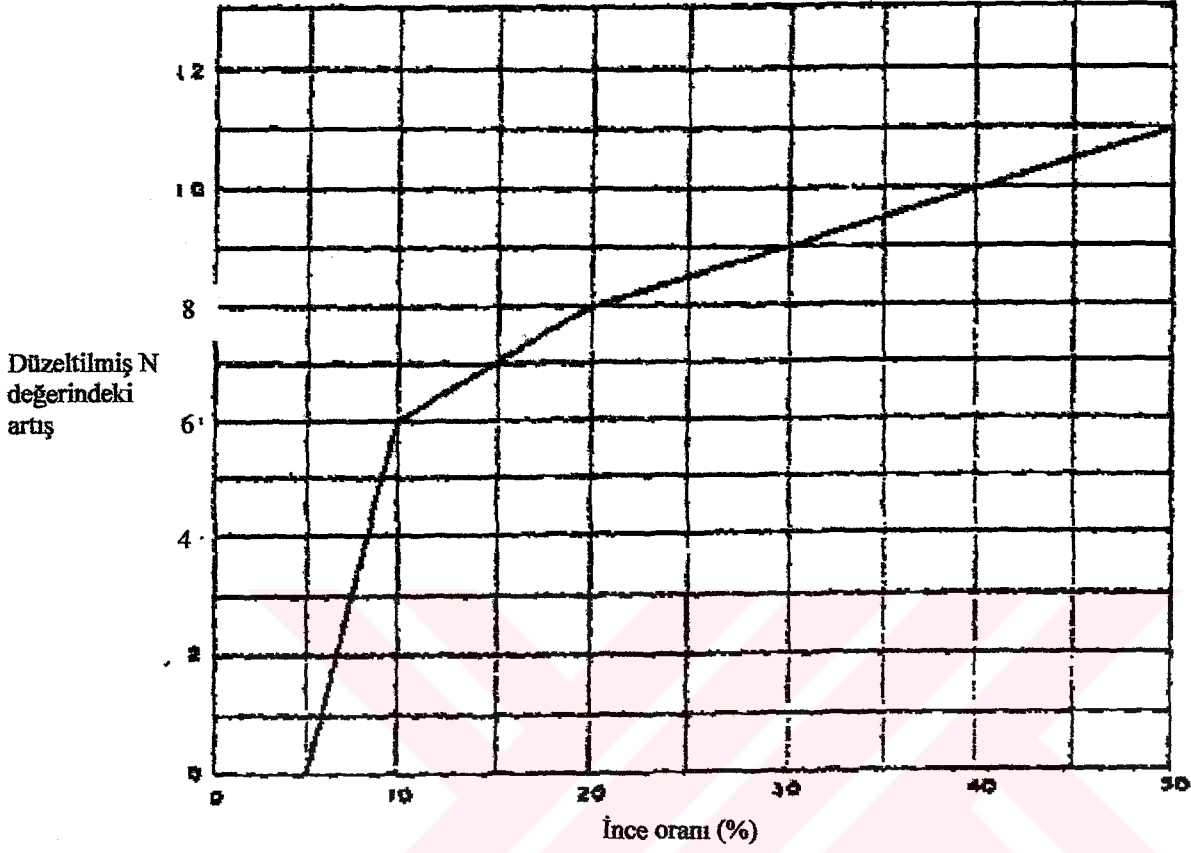
b) Düzeltilmiş SPT N değeri N_a her derinlik için Şekil 5.2'deki eşitlik gözönüne alınarak hesaplanmıştır.

