

**DEPREM SEBEBİYLE ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN  
“BULANIK MANTIK MODELLEMESİ (FUZZY LOGIC MODELLING)”  
İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**UĞUR ŞAFAK ÇAVUŞ**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA 2004**

T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEPREM SEBEBİYLE ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN  
“BULANIK MANTIK MODELLEMESİ (FUZZY LOGIC MODELLING)”  
İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

UĞUR ŞAFAK ÇAVUŞ

DANIŞMAN : DOÇ. DR. S. NİLAY KESKİN

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA 2004

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda  
DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

ONAY

Bu tez S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu / /2004 tarih ve  
sayılı kararınca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından / /2004  
tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL  
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Tanıtılması ve Önemi.....	1
1.2.Sıvılaşmayı Kontrol Eden Faktörler.....	1
1.2.1. Sıvılaşmaya Tesir Eden BirincilFaktörler.....	1
1.2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden İkincil Faktörler.....	2
1.2.3. Sıvılaşmaya Ve Sıvılaşmanın Yapılara Olan Etkisini Kontrol Eden Üçüncül Faktörler.....	2
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	3
2.1. Sıvılaşmaya Etkiyen Birincil Faktörler.....	3
2.1.1. Zeminin Tane Boyutu, Dağılımı (Granülometrisi) ve Zemin Tipi.....	3
2.1.2. Sıklık, Boşluk Oranı ve Yoğunluk.....	5
2.1.3. Yeraltı Su Seviyesi.....	6
2.1.4. Gevşek Zemin Tabakasının Derinliği veya Çevre Basıncı.....	6
2.1.5. Deprem Büyüklüğü (Şiddeti) ve Tekrarlı Kayma Gerilmeleri.....	9
2.1.6. Sismik Titreşimin Süresi ve Tekrarlı Kayma Gerilmelerinin Çevrim Sayısı.....	9
2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden İkincil Faktörler.....	11
2.2.1 Zeminin Tipi, Yaşı, Mineralojisi ve Taneler Arası Çimentolanma.....	11
2.2.2 Yatay Toprak Basıncı Katsayısı ve Aşırı Konsolidasyon Oranı.....	12
2.3. Sıvılaşmaya ve Sıvılaşmanın Yapılara Olan Etkisini Kontrol Eden Üçüncül Faktörler.....	14
2.3.1 Sıvılaşabilen Tabaka Kalınlığı.....	14
2.3.2. Sıvılaşmayacak Geçirimsiz Zemin Tabakası Mevcudiyeti ve Kalınlığı.....	14
2.3.3. Arazinin Eğimli/Eğimsiz Olması.....	14

	<b>Sayfa</b>
2.3.4. Zeminin Geçmişinde Daha Önce Sıvılaşmış Olması.....	15
2.4. Bir Zemin Tabakasının Sıvılaşma Potansiyelini Belirleyen Yöntemler.....	15
2.4.1 Basitleştirilmiş ve İleri Dinamik Analiz Teknikleri ile Sıvılaşma Analizi.....	16
2.4.2. İstatistiki ve Yapay Sinir Ağları ile Sıvılaşma Riski Değerlendirmesi.....	22
2.4.3. Bulanık Mantık Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi.....	23
3. BULANIK MANTIK METODU.....	28
3.1. Giriş.....	28
3.2. Bulanık Kümeler.....	29
3.3 Başlıca Bulanık İşlemler ve Terimler.....	32
3.4. Bulanıklaştırma.....	33
3.5. Bulanık Sayılar.....	33
3.6. Üyelik Derecesi Atamaları.....	34
3.7. Kural Tabanı.....	34
3.8. Bulanık Çıkarım Mekanizması.....	36
3.9. Mamdani Bulanık Mantık Çıkarım Mekanizmasının Grafikselsel Olarak İfade Edilmesi.....	38
3.10. Durulaştırma İşlemleri.....	41
4. GEVŞEK SUYA DOYGUN KUM ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BULANIK MANTIK YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ.....	45
4.1 Giriş.....	45
4.2 Sıvılaşmaya Tesir Eden Önemli Parametrelerin Seçimi.....	47
4.3. $(N_1)_{60}$ , YASS, Zemin Derinliği, Deprem İvmesi ve Kayma Dalgası Hızı, (Vs) Arasında Üçlü Dağılımların ve Bulanık Alt Küme Aralıklarının Bulunması.....	56
4-4. Bulanık Alt Küme Fonksiyonlarının Bulunması.....	67
4-5 Bulanık Çıktı Kümesinin Oluşturulması.....	69
4-6 Bulanık Sıvılaşma Kuralları.....	70
5. SONUÇ.....	85
6.KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93
EKLER.....	94

	<b>Sayfa</b>
EK-1.....	95
EK-2.....	99

## ÖZET

Bir deprem anında, suya doymuş gevşek kum ve siltli kum zeminlerde boşluk suyu basınçları ani artış gösterir. Kum daneleri arasındaki kayma mukavemetini sağlayan efektif gerilme sıfır oluncaya kadar boşluk suyu basınçları artarsa, kumlu zeminlerde büyük hacim değişiklikleri meydana gelir. Sıvılaşma dediğimiz bu hadise bu tür zeminlerin üzerine oturtulmuş olan yapıların yıkılmasına, devrilmesine ve zemine gömülmesine sebep olduğundan büyük can ve mal kayıpları oluşturur. Bu nedenle suya doymuş gevşek bir kum zeminin sıvılaşma riskinin bilinmesi çok önem arz etmektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli üzerinde yoğun olarak yapılan çalışmalar otuz kırk sene öncesine kadar gitmektedir. Bu son kırk yıl içerisinde birçok yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerin çoğu, zaman alıcı, teknik zorlukları olan çokta pratik olmayan yoğun arazi ve laboratuvar çalışmalarını gerektirmektedir. Özellikle tekrarlı gerilmeler altında gevşek kum zeminlerin laboratuvar testini yapmak hem arazi şartlarını birebir laboratuvar ortamında sağlamak oldukça zordur ve pahalı yöntemleri gerektirmektedir. Ayrıca şimdiye kadar geliştirilen bu yöntemlerin hepsinde sıvılaşma potansiyelini tam tespit etmek noktasında bazı eksiklikler ve sınırlamalar vardır.

Bu tez çalışmasında gevşek kum depozitlerin sıvılaşma potansiyeli bulanık mantık modelleme yöntemi ile zor pahalı ve kompleks olan laboratuvar ve arazi çalışmalarına ihtiyaç olmaksızın sadece sıvılaşmada etkili birkaç arazi verisine dayanarak kısa zamanda tespit edilebilmektedir. Bulanık mantık teoremi, zemin sıvılaşması hadisesinde olduğu gibi belirsizliklerin hakim olduğu birçok parametrenin farklı şekillerde etki ettiği problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Tez çalışmasında ilk olarak, bütün dünyada deprem etkisiyle sıvılaşma olan yerlere ait arazi verileri literatür taraması yapılarak elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak arazi SPT değerlerinden bazı korelasyonlar vasıtasıyla kayma dalgası hızları elde edilmiştir. Sıvılaşma olan veya olmayan yerlere ait SPT değerlerinden sadece kum ve çakıl depozitler için verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanan zemin kayma dalgası hızları ve eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler içinde de gevşek kum ve çakıl depozitleri yaygın olarak temsil eden alt ve üst sınır eğrileri belirlenmiştir. Bundan sonra

Microsoft Excel' de sınıvlaşma da etken olan önemli parametrelerden düzeltilmiş SPT değeri, kayma dalgası hızı, yeraltı su derinliği, zemin derinliği ve deprem zemin yüzey ivmesi değerleri çizelge halinde özetlenerek sınıvlaşma olan ve olmayan veriler ayrılmış ve bunlardan, yukarda ki her bir parametrenin bulanık alt küme aralıklarının gerçeğe yakın olarak bulunabilmesi için üçlü ilişki grafikleri elde edilmiştir. Sınıvlaşmaya etki eden parametreler, literatürde genelde ikili korelasyonlar halinde verilmektedir. Halbuki üçlü ilişkiler, sınıvlaşmaya etki eden parametrelerin aralıkları hakkında daha doğru bir fikir vermektedir. Daha sonra bu elde edilmiş üç boyutlu grafikler değerlendirilerek bulanık alt kümeler ve bu kümelere ait fonksiyonları bulunmuştur. Sonra bulanık kurallar yazılarak sınıvlaşma yüzdeleri bulanık olarak elde edilmiştir. Sonuçta ise durulaştırma işlemi yapılarak sınıvlaşma yüzdeleri bulunmuştur. Sonuçlar arazi verileri ile karşılaştırıldığında bu tezde yapılan modellemenin çok uygun ve makul sonuçlar verdiği görülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Gevşek suya doymun kum ve siltli kum zeminler, deprem, sınıvlaşma, bulanık mantık.



## ABSTRACT

At the time of an earthquake, the pore water pressures in sand and silty sand soil deposits suddenly increase. If those additional pore pressures continue to increase up to a level where effective soil pressure becomes zero, then large volume changes in sandy deposits can occur. This phenomenon is called "liquefaction". When a soil liquefaction occurs structures tilt, fail, and sink in to the soil. So, the big loss of lives and properties can happen.

There have been many methods developed for learning the liquefaction potential of loose saturated sandy soils for thirty-fourty years. Almost all these methods depend on somehow complex field and laboratory tests and calculations. Also they have some inherit limitations.

Therefore, in this research, we used the fuzzy logic method to estimate the liquefaction potential of such soils without need of large scale complex laboratory test data and calculations. First of all, we obtained shear wave velocities using SPT data from liquefied and non-liquefied sites. Later on, we defined the most important parameters causing the liquefaction. After that, we obtained three dimensional graphics to define the fuzzy sets and functions for these parameters. Later fuzzy rules were written and fuzzy liquefaction potentials were obtained. At the end, defuzzification process were done.

When we compare the results that we found with the field data, we see that our modal runs very well.