$$N_a = N_1 + N_f \quad (5.2)$$

$$N_1 = C_n \times N \quad (5.3)$$

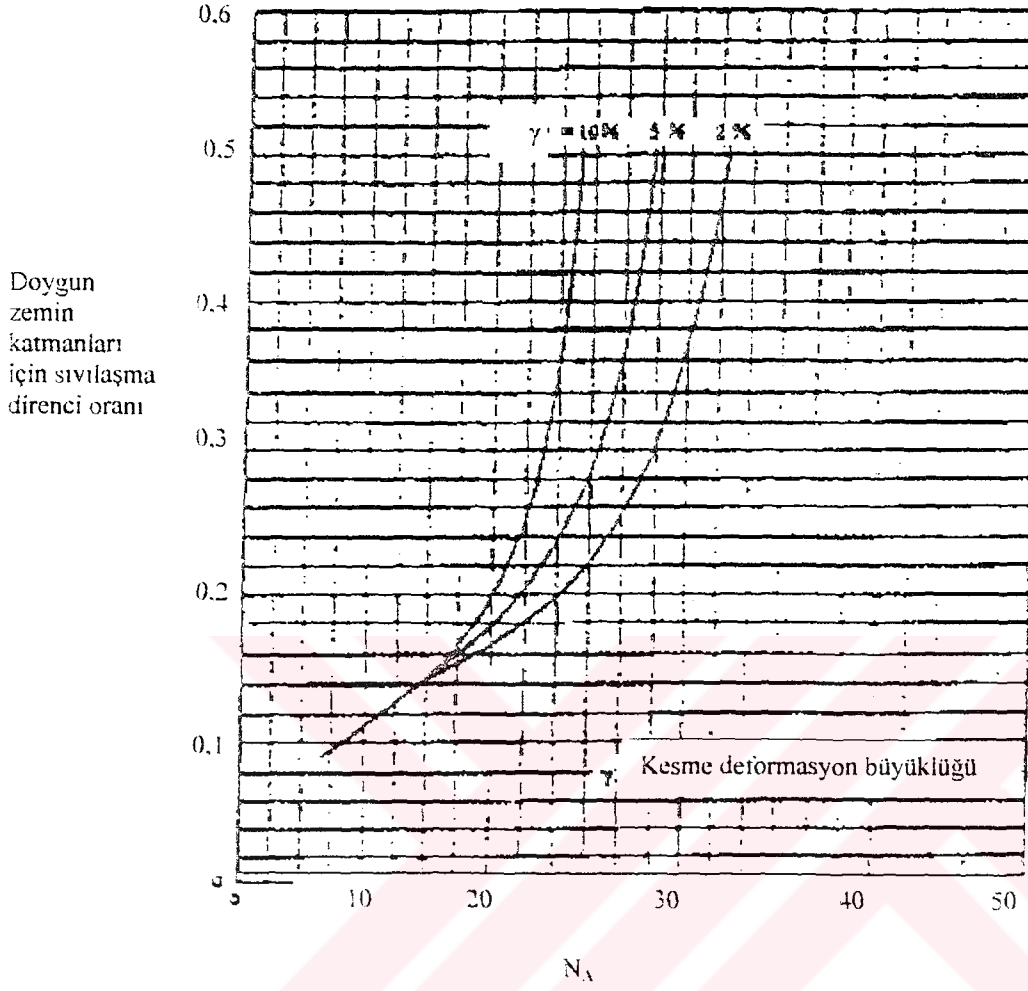
$$C_N = \sqrt{\frac{10}{\sigma_z'}} \quad (5.4)$$

N_a = düzeltilmiş SPT N değeri, N_1 = eşdeğer SPT N değeri, N_f = Şekil 5.2'de gösterilen ince danelerin oranına göre değişen eşdeğer SPT N değer artışı, C_N = hücre basıncı için SPT N düzeltme faktörü, N = otomatik serbest düşüş metoduna göre SPT N değeri. Eğer çekiç makaradan düşmüyorsa ve serbest düşmesine bir engel var ise SPT N değeri % 20 küçültülmelidir.



Şekil 5.2 İnce danelerle, düzeltilmiş N değeri ΔN arasındaki ilişki.

- c) Sıvılaşma direnci oranı τ_1 / σ_z' doymun zemin katmanları için düzeltilmiş SPT N değeri N_a kullanılarak Şekil 5.3'deki eğri ile hesaplanır. τ_1 , sıvılaşmaya neden olan kayma gerilmesidir.



Şekil 5.3 Doygun zemin kütleleri için sıvılaşma direnci oranı ve düzeltilmiş SPT N değeri N_A arasındaki ilişki.

d) Her derinlik için hesaplanan sıvılaşma F_L 'ye göre düzeltme faktörü

$$F_L = \frac{\tau_1/\sigma_z'}{\tau_d/\sigma_z'} = \frac{\tau_1}{\tau_d} \quad (5.5)$$

F_L değeri < 1.0 olan zemin katmanlarının sıvılaşması olasıdır.