**KEYWORDS:** Loose saturated sand and silty sand soils, earthquake, liquefaction, fuzzy logic.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Suya doygun gevşek kumlu zeminler deprem anında zemin sıvılaşması riski taşıdığından mühendislik yapıları için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Zemin sıvılaşması olan yerlerde binalar, köprüler, barajlar, su yapıları, endüstri yapıları, yollar vb. kolaylıkla tahrip olmakta, yıkılmakta ve taşıyıcı sistemlerini korusalar bile zemine gömülmektedir. Bu nedenlerle bu tür zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin önceden bilinmesi son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında sıvılaşmaya etki eden önemli zemin ve deprem parametreleri belirlenerek yoğun ve yorucu laboratuvar ve arazi çalışmalarına ve kompleks mühendislik hesaplarına ihtiyaç olmaksızın zemin sıvılaşma potansiyeli bulanık mantık modellemesi ile tespit edilmiştir.

Doktora çalışmam sırasında başlangıçtan sonuna kadar görüşlerinden istifade ettiğim ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç Dr. S. Nilay KESKİN'e teşekkür ederim. Ayrıca doktora çalışmam için her türlü teşviki yapan ve sabrı gösteren değerli eşim Aydan ÇAVUŞ 'a teşekkürü bir borç bilirim. Tezin yazılması aşamasında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Ziraat Yük. Müh. Ramazan ÇOMAK, İnş Yük. Müh Murat KİLİT ve İnş Yük Müh Hasan G. ÜSTÜN 'e ayrıca teşekkür ederim.

Uğur Şafak Çavuş

### Simgeler Dizini

M	Deprem büyüklüğü (magnitüdü)
G	Yer çekim ivmesi
$w_n$	Tabii su muhtevası
LL	Likit limit
Dr %	Rölatif yoğunluk
$a_{max}$	Maksimum deprem ivmesi
$\sigma_3, \sigma_c$	Çevre basıncı,
$\sigma_d$	Dinamik gerilme
$\sigma_{dp}$	Pik dinamik gerilme
Log N	Gerilme çevrim sayısı
$\sigma_v$	Düşey zemin basıncı
e	Boşluk oranı
SPT,N	Standart penetrasyon test değeri
CPT	Konik penetrasyon testi
$V_s$	Kayma dalgası hızı
BPT	Beker penetrasyon testi
$\tau_d$	Dinamik kayma gerilmesi
$\tau_{av}$	Averaj dinamik kayma gerilmesi
$\sigma'_{vo}$	Düşey efektif zemin basıncı
$R_d$	Başlangıç rölatif yoğunluk
$e_i$	Başlangıç boşluk oranı
$r_d$	Gerilme derinlik düzeltme faktörü
$K_o$	Yatay toprak basıncı katsayısı
AKO	Aşırı konsolidasyon oranı
$r_u$	Boşluk suyu basıncı
$\sigma'_c$	Efektif zemin çevre basıncı
CSR	Dinamik gerilme oranı
SPT $(N_1)_{60}$	%60 Enerji düzeltmesi yapılmış SPT değeri

$\tau/\tau_1$	Tekrarlı kayma gerilmesi oranı
$D_{50}$	%50 ince dane oranına tekabül eden dane çapı
$\sigma'_0$	Efektif düşey gerilme
$\sigma_0$	Toplam düşey gerilme
YASS	Yeraltı su seviyesi
$A_{1k}$	$x_1$ değişkeni (girişi)'nin bir bulanık alt kümesi
$A_{2k}$	$x_2$ değişkeni (girişi)'nin bir bulanık alt kümesi
$Q_m^i$	$y$ değişkeni (çıkışı)'nın bir bulanık alt kümesi
$\bar{u}_{Q_m}$	$Q_m$ bulanık çıkış kümesinin üyelik derecesi
$\bar{u}_{A_{1jp}(x_1)}$	$p$ kuralında, $A_{1j}$ bulanık kümesindeki $x_1$ değişkenin üyelik derecesi
$\bar{u}_{A_{2kp}(x_2)}$	$p$ kuralında, $A_{2k}$ bulanık kümesindeki $x_2$ değişkenin üyelik derecesi
$\bar{u}_{A_{1jq}(x_1)}$	$q$ kuralında, $A_{1j}$ bulanık kümesindeki $x_1$ değişkenin üyelik derecesi
$\bar{u}_{A_{2kq}(x_2)}$	$q$ kuralında, $A_{2k}$ bulanık kümesindeki $x_2$ değişkenin üyelik derecesi
$\phi_m$	Zadeh max-min işlemcisi
$\phi_c$	Mamdani min işlemcisi
$\phi_P$	Larsen çarpım işlemcisi
$\phi_a$	Aritmetik işlemci
$\phi_b$	Boolean işlemci
$\phi_{bp}$	Sınırlanmış (bağlı) çarpım
$\phi_{dp}$	Etkin çarpım işlemcisi
$\phi_s$	Standart dizi işlemcisi
$\phi_g$	Gödelian işlemcisi
$k$	Kural sayısı
$x_i$	İnput değişkeni
$R_i$	Kural numarası
$\alpha_i$	Kural ağırlık faktörü
$B$	Bulanık çıkış
$z^*$	Durulaştırma değeri
$\bar{u}_\zeta(z)$	Üyelik derecesi
$\Sigma$	Cebirsel toplam
$R_f$	Kayma oranı

FSLI	Sıvılaşma risk indeksi
$N_{60}$	% 60 enerji düzeltmesi yapılmış SPT değeri
$N_m$	Arazide ölçülmüş SPT değeri
$C_E$	Çekiç verimi (enerji) düzeltmesi (%60 için)
$C_B$	Delik çapı düzeltmesi
$C_S$	Numune kaşığı tipi düzeltmesi
$C_R$	Çubuk uzunluğu düzeltmesi
$C_N$	Derinlik düzeltme faktör
F%	İnce tane yüzdesi
D	Zemin derinliği
$\wedge$	Mamdani minimum işlemi
$\vee$	Mamdani maksimum işlemi
G	Kayma modülü
$\int$	Bulanık sürekli birleşim

## Şekiller Dizini

	<b>Sayfa</b>
Şekil.2.1. Sıvılaşma olasılığı olan zeminler için tane çapı dağılımı sınırları.....	3
Şekil.2.2. Düşük plastisiteli ince tane içeren kumların sıvılaşma üzerindeki etkisi...	4
Şekil.2.3. Rölatif sıklığın sıvılaşmaya olan etkisi.....	5
Şekil.2.4. Sacramento nehri kumunun sıvılaşmasında dinamik gerilmenin etkisi: (a) N=100 çevrimde sıvılaşma başlangıcı; (b) N=100 çevrimde %20 birim deformasyon.....	6
Şekil.2.5. Her hangi bir deprem durumunda sıvılaşmanın zor olduğu SPT değerleri..	7
Şekil 2.6. Sacramento nehri kumunun sıvılaşmasına yanıl basıncın etkisi.....	8
Şekil 2.7. a)Üç farklı yanıl basınç altındaki gevşek Monterey kumunun başlangıç sıvılaşmasını oluşturacak gerekli tekrarlı gerilme b)10 ve 100çevrimlerdeki göçmeye sebep olan gerekli tekrarlı gerilme üzerine yanıl basınç etkisi.....	11
Şekil 2.8. Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşmaya etkisi.....	13
Şekil 2.9. Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşmaya etkisi... ..	13
Şekil 2.10. Sismik geçmişin sıvılaşmaya etkisi.....	15
Şekil 2.11. Sıvılaşma olayları datasından elde edilen M=7.5 olan depremler için SPT temiz kum eğrileri.....	17
Şekil 2.12. CSR ve sıvılaşmaya sebep olan çevrim sayısı arasındaki temsili ilişki....	18
Şekil 2.13. CPT sıvılaşma verilerinin CSR veya CRR ile ilişkisi.....	19
Şekil 2.14. Sıvılaşma direnci ve taneli zeminler için kayma dalgası hızı ilişkileri....	20
Şekil 2.15. Kayma dalgası hızı kullanarak farklı deprem büyüklükleri için zemin sıvılaşması değerlendirme şeması.....	21
Şekil 3.1. Bulanık mantık model.....	29
Şekil 3.2. Klasik küme üyelik derecesi fonksiyonları.....	30
Şekil 3.3. Bulanık küme üyelik derecesi fonksiyonları.....	30
Şekil 3.4. Üyelik derecesi fonksiyonları.....	33
Şekil 3.5. Bulanık sayıların gösterimi.....	34
Şekil 3.6. Grafıksel Mamdani bulanık mantık çıkarım mekanizması.....	40
Şekil 3.7. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırması.....	41
Şekil 3.8. Ortalama en büyük üyelik yöntemi durulaştırması.....	42
Şekil 3.9. Toplamların merkezi durulaştırması.....	42

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.10. Ağırlık merkezi durulaştırması.....	43
Şekil 4.1. Farklı zeminler için kayma dalgası korelasyon eğrileri.....	53
Şekil 4.2. Granüler zeminler için kayma dalgası hız eğrileri.....	54
Şekil 4.3. Kumlar için kayma dalgası hızı alt ve üst sınır eğrileri.....	55
Şekil 4.4. SPT ( $N_1$ ) <sub>60</sub> , kayma dalgası hızı ( $V_s=80 N_m^{0.333}$ ) ve zemin derinliği ilişkisi (N: “Sıvılaşma yok” için).....	57
Şekil 4.5. SPT ( $N_1$ ) <sub>60</sub> , kayma dalgası hızı ( $V_s=80 N_m^{0.333}$ ) ve zemin derinliği ilişkisi (Y: “Sıvılaşma var” için).....	58
Şekil 4.6. SPT ( $N_1$ ) <sub>60</sub> için bulanık alt küme aralıkları.....	58
Şekil 4.7. Kayma dalgası hızı, $V_s$ için bulanık alt küme aralıkları.....	59
Şekil 4.8. Zemin derinliği için bulanık alt küme aralıkları.....	60
Şekil 4.9. Yer altı su seviyesi – zemin derinliği–ivme ilişkisi (N=Sıvılaşma yok)....	61
Şekil 4.10. Yeraltı suyu derinliği–zemin derinliği-ivme ilişkisi (Y=Sıvılaşma var)..	61
Şekil 4.11. Yer altı su derinliği bulanık alt küme aralıkları.....	62
Şekil 4.12. Deprem ivmesi bulanık alt küme aralıkları.....	62
Şekil 4.13. Düzeltilmiş SPT değeri ( $N_1$ ) <sub>60</sub> -kayma dalgası hızı ( $V_s=87 N_m^{0.36}$ )- zemin derinliği ilişkisi (N= Sıvılaşma yok).....	63
Şekil 4.14. Düzeltilmiş SPT değeri ( $N_1$ ) <sub>60</sub> -kayma dalgası hızı ( $V_s=87 N_m^{0.36}$ )- zemin derinliği ilişkisi (Y= Sıvılaşma var).....	64
Şekil 4.15. Düzeltilmiş SPT değeri- kayma dalgası hızı- yer altı suyu derinliği ilişkisi (N= Sıvılaşma yok).....	65
Şekil 4.16. Düzeltilmiş SPT değeri- kayma dalgası hızı- yer altı suyu derinliği ilişkisi (N= Sıvılaşma var).....	65
Şekil 4.17. SPT - zemin derinliği - yer altı suyu derinliği ilişkisi (N=Sıvılaşma yok).....	66
Şekil 4.18. SPT - zemin derinliği- yeraltı suyu derinliği ilişkisi (Y=Sıvılaşma var).66	66
Şekil 4.19. Sıvılaşma riski fuzzy alt grupları.....	69
Şekil 4.20. Mamdani çıkarım algoritması.....	76
Şekil 4.21. Diyagramatik Mamdani tip çıkarım.....	78
Şekil 4.22. Sayısal örnek için bulanık çıkış.....	83
Şekil 4.23. Sayısal örnek için durulaştırma işlemi.....	83