Sıvılaşma olması için yatay düzlemde dizayn ivmesinin 200 Gal civarında olması gerekmektedir. Alternatif olarak, aşağıdaki eşitlik vasıtası ile hesaplanan değer

uygundur, çünkü dizayn mühendisleri tarafından yapının önem derecesi ve arazi düşünülerek tahmin yapılmalıdır.

$$\sigma_{maks} = Z \times I \times G \times \alpha_0 \quad (5.6)$$

Z= Bölgesel faktör, I= Önem derecesi; G= Arazi faktörü, α_0 = Standart yatay ivme (200 Gal).

Japonya yapım bakanlığının 1493 no'lu yayınında (1980) verilen bölgesel faktörler eşitlikteki Z faktörü yerine kullanılabilir. Bu yayının daha önce depreme maruz kalmış yapılardan yola çıkarak hesaplanan uygun Z değerlerini 0.7'den 1.0'a değişken olarak vermektedir. Önem derecesi ise dizayn mühendislerinin yapının deprem esnasında dahi görev yapacağı düşünülerek seçilmelidir. Mühendislerin tasarrufundadır. Normal yapılar düşünülürse bu faktör 1 olarak belirlenir. Arazi faktörü G normal zeminlerde 1'dir. Önem derecesi büyük uygulamalarda, örneğin ince alüvyonal yığımlarda G faktörü arazi şartlarına göre yerinde tespit edilmelidir.

Sıvılaşma olasılığının bulunduğu kazık uygulamalarında, Tablo 5.1'de gösterilen yatay direnç hesabı için yer altı yatay tepki kısaltma katsayısının düşünülmesi gerekebilir. Sıvılaşabilir katman eğer yer altı profilinin ortalarında ise, katmanın üzerindeki bölgenin de düşünülmesi gerekebilir. Özel olarak, sıvılaşabilir katman ince ve üzerindeki katmanda ince ise, yukarıdaki sıvılaşma olasılığı olmayan zemin katmanının yer altı yatay reaksiyon katsayısının indirgenmesinin düşünülmesi uygundur.

Sürtünme kazıklarına göre, kazık yan yüzeyindeki kazık sürtünmesinin önemli ölçüde azalacağı aşikardır; bundan dolayı, sıvılaşabilir katman üzerindeki zemin katmanı için, kazık yan yüzeylerinin sürtünmesinin sıfır olacağı düşünülmelidir.

Tablo 5.1 Yatay yeraltı reaksiyon katsayısının indirgenme faktörü.

Sıvılaşma için düzeltme faktörü (F_L oranı)	Yer yüzeyine göre derinlik z (m.)	Yer altı yatay reaksiyon katsayısı indirgeme faktörü r_k			
		$N_a \leq 8$	$8 < N_a \leq 14$	$14 < N_a \leq 20$	$20 < N_a$
$F_L \leq 0.5$	$0 \leq z \leq 10$	0	0	0.05	0.1
	$10 < z \leq 20$	0	0.05	0.1	0.2
$0.5 < F_L \leq 0.75$	$0 \leq z \leq 10$	0	0.05	0.1	0.2
	$10 < z \leq 20$	0.05	0.1	0.2	0.5
$0.75 < F_L \leq 1.0$	$0 \leq z \leq 10$	0.05	0.1	0.2	0.5
	$10 < z \leq 20$	0.1	0.2	0.5	1.0