## Çizelgeler Dizini

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Geçmişteki depremler ve sıvılaşmaya etken parametreler.....	10
Çizelge 3.1. Bulanık Çıkarım Mekanizmaları.....	37
Çizelge 4.1. Değişik Zeminler İçin Kayma Dalgası Hızı Formülleri.....	49
Çizelge.4.2. Kayma Dalgası Hız Hesapları.....	51
Çizelge 4.3. SPT için Düzeltme Faktörleri.....	53
Çizelge 4.4. Ülkelere Göre $N_m$ Formülleri.....	54
Çizelge.4.5. Sıvılaşma Verilerinin Elde Edildiği Depremler.....	56
Çizelge 4.6. Bulanık Girişlerin Alt Kümeleri.....	70
Çizelge 4.7. Bulanık sıvılaşma kuralları.....	70
Çizelge 4.8. Üyelik dereceleri hesap özeti.....	80
Çizelge 4.9. $\alpha$ Ağırlık faktörleri.....	81
Çizelge 4.10. Maksimum $\alpha$ değerleri.....	82
Çizelge 4.11. Geliştirilmiş Bulanık Model Sonuçlarını Arazi Sıvılaşma Datası ile Mukayesesi.....	84



## 1. GİRİŞ

### 1.1 Konunun Tanıtılması ve Önemi

Gevşek suya doygun kum, siltli-kum veya çakıl zeminlerde görülen sıvılaşma olayının temel mekanizması; deprem etkisiyle, ana kaya formasyonundan kayma dalgalarının zemin yüzeyine doğru yayılması sonucunda meydana gelen tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisiyle aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmasıdır.

Gevşek suya doygun bir kum depozit, zemin titreşimlerine maruz kaldığında, sıkışma eğilimi ve hacimce küçülme gösterir. Suyun drenajı mümkün değilse, oluşan hacimdeki azalma eğilimi boşluk suyu basıncında artışa neden olur. Boşluk suyu basıncındaki bu artış düşey gerilmeye eşit olma noktasına erişirse, efektif gerilme sıfırlanır ve kum depoziti kayma mukavemetini tamamen kaybeder. Bu durumda sıvılaşma gelişir (Seed ve Idriss,1982).

Zemin sıvılaşması, sığ ve derin temeller üzerine oturan yapılara zarar verip onları tahrip edebilen en kötü deprem vakalarından birisidir. Ayrıca, yer altındaki elektrik, su gaz gibi hatlara zarar veren en tehlikeli deprem olayıdır. Özetle sıvılaşan yerlerde bulunan yapılar göçmekte veya zemine batmakta gaz hatları tahrip olup yangınlara sebebiyet vermekte veya şev kaymaları ile toprak kaymaları oluşmaktadır ( Rourke ve Pease, 1997). Ayrıca sıvılaşmanın neticesinde zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin ve derecesinin belirlenmesi, özellikle yerleşim alanlarında can ve mal güvenliğini korumak için çok önemlidir.

### 1.2 Sıvılaşmayı Kontrol Eden Faktörler

#### 1.2.1. Sıvılaşmaya Tesir Eden Birincil Faktörler

- Tane boyutu, dağılımı (granülometrisi) ve zemin tipi
- Zeminin sıklığı, yoğunluğu ve boşluk oranı

- Yer altı su seviyesi
- Gevşek zemin tabakasının derinliği veya çevre basıncı
- Deprem büyüklüğü (şiddeti) ve oluşan tekrarlı kayma gerilmeleri
- Sismik titreşimin süresi ve tekrarlı kayma gerilmelerinin çevrim sayısı

### **1.2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden İkincil Faktörler**

- Fabrik yapı
- Tane şekli
- Taneler arası çimentolanma
- Aşırı konsolidasyon oranı
- İnce tane yüzdesi

### **1.2.3. Sıvılaşmaya ve Sıvılaşmanın Yapılara Olan Etkisini Kontrol Eden Üçüncül Faktörler**

- Sıvılaşabilen tabaka kalınlığı
- Sıvılaşma potansiyeli üzerinde sıvılaşmayan zemin tabakası mevcudiyeti, kalınlığı ve zeminin drenaj durumu
- Arazinin eğim durumu
- Zeminin geçmişinde daha önce sıvılaşması
- Zeminin minerolojisi, yaşı

Güçlü bir depremde sıvılaşma riski çok yüksek olan zemin şartlarında dahi sıvılaşmanın olabilmesi için deprem yatay zemin yüzey ivmesinin 0.1g'yi geçmesi gerekmektedir (Ishihara, 1985 ve National Research Council, 1985). Bu yüzden sıvılaşma için 0.1g bir alt sınır olarak kabul edilebilir. Ayrıca geçmişte olan depremlerden elde edilen verilere göre sıvılaşmanın meydana gelmesi için, deprem büyüklüğü (M)'nin en az 5 olması gerekmektedir. Fakat sıvılaşmanın etkisinin yaygın olarak gözüktüğü en düşük deprem limiti  $M=5.5-6.0$  dır (Ambraseys, 1988).

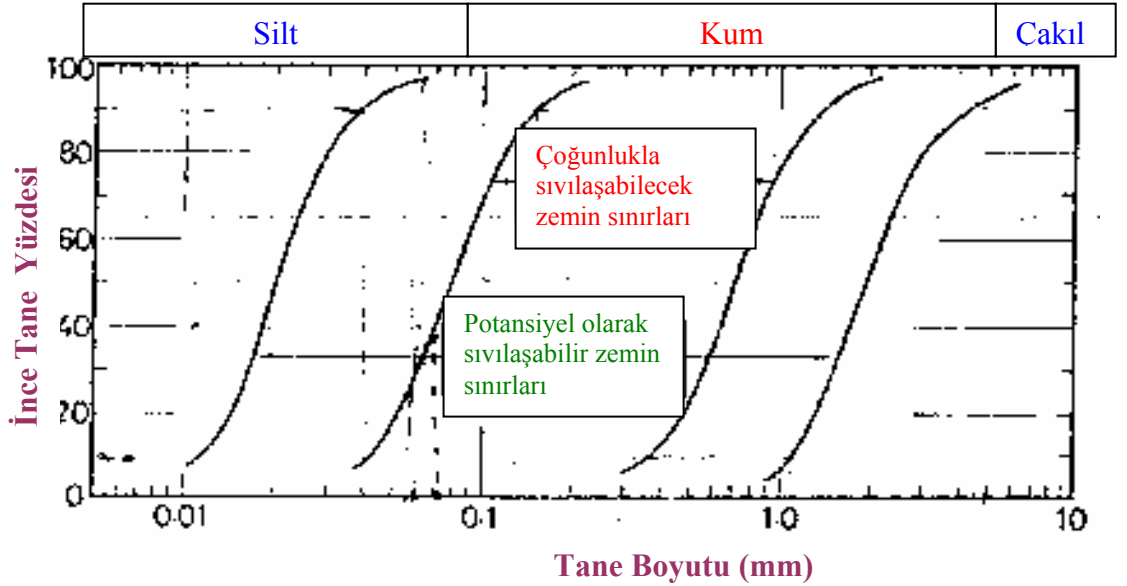
## 2. KAYNAK BİLGİSİ

### 2.1. Sıvılaşmaya Etkiyen Birincil Faktörler

Burada sıvılaşmaya etkiyen bir önceki bölümde bahsedilen birincil faktörlerle ilgili çalışmalar, ayrı alt başlıklar halinde kısaca anlatılmıştır.

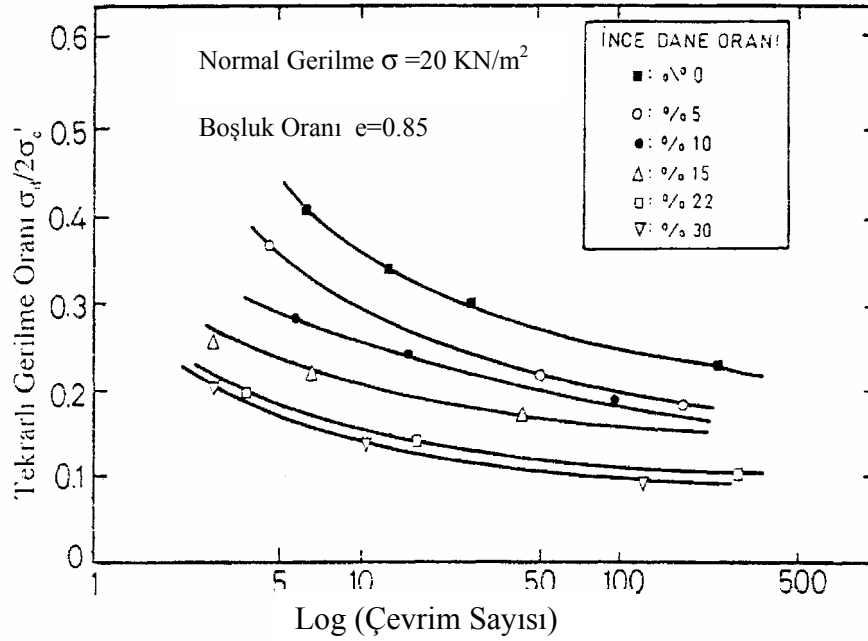
#### 2.1.1. Zeminin Tane Boyutu, Dağılımı (Granülometrisi) ve Zemin Tipi

Sıvılaşma, suya doymun gevşek kum zeminlerde daha kolay meydana gelmektedir. Sıvılaşma üzerinde, tane çapı dağılımının etkisini incelemek amacıyla, geçmişteki depremlerden elde edilen ve sıvılaşma olasılığı olan zeminler için verilen granülometri eğrileri Şekil.2.1’de görülmektedir (Tsuchida, 1970). Şekil 2.1’ den görüldüğü gibi, ince tane içeren kumların sıvılaşma olasılıkları ince tane içermeyen kumlara oranla daha fazla olmaktadır.



Şekil.2.1. Sıvılaşma olasılığı olan zeminler için tane çapı dağılımı sınırları (Tsuchida, 1970)

Sıvılaşma üzerinde ince tane oranının etkisini belirlemek için birçok laboratuvar testleri yapılmıştır. Troncoso ve Verdugo (1985), tarafından dinamik üç eksenli basınç deney aletinde düşük plastisiteli siltler üzerinde yapılan deney sonuçları Şekil 2.2 de verilmiştir. Şekilden, zeminde, plastik olmayan ince tane oranı arttıkça, mukavemette azalma olduğu görülmektedir. Siltli çok ince kum zeminler sıvılaşmanın en çok görüldüğü en riskli zeminlerdir. Kil veya silt taşıyan bir sedimentin sıvılaşması veya büyük mukavemet kayıplarına uğraması için, ancak 0.005 mm den küçük çaplı tane oranının malzeme miktarı %15 den az ve likit limit 35 den küçük ve tabii su muhtevası ( $w_n$ ) likit limitten büyük veya ona eşit ise ( $w_n \geq LL$ ) olmaktadır (Obermeier, 1996).



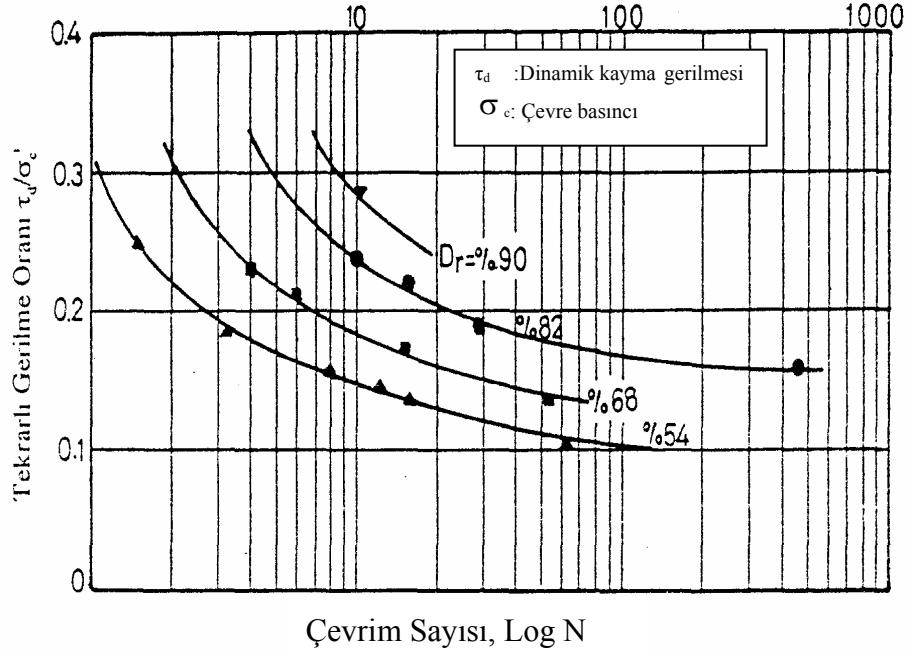
Şekil.2.2. Düşük plastisiteli ince tane içeren kumların sıvılaşma üzerindeki etkisi (Troncoso, 1985)

National Research Council (1985)'e göre, sıvılaşma riski; içerisinde en azından %5 oranında ince tane olan kum zeminlerde, hiç ince tane içermeyen temiz kumlara nazaran oldukça azdır. Çünkü bir deprem anında zeminde oluşan tekrarlı deformasyonlar sırasında, kil ve silt boyutlu tanelerin bulunması, daha iyi bir derecelenmenin ve gradasyonun olmasına ve tanelerin daha çok birbirine

kenetlenmesine sebebiyet vermektedir. Bu da tekrarlı yüklere karşı direnci artırmaktadır.

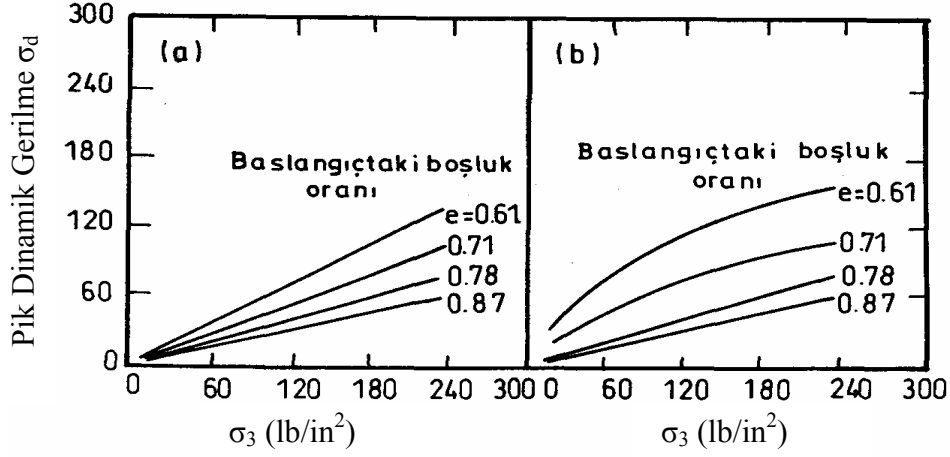
### 2.1.2. Sıklık, Boşluk Oranı ve Yoğunluk

Orta veya gevşek sıklıktaki kumlar, birçok durumlarda sıvılaşılabılırken çok sıkı kumların sıvılaşması için oldukça güçlü titreşimlerin olması gereklidir. Jeolojik oluşum ve çevre şartları ise zeminin yoğunluğuna direkt etki etmektedir. Mesela, rüzgarla taşınmış kum zemin tabakaları birçok durumda çok gevşektir. Hızlı akan akarsular da daha çok gevşek zemin oluşumlarına neden olur. Deltalar ise özellikle kalın ve gevşek tabakalaşma yerleridir. Şekil.2.3 te görüldüğü gibi rölatif sıklık ( $D_r$ ) değeri arttıkça, ön sıvılaşmaya ulaşmak için gerekli olan tekrarlı dinamik gerilmenin tekrar sayısı veya uygulanan kayma gerilmesi artmaktadır.



Şekil.2.3 Rölatif sıklığın sıvılaşmaya olan etkisi (Seed, 1976)

Şekil. 2.4.de görüldüğü gibi, sabit aynı çevre basıncı ( $\sigma_3$ ) altında, fakat farklı boşluk oranlarındaki ( $e$ ) numunelerde, sıvılaşmanın başlaması veya göçmenin oluşması için gerekli pik dinamik gerilme ( $\sigma_d$ ), boşluk oranı değeri arttıkça azalmaktadır.



Şekil.2.4 Sacramento nehri kumunun sıvılaşmasında dinamik gerilmenin etkisi:  
(a) N=100 çevrimde sıvılaşma başlangıcı; (b) N=100 çevrimde %20 birim deformasyon (Lee ve Seed, 1967)

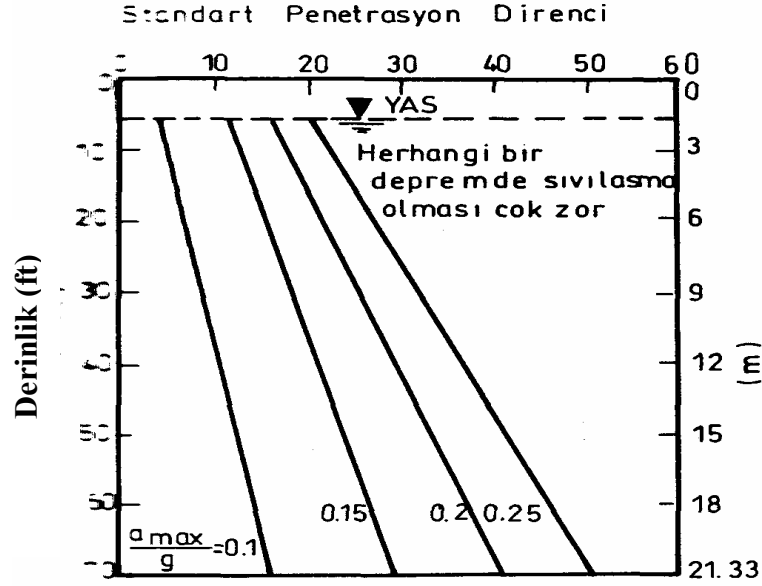
### 2.1.3. Yeraltı Su Seviyesi

Sıvılaşma riski, yeraltı suyu derinliği arttıkça azalır. Yeraltı suyu derinliğini sadece birkaç metre düşürmek bile, sıvılaşma riskini oldukça azaltabilmektedir. Yeraltı su seviyesi 3.0 m derinliğe kadar olan yerlerde sıvılaşma riski yüksek olmaktadır. Ancak, yeraltı su seviyesi 15 - 20 m derine indiğinde dahi sıvılaşma olayı görülebilmektedir.