5.3 SONUÇ

Sıvılaşma analizleri üç farklı method kullanılarak yapılabilir: Seed methodu, Eurocode methodu ve Japon methodu. Methodların farklılığından dolayı sonuçlarda da bazı farklılıklar olmaktadır. Bu farklılıklar önceki bölümlerde şekillerle gösterilmiştir. Eğer bu şekiller dikkatlice incelenirse, Japon metodunun daha tutarlı sonuçlar verdiği görülebilir. Eğer malzeme özellikleri yatay düzlemde süreklilik arz ediyorsa sonuçlar ya tahmin edilenden daha az yada daha çok çıkmaktadır. Bu potansiyel bir tehlikedir. Başka bir deyişle sıvılaşma tahmini için belli bir bölge seçilir ve yalnızca o bölgeden toplanan bilgiler hesaplarda kullanılırsa yanlış sonuçlar verebilir. Sıvılaşma tahmini için bilgiler farklı bölgelerden toplanmış olmalıdır ve eğer mümkün ise zemin stokastik olarak modellenmeli ve zemin parametreleri makul sonuçlara ulaşabilmek için simüle edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Been, K., Lingnau, B. E., Crooks, L. H.A., Leach, B., **Cone Penetration Test Calibration for Erksak (Beafort Sea) Sand**, Can. Geotech. J., 24, pp. 601-610, 1987
- Bieganousky, W. A., and Marcuson, W. F., **Liquefaction Potential of Dams and Foundations, Report 2. Laboratory Standard Penetration Test on Platte River Sand and Standard Concrete Sand**, WES Report no. 76-2, Vicksburg, Mis., March, 1977
- Casagrande, A., **Characteristics of Cohesionless Soils Affecting The Stability of Earth Fills**, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol. 23, Pp. 256-286, Ocak, 1936
- Christian, J.T., and Swiger W. F., **Statistics of Liquefaction and SPT Results**, J. Geotech. Engin. Div., ASCE, vol. 101, no. GT11, pp. A1135-1150, Kasım, 1976
- DeAlba, P., Seed, H. B., Chan, C. K., **Sand Liquefaction in Large Scale Simple Shear Tests**, J. Geotech. Engin. Div., ASCE, vol. 102, no. GT9, pp. 909-927, 1976
- DeGroot, D. J., Baecher, G. B., **Estimating Autocovariance of In-Situ Soil Properties**, J. Geotech. Engin., ASCE, vol. 119, no. 1, pp. 147-166, January, 1993
- European Committee for Standardization, **Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects**, ENV 1998-5, October, 1994
- Fenton, G: A. And Vanmarcke. E. H., **Spatial Variation in Liquefaction Risk**, Geotechnique 48. No. 6, pp. 819-831, 1998
- Finn, W. D. L., **Assessment of Liquefaction Potential and Post-Liquefaction Behaviour of Earth Structures: Developments 1981-1991 (State-of-the-art paper)**, Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, vol. 3, pp. 1833-1850, 1991

- Finn, W.D.L., Bransby, P. L., and Pickering, D. J., **Effect of Strain History on Liquefaction of Sands**, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, vol 96, no. sm 6, pp.1917-1934, 1970
- Florin, V. A., and Ivanov, P. L., **Liquefaction of Saturated Sandy Soils**, Proc. I Fifth Int. Conf Soil. Mech. Found. Engin., Paris vol. 1, pp. 107-111, 1961
- Imai and Yoshimura, **Elastic Wave Velocity and Dynamic Characteristics of the Soft Ground**, Soils and Foundations, vol. 18, no. 1, pp. 17-22, 1970
- Jefferies, M. G., Stewart, H. R., Thompson, R. A. A., Rogres, B. T., **Molikpaq Deployment at Tarsiut P-45**, Proc. Conf. Arctic. 85, ASCE, San Francisco, pp. 1-27, 1985
- Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S., and Cotinho, R., **Evaluation of SPT, CPT, and Shear Wave Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data**, Proceedings, 4th U.S. - Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter Measures for Soil Liquefaction, vol. 1, pp 177-204, 1992
- Kramer, S. L., **Geotechnical Earthquake Engineering**, Prentice Hall, Washington, 1996
- Marchetti, S., **Detection of Liquefiable Sand Layers by Means of Quasi-Static Penetration Tests**, Proceedings, 2 nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, vol. 2, pp. 458-482, 1982
- Mitchell, J. K. and Tseng, D. J., **Assessment of Liquefaction Potential by Cone Penetration Resistance**, in J.M. Duncan ed., Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, Berkeley, California, vol. 2, pp. 335-350, 1990
- Ohasaki, Y., Hansen W. E., and Thornburn, T. H., **Foundation Engineering**, 2d ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974
- Prakash, S., **Soil Dynamics**, 1. Ed., McGraw-Hill, New York, 1981
- Prakash, S., and Gupta, M. K., **Compaction of Sand Under Vertical and Horizontal Vibrations**, Proc. First Southeast Asian Regional Conference on Soil Engineering, Bangkok, pp. 201-210, 1967