### 2.1.4. Gevşek Zemin Tabakasının Derinliği veya Çevre Basıncı

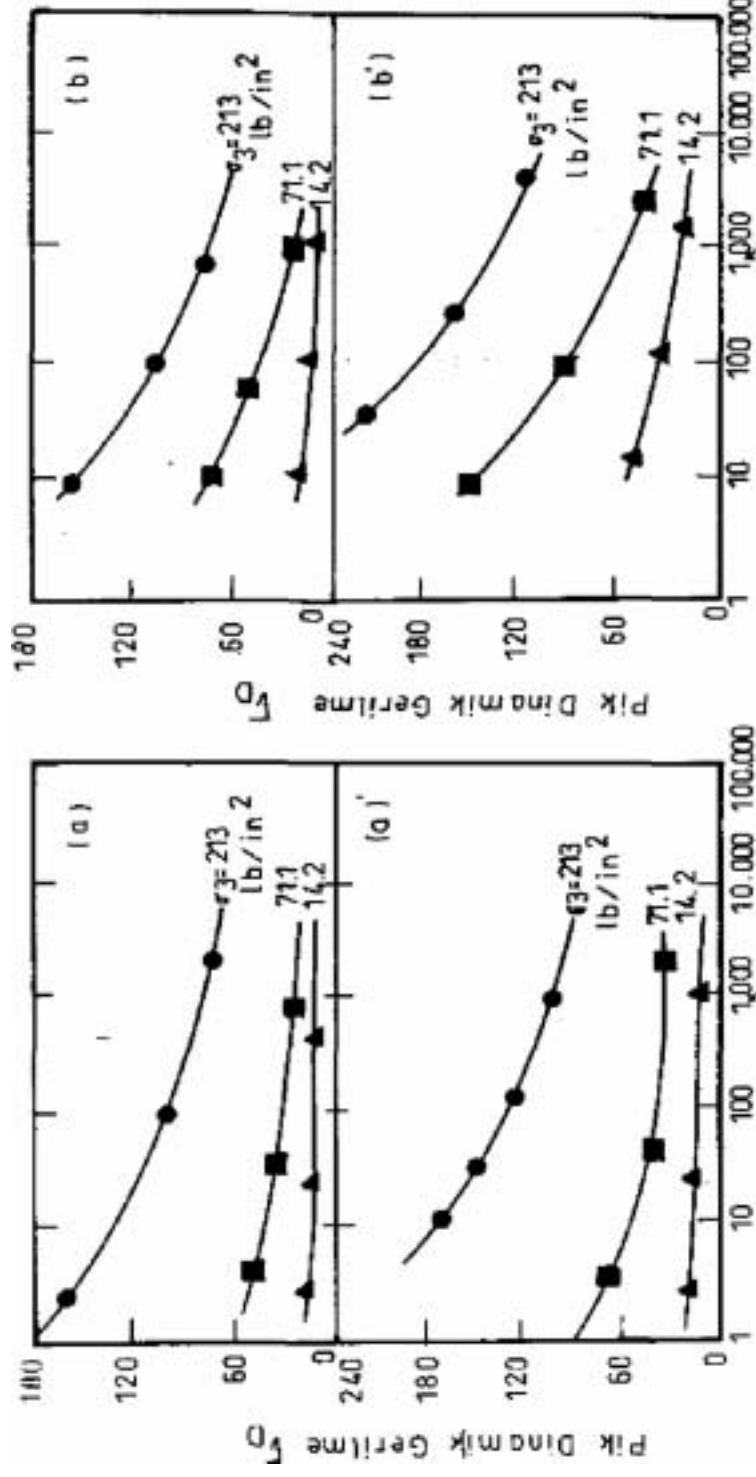
Zemin tabakasının derinliği arttıkça, sıvılaşmanın gelişmesi yavaşlamakta veya sıvılaşma riski azalmaktadır. Çünkü, yüksek statik düşey efektif gerilme, zeminin kesmeye ve kayma deformasyonlarına karşı olan direncini oldukça artırır. Deprem

titreşimleri etkisiyle sıvılaşma çoğunlukla ilk 10.0 m içerisinde olmaktadır. Fakat Seed 20 m ye kadar sıvılaşmanın olabileceğini rapor etmiştir (Şekil.2.5).



Şekil.2.5 Her hangi bir deprem durumunda sıvılaşmanın zor olduğu SPT değerleri (Seed ve Idriss, 1971)

Sıvılaşmanın olması veya göçme meydana gelmesi için, çevre basıncı daha fazla olan bir kum için, sabit bir periyot değerinde daha yüksek pik dinamik gerilme değeri uygulamak gerekir. Diğer bir deyişle, aynı çevrim sayısında gevşek kumda sıvılaşma başlaması için, Şekil.2.6 da görüldüğü gibi gerekli dinamik gerilme genliği, sıkı kum için gerekli olandan daha küçük olmaktadır.



N (Cevrim Savisi)

N (Cevrim Savisi)

Şekil 2.6 Sacramento nehri kumunun sıvılaşmasına yanal basıncın etkisi; (a,a') Başlangıç sıvılaşması; (b,b') 520 birim deformasyon; (a,b)  $e=0.71$ ,  $R_D=0.78$ ; (a',b')  $e=0.61$ ,  $R_D=0.61$  (Lee ve Seed, 1967)



### 2.1.5. Deprem Büyüklüğü (Şiddeti) ve Tekrarlı Kayma Gerilmeleri

Sıvılaşma oluşması için gerekli deprem büyüklüğü en az  $M=5$  dir. Fakat sıvılaşmanın etkisinin yaygın olarak gözüküğü en düşük deprem limiti 5.5-6.0 dır (Ambrasays, 1988).

Sıvılaşmayı kontrol eden başlıca sismolojik faktörler şunlardır:

- Tekrarlı kayma gerilmelerinin büyüklüğü (genliği)
- Kayma gerilmelerinin uygulama sayısı yani periyodu

Bu iki faktör ise, pik yüzey ivmesi ve titreşim süresi ile ilgilidir. Çakıl depozitlerde sıvılaşma olması için minimum  $M=7.0$  şiddetinde bir deprem olması gerekir. Fakat kumlar için bu  $M=5.5$  dir. İçinde %30-50 den fazla çakıl olan kum-çakıl depozitler dahi sıvılaşabilir. Fakat kum depozitlere göre bu tür zeminlerde sıvılaşma olma olasılığı daha düşüktür. Çünkü yüksek çakıl oranı içsel sürtünme direncini artırır. Eğer sedimentin %80'i 0.7 mm den daha büyük çaplı tanelerden oluşmuşsa, o zaman yüksek permabiliteden ötürü sıvılaşmanın başlama riski azalır.

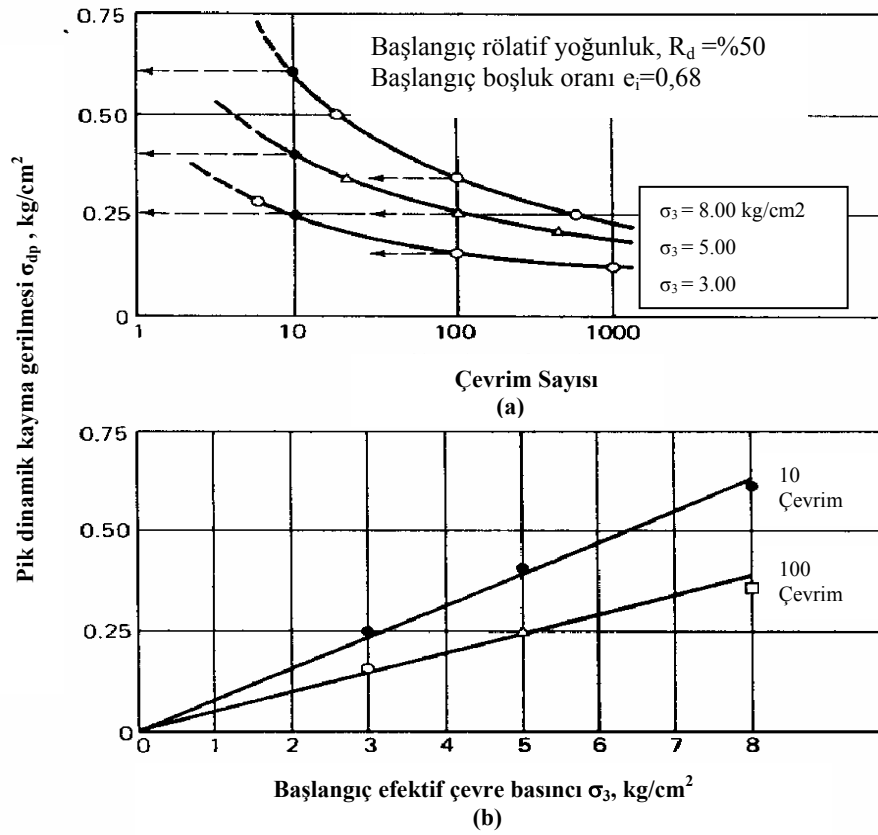
### 2.1.6. Sismik Titreşimin Süresi ve Tekrarlı Kayma Gerilmelerinin Çevrim Sayısı

Sıklığı aynı olan zeminlerde sismik titreşimin süresi ve pik ivme değeri arttıkça, sıvılaşma riski de artmaktadır. Bu durum Çizelge 2.1. den görülebilir. Sıklığı birbirinden farklı olan zeminlerde esas sıvılaşmaya etken faktör, zeminin sıklık oranı olup, aynı magnitüd, aynı ivme ve aynı sismik titreşim süresi veya periyodu altında, daha gevşek olan zeminler daha çok sıvılaşma riskine sahiptir. Şekil.2.7. de gevşek kum zeminler üzerinde gerçekleştirilen test sonuçları görülmektedir. Şekilden de açık olduğu gibi, sabit bir başlangıç efektif çevre basıncı ve boşluk oranı için, sıvılaşmaya neden olacak gerekli dinamik kayma gerilmesi genliği, dinamik gerilme çevrim sayısı arttıkça düşer. Yani çevrim sayısı düşükse sıvılaşmayı başlatmak için daha büyük dinamik gerilme uygulanması gereklidir.

Çizelge 2.1. Geçmişteki depremler ve sıvılaşmaya etken parametreler  
(Valeria ve Donowan, 1977)

Depremler			Sıvılaşma Değerlendirmesi				Rapor Edilen Sonuçlar
			Parametreler				
No	İsim	Yıl , M	% Dr	$a_{max}/g$	Periyot (sn)	Deprem Süresi (sn)	
1	NIIGATA	(1806, M=6.6)	0.53	0.12	0.80	20.00	Yok
2	NIIGATA	(1806, M=6.6)	0.64	0.12	0.80	20.00	Yok
3	NIIGATA	(1887, M=6.1)	0.53	0.12	0.80	12.00	Yok
4	NIIGATA	(1887, M=6.1)	0.64	0.08	0.80	12.00	Yok
5	MİNO OWARİ-OGAKİ	(1891, M=8.4)	0.65	0.35	1.00	75.00	Var
6	MİNO OWARİ-GİNAN WEST	(1891, M=8.4)	0.55	0.35	1.00	75.00	Var
7	MİNO OWARİ-UNUMA	(1891, M=8.4)	0.75	0.35	1.00	75.00	Var
8	MİNO OWARİ-OGASE POND	(1891, M=8.4)	0.72	0.35	1.00	75.00	Var
9	EL CENTRO-BRAWLEY	(1940, M=7.0)	0.50	0.275	0.50	30.00	Var
10	EL CENTRO-ALL-AM	(1940, M=7.0)	0.43	0.25	0.50	30.00	Var
11	EL CENTRO- SOLFATARA C.	(1940, M=7.0)	0.32	0.25	0.50	30.00	Var
12	TOHNANKAI-KOMEI	(1944, M=8.3)	0.40	0.08	1.00	70.00	Var
13	TOHNANKAI-MEIKO ST.	(1944, M=8.3)	0.30	0.08	0.50	70.00	Var
14	FUKUI-TAKAYA	(1948, M=7.2)	0.72	0.30	0.60	30.00	Yok
15	FUKUI-TAKAYA	(1948, M=7.2)	0.90	0.30	1.00	30.00	Var
16	FUKUI-SHONENJI TEMPLE	(1948, M=7.2)	0.40	0.30	1.00	30.00	Var
17	FUKUI-AGR. UNION	(1948, M=7.2)	0.50	0.30	1.00	30.00	Var
18	SAN FRANCISCO -LAKE MERCED	(1957,M=5.5)	0.53	0.18	0.50	18.00	Var
19	CHILE-PUERTO MONTT	(1960,M=8.4)	0.50	0.15	1.00	75.00	Var
20	CHILE-PUERTO MONTT	(1960,M=8.4)	0.55	0.15	1.00	75.00	Var
21	CHILE-PUERTO MONTT	(1960,M=8.4)	0.75	0.15	1.00	75.00	Yok
22	NIIGATA	(1964, M=7.5)	0.53	0.16	0.80	40.00	Var
23	NIIGATA	(1964, M=7.5)	0.70	0.16	0.80	40.00	Var
24	NIIGATA	(1964, M=7.5)	0.64	0.16	0.80	40.00	Yok
25	NIIGATA	(1964, M=7.5)	0.53	0.16	0.80	40.00	Yok
26	ALASKA	(1964,M=8.3)	0.50	0.15	2.00	180.00	Var
27	ALASKA -SNOW RİVER	(1964,M=8.3)	0.44	0.15	2.00	180.00	Var
28	ALASKA-QUARTZ CREEK	(1964,M=8.3)	1.00	0.12	2.00	180.00	Yok
29	ALASKA -SCOTT GLACİER	(1964 M=8.3)	0.65	0.16	2.00	180.00	Var
30	ALASKA -VALDEZ	(1964,M=8.3)	0.68	0.25	2.00	180.00	Var
31	TOKACHIOKI-HACHINOHE	(1968, M=7.8)	0.78	0.21	1.00	45.00	Yok
32	TOKACHIOKI-HACHINOHE	(1968, M=7.8)	0.58	0.21	1.00	45.00	Var
33	TOKACHIOKI-HACHINOHE	(1968, M=7.8)	0.80	0.21	1.00	45.00	Yok
34	TOKACHIOKI-HAKODATE	(1968, M=7.8)	0.55	0.18	1.00	45.00	Var
35	SANTA BARBARA-SHEFFİED DAM.	(1925,M=6.3)	0.40	0.20	0.50	15.00	Var
36	CARACAS-CARA BALLEDA	(1967,M=6.3)	0.60	0.13	0.50	15.00	Var
37	SAN FERNANDO -JUVENİLE HALL	(1971,M=6.6)	0.30	0.40	0.40	15.00	Var
38	SAN FERNANDO -JENSEN PLANT	(1971,M=6.6)	0.58	0.35	0.40	15.00	Var
39	CHILE-HUACHIPATO	(1960,M=8.4)	1.00	0.25	0.50	75.00	Yok
40	CHILE-HUACHIPATO	(1960,M=8.4)	1.00	0.25	0.50	75.00	Yok
41	KERN COUNTY KERN STATION	(1952,M=7.7)	0.58	0.25	0.25	30.00	Yok

$a_{max}/g$  : maksimum ivme; M: Deprem Büyüklüğü ; % Dr: Rölatif Yoğunluk



Şekil 2.7 a) Üç farklı yanal basınç altındaki gevşek Monterey kumunun başlangıç sıvılaşmasını oluşturacak gerekli tekrarlı gerilme b) 10 ve 100 çevrimlerdeki göçmeye sebep olan gerekli tekrarlı gerilme üzerine yanal basınç etkisi

## 2.2. Sıvılaşmaya Etki Eden İkincil Faktörler

Sıvılaşmaya etki eden ikincil faktörler aşağıda özetlenmiştir.

### 2.2.1 Zeminin Tipi, Yaşı, Mineralojisi ve Taneler Arası Çimentolanma

Sedimentin tipi ve yaşı bir granüler zemin depozitinin yoğunluğunu, çimentolanma derecesini, deprem enerjisini transfer etme yeteneğini ve hidrolik geçirgenliği etkiler. Zemin tanelerinin boyutu, şekli, taneler arası yerleşim düzeni, yatay olarak devamlılığı ve hidrolik iletkenliği; sedimentin depolandığı çevresel etkilerin bir fonksiyondur. Tane boyutu, tane şekli, taneler arası yerleşim ve hidrolik iletkenlik sıvılaşma riskine tesir eden faktörlerdendir. Mesela gevşek, hidrolik iletkenliği az

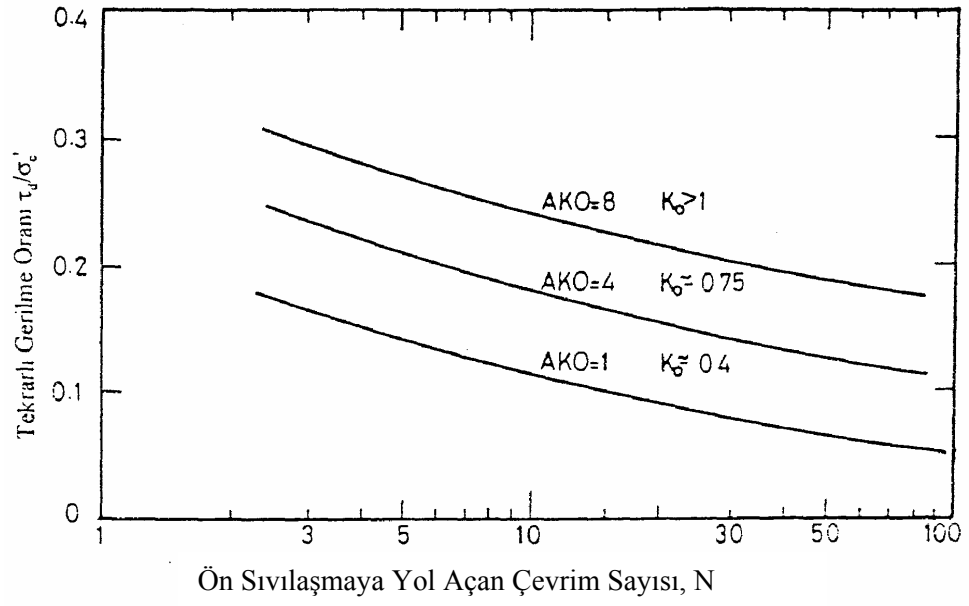
olan, çakıl boyutundan küçük ince kum ve silt zeminlerde sıvılaşma riski daha fazladır (Knudsen ve diğerleri, 2000).

Zayıfça asitik (organik asitler gibi) olan, yeraltı su seviyesi yüksek yerlerde, yer altı suyu kuartz kaynaklı kumlarda çimentolanmayı önemli ölçüde engeller. Sıvılaşma riskinin zaman içerisinde değişimi; yeraltı suyu derinliğindeki dalgalanmalara ve suyun kimyasal özelliklerine oldukça bağlıdır. Yeraltı suyu derinliğinin çok fazla inip çıktığı yerlerde kimyasal reaksiyonlar oluşabilir. Ayrıca, kildeki hidrolik sızmaların sonucu olarak, zemin taneleri arasında bağlanmalar ve kilitlemeler olabilir veya asidik ortamda çimentolanma zayıflayabilir. Bütün bu şartlar ise sıvılaşma riskini azaltır veya artırır (Obermeier, 1996).

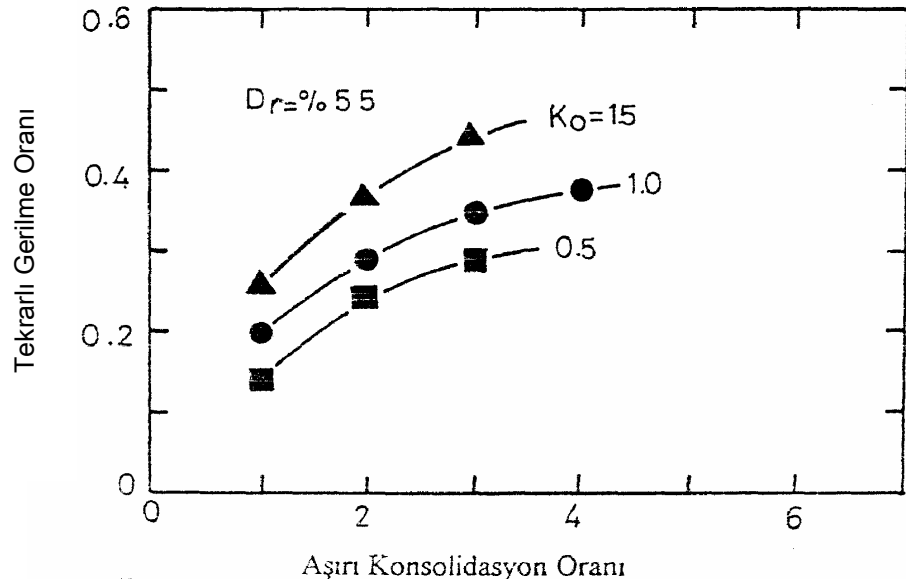
Seed (1979), Youd ve Perkins (1978), ve Youd ve Hoose (1977), gibi araştırmacılar, depozitlerin jeolojik yaşı arttıkça, zemin yoğunluğunun, taneler arası çimentolanmanın, kilitlemenin ve sıvılaşma direncinin artacağını ifade etmişlerdir. Genellikle birkaç bin yaşında olan genç depozitlerin daha yaşlı olan Holosen sedimentlere göre sıvılaşma riski daha fazladır. Pleistosen Sedimentler ise Holosen Sedimentlere kıyasla sıvılaşmaya daha dirençlidir. Pleistosen öncesi depozitlerde ise hemen hemen sıvılaşma olmaz. Fakat jeolojik yaş arttıkça sıvılaşma direncinin mutlaka artacağı söylenemez. Bazı Holosen yaşlı genç depozitlerde sıvılaşma olmazken bazılarında sıvılaşma olduğu veya bazı daha genç depozitlerde sıvılaşma gözükmezken pleistosen gibi çok daha yaşlı depozitlerde sıvılaşma olduğu rapor edilmiştir. Bu sebeple basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli analizlerinde depozit yaşına bağlı olan bir düzeltme faktörü geliştirilmemiştir (Youd ve İdriss, 1996-1998).