- Popescu, R., Prevost, J. H., and Geodatis, G., **Effects of Spatial Variability on Soil Liquefaction: Some Design Recommendations**, Geotechnique 47. No.5. pp. 1019-1036, 1997
- Port and Harbour Research Institute, **Handbook of Liquefaction Remediation of Reclaimed Land**, Balkema, Rotterdam, 1997
- Reyna, F. and Chameau, J. L., **Dilatometer Based Liquefaction Potential of Sites in the Imperial Valley, Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics**, St. Louis, Missouri, vol. 1, pp. 385-392, 1991
- Robertson, P. K., and Campanella, R. G., **Estimating Liquefaction Potential of Sands Using the Flat Dilatometer**, Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol. 9, no. 1, pp. 38-40, 1986
- Robertson, P. K., Campanella, R. E., **Interpretation of Cone Penetration Tests. Part I: Sand**, Can. Geotech. J., vol. 20, no. 4, pp. 718-733, November, 1983
- Robertson, P. K., and Campanella, R. G., **Liquefaction Potential of Sands Using The CPT**, J. Geotech. Engin., ASCE 111(3), 384-403, 1985
- Schmertmann, J. H., **Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design, Report No. FHWA-TS-78-209**, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1978
- Seed, H. B., **Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes**, J. Geotech. Engin. Div., ASCE, vol. 105, no. GT 2, pp. 201-255, February, 1979
- Seed, H. B., **Some Aspects of Sand Liquefaction Under Cyclic Loading, Conference on Behaviour of Off-Shore Structures**, The Norwegian Institute of Technology, Norway, 1976
- Seed, H., B., and Idriss, I. M., **Analysis of Soil Liquefaction, Niigata Earthquake**, J. Soil Mech. Found. Div, ASCE, vol. 93, no. SM 3, pp. 83-108, 1967
- Seed, H. B. and I. M. Idriss, **Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential**, J. Soil. Mech. Found. Div., ASCE, vol. 97, no. SM 9, pp. 1249-1273, 1971

- Seed, H. B., and Peacock, W. H., **Test Procedure for Measuring Soil Liquefaction Characteristics**, J Soil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 97, no. SM 8, pp. 1099-1119, August, 1971
- Seed, H. B., Idriss, I. M. And Arango, I., **Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data**, J. Geotech. Engin. . ASCE, vol. 109, no. 3. pp.458-482, 1983
- Seed, H. B., Arango, I., and Chan, C. K., **Evaluation of Soil Liquefaction Potential During Earthquakes**, Report no. EERC 75-28, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, October, 1975
- Seed, H. B., Mori, K., and Chan, C. K., **Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands**, J. Geotech. Engin. Div., ASCE, vol. 103, no GT 4, pp. 246-270, April, 1977
- Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M., and Makdisi, F. I., **The Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of February 9, 1971**, J. Geotech. Engin. Div., ASCE, vol. 101, no GT7, pp. 651-688, 1975
- Stark, T. D., and Olson, S.M., **Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories**, J. Geotech. Engin., ASCE, vol. 121, no. 12, pp. 856-869, Aralık, 1995
- Stokoe, K. H., Rosset, J. M. Bierschwale, J. G., and Aouad, M., **Liquefaction Potential of Sands from Shear Wave Velocity, Proceedings, 9 th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, vol. 3, pp. 213-218, 1988**
- Taner, M. T., CTDoherty, R. F., Koehler, F., **Long Period Multiple Suppression by Predictive Deconvolution in the x-t Domain**, Geophysical Prospecting, vol. 43, pp. 433-468, 1995
- Tang, W. H., **Principles of Probabilistic Characterization of Soil Properties. Probabilistic Characterization of Soil Properties: Bridge Between Theory and Practice**, ASCE, Atlanta, pp. 74-89, 1984
- Tokimatsu, K., Kuwayama, S., and Tamura, S., **Liquefaction Potential Evaluation Based on Rayleigh Wave Investigation and Its Comparison with Field Behaviour, Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, vol. 1, pp. 357-364, 1991**

William, H. P., Flannery, S. A., Vetterling, W. T., **Numerical Recipes: the Art of Scientific Computing**, Cambridge University Press, New York, 1986

Yang, C. Y., **Random Vibration of Structures**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986



ÖZGEÇMİŞ

1978`de İskenderun`da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi aynı şehirde tamamladım. 1996 yılında girdiğim Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi`nden, 2001 yılında, İnşaat Mühendisi ünvanıyla mezun oldum. 2003 yılı temmuz ayından beri İskenderun Demir ve Çelik A.Ş.`de şantiye şefi olarak görev yapmaktayım.