### **2.2.2 Yatay Toprak Basıncı Katsayısı ve Aşırı Konsolidasyon Oranı**

Yatay toprak basıncı katsayısı (  $K_0$  ) arttıkça, ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranları daha fazla artmaktadır (Şekil 2.8). Ayrıca Şekil 2.9'da görüldüğü gibi aşırı konsolidasyon oranı (AKO)'nın artmasıyla da sıvılaşma direnci artmaktadır (Alhas, 1994).



Şekil 2.8 Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşmaya etkisi (Seed, 1976)



Şekil 2.9 Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşmaya etkisi (Ishihara ve Takatsu, 1979)

Tekrarlı yüklemeli laboratuvar test verileri; sıvılaşma direncinin, çevresel (yanal) basınç arttıkça arttığını göstermektedir. Fakat bu artış lineer olmayıp non-lineerdir. Yatay efektif toprak basıncının düşey efektif basınca veya toplam düşey toprak basıncına olan oranı arttıkça, sıvılaşma riski azalmaktadır (Seed, 1983) ve (Youd vd,1996-1998).

### **2.3. Sıvılaşmaya Ve Sıvılaşmanın Yapılara Olan Etkisini Kontrol Eden Üçüncül Faktörler**

Sıvılaşma ve sıvılaşmanın yapılara olan etkisini kontrol eden üçüncül faktörler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

#### **2.3.1 Sıvılaşabilen Tabaka Kalınlığı**

Kumlu zeminler, ince taneli silt ve kil zeminlere göre daha geçirimlidir. Ancak, geçirimli bir kum zemin tabakası kalın ve geniş ise bu durumda drenaj yolu uzayacağından, bir deprem anında oluşan ani yükleme altında, bu tür zeminler drenajsız zemin tabakası gibi davranabilir ve sıvılaşma riski artar (Prakash, 1980) ve (Ishihara, 1980)

#### **2.3.2. Sıvılaşmayacak Geçirimsiz Zemin Tabakası Mevcudiyeti ve Kalınlığı**

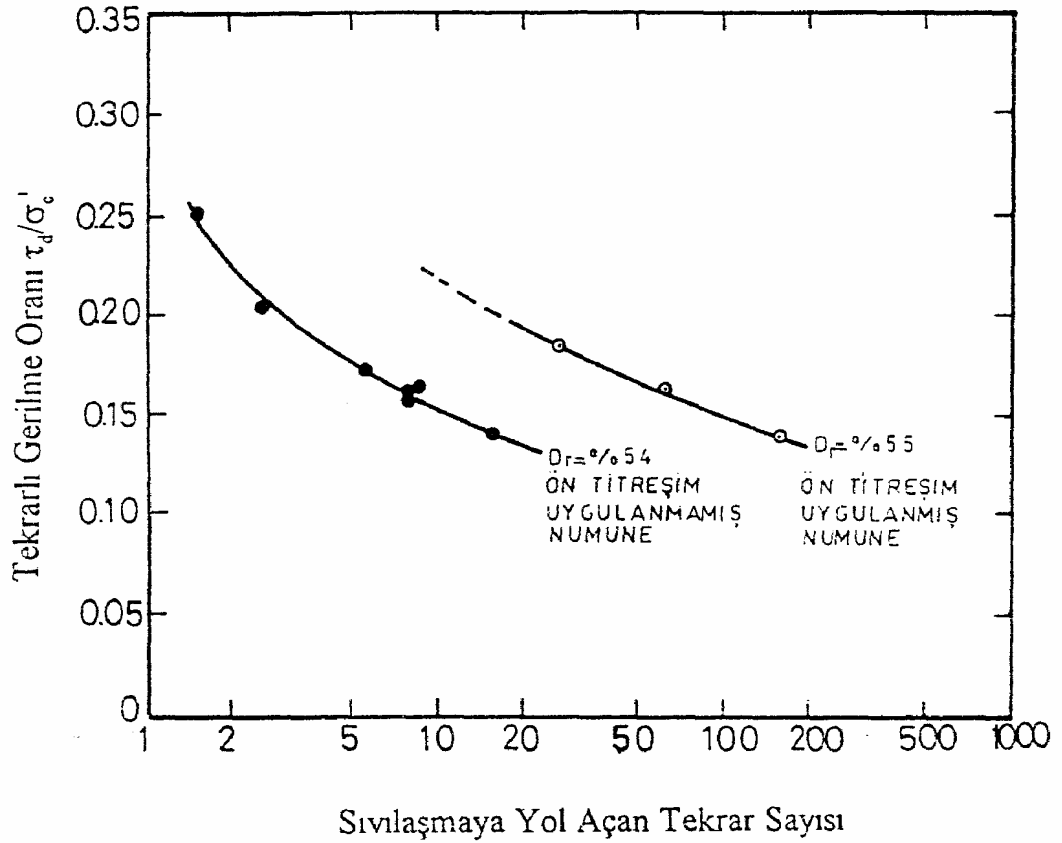
Sıvılaşabilir bir zemin tabakası üstünde sıvılaşmaz kalın bir tabaka varsa, bu bir deprem anında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının yukarı yönde boşalmasını engelleyeceğinden, sıvılaşma riskini artırır (Obermeier, 1996).

#### **2.3.3. Arazinin Eğimli/Eğimsiz Olması**

Eğimli zemin tabakalarının sıvılaşma riski eğimsiz-düz zeminlere kıyasla daha fazla olmaktadır. Gevşek ve orta sıkılıktaki, yüksek yanal basınç altındaki eğimli (şevlere yakın) zemin elemanlarında statik kayma gerilmesi artmakta ve bu yüzden sıvılaşma direnci daha az olmaktadır (Youd ve Idriss,1996;1998).

### 2.3.4. Zeminin Geçmişinde Daha Önce Sıvılaşmış Olması

Şekil 2.10. da görüldüğü gibi, geçmişte deprem etkisi altında kalmış kum tabakalarının sıvılaşmaya karşı dirençleri artmaktadır (Sancar, 1995; Alhas, 1994).



Şekil 2.10. Sismik geçmişin sıvılaşmaya etkisi (Seed, 1976)

### 2.4 Bir Zemin Tabakasının Sıvılaşma Potansiyelini Belirleyen Yöntemler

Bir zemin tabakasının sıvılaşma potansiyeli başlıca şu metotlarla belirlenir:

- Zemin tabakasında oluşacak tekrarlı dinamik kayma gerilmelerinin ve bu gerilmelerden önemli olanlarının tekrar sayısının hakim periyodu ve zamana bağlı yayılımının hesaplandığı, basitleştirilmiş metotlar.

- Zemin davranış modellemesi ile bir zemin depozitinde oluşacak tekrarlı kayma gerilmelerin hesaplandığı, ileri dinamik analiz metotları.
- Geçmiş depremlerde sıvılaşma olan veya olmayan yerlerin zemin ve deprem parametrelerinin karşılaştırılmasına dayanan ampirik metotlar.

1.ve 2. tür metotlarda, sıvılaşmaya neden olacak tekrarlı kayma gerilmelerinin elde edilmesi için, bozulmamış zemin numuneleri üzerinde laboratuvar veya arazi deneylerinin yapılması zorunludur. Bu veriler genellikle uygulanan tekrarlı kayma gerilmesinin, düşey efektif basınca olan oranı şeklinde verilmektedir. Bu oran, sıvılaşmayı oluşturacak gerekli kayma gerilmesi sayısı veya hakim olan tekrarlı birim deformasyon sayısı ile ilişkilendirilmektedir. Sonra bu tekrarlı kayma gerilme oranı değerleri, arazi deneyleri ile ilişkilendirilmektedir (Seed ve Lee, 1966; Seed ve Idriss, 1971;1979; Kayabalı, 1996).

#### **2.4.1 Basitleştirilmiş ve İleri Dinamik Analiz Teknikleri ile Sıvılaşma Analizi**

Basitleştirilmiş yöntemler ile ileri analiz teknikleri kullanılarak, sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü değerinin hesaplanmasında önce sıvılaşmanın oluşması için gereken tekrarlı kayma gerilmesi değerleri, laboratuvar deneylerinden bulunur. Sonra bunlar, arazide, deprem anında oluşacak kayma gerilmeleri ile karşılaştırılır. Basitleştirilmiş yöntemlerde sıvılaşmaya neden olacak tekrarlı kayma gerilmesi oranı; genellikle, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), konik penetrasyon deneyi (CPT), kayma dalgası hızı yöntemi ( $V_s$ ) ve Becker penetrasyon deneyi (BPT) verileri ile ilişkilendirilmektedir.

##### *SPT Metodu:*

Standart penetrasyon testine dayalı sıvılaşma direnci değerlendirmesi, Şekil.2.11 deki grafik kullanılarak yapılmaktadır. SPT  $(N_1)_{60}$  datası, yaklaşık  $M=7.5$  büyüklüğündeki depremlerde sıvılaşma olan ve olmayan yerlerden elde edilen sonuçlar olup, bu sonuçlar önce yaklaşık 100 kpa lık düşey toprak basıncı ile normalize edilmiş sonra SPT enerjisi oranı %60'a göre düzeltilmiştir. Sonra, grafikteki tekrarlı gerilme oranı



(CSR), % 60 enerji düzeltmesi yapılmış SPT ( $N_1$ )<sub>60</sub> verileri ile ilişkilendirilmiştir. Eşitlik 2.1 kullanılarak veya zemin dinamik davranış modellenmesi yapılarak

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} r_d \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

elde edilebilir. Burada;

$a_{max}$  : Maksimum deprem yüzey ivmesi,  $m/s^2$

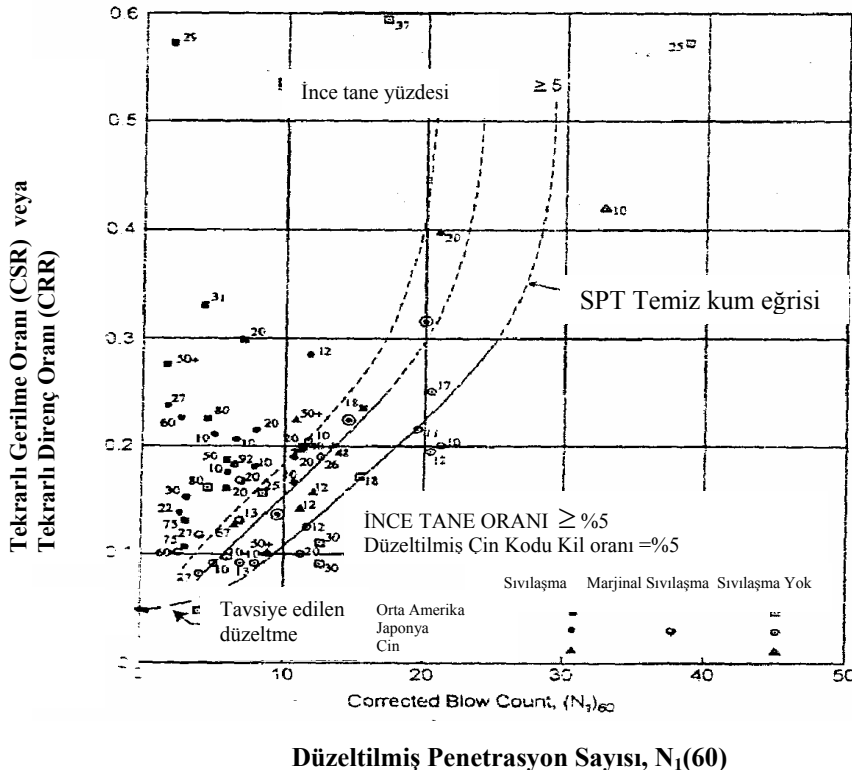
$\tau_{av}$  : Ortalama dinamik kayma gerilmesi, kPa

$\sigma_{vo}$  : Düşey gerilme, kPa

$\sigma'_{vo}$  : Düşey efektif gerilme, kPa

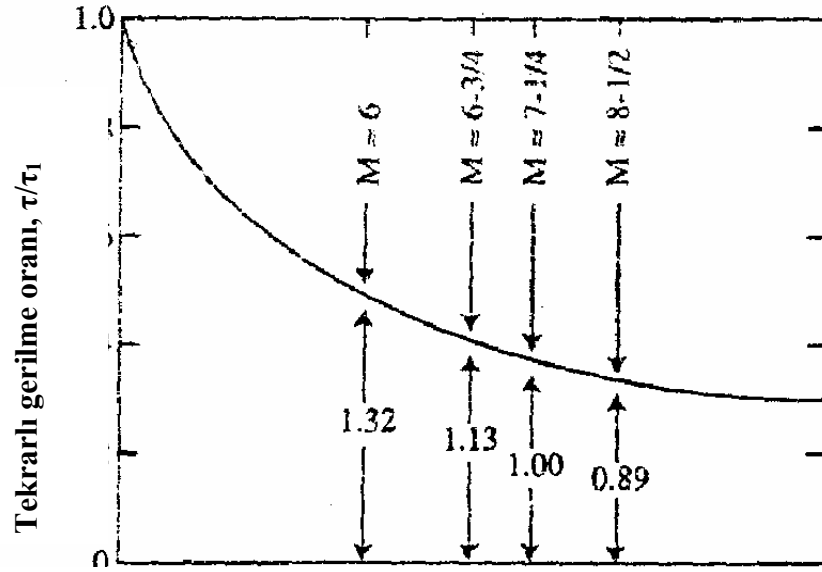
$g$  : Yerçekimi ivmesi,  $m/s^2$

$r_d$  : Gerilmenin derinlikle azaltma katsayısıdır,



Şekil 2.11 Sıvılaşma olayları datasından elde edilen  $M=7.5$  olan depremler için SPT temiz kum eğrileri (Seed ve arkadaşları, 1985)

Şekil 2.11. deki eğriler %5'e eşit veya daha az, %15 ve % 35 oranında ince tane içeren kum zeminler için geliştirilmiştir. Deprem magnitudü 7.5 dan farklı olan depremler için, tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR), magnitudü düzeltme faktörleri ile düzeltilmektedir. Magnitudü (M) düzeltme faktörleri, Şekil 2.12 den elde edilmiştir (Youd ve Idriss, 2001)

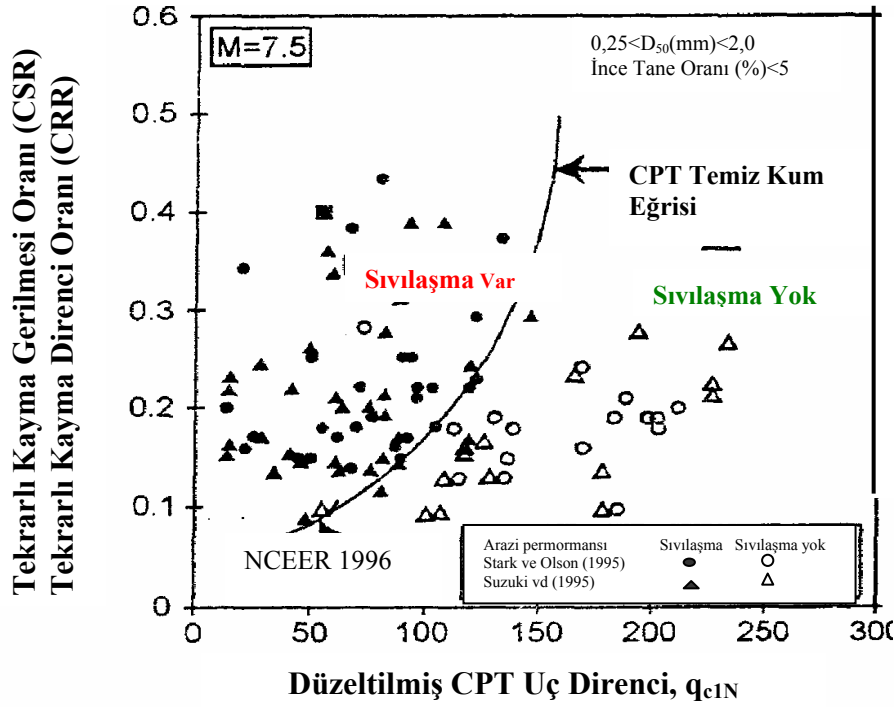


$r_u = \%100$  ve  $\pm \%5$  Birim deformasyona sebep olan çevrim sayısı

Şekil 2.12 CSR ve sıvılaşmaya sebep olan çevrim sayısı arasındaki temsili ilişki (Seed ve Idriss, 1982)

#### CPT Metodu:

CPT deneyinin en önemli avantajı, stragrafik değerlendirme için penetrasyon direncinin sürekli profilini vermesidir. CPT, diğer penetrasyon deneyleri ile mukayese edilirse daha tutarlı olup ve tekrar edilebilirdir. Profil sürekliliği, zemin tabakalarının daha detaylı tanımlanmasına olanak verdiğiinden, CPT yöntemi; sıvılaşma-direnç profillerinin çıkartılmasında daha avantajlı olmaktadır. Fakat CPT deneyinin, birkaç SPT deneyi ile doğrulanması gerekmektedir. (Youd ve Idriss, 2001). Şekil .2.13 te temiz kumlar için (ince tane % si  $\leq \%5$ ); CRR veya CSR nin CPT ile ilişkisi verilmektedir (Robertson ve Wride, 1998).



Şekil 2.13 CPT sıvılaşma verilerinin CSR veya CRR ile ilişkisi (Robertson ve Wride, 1998)

#### $V_s$ Metodu:

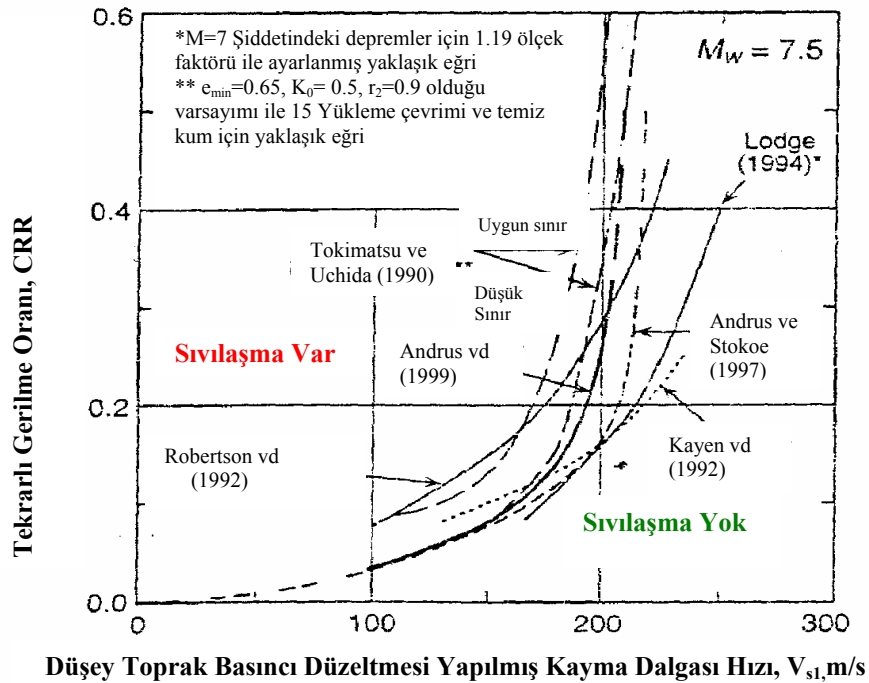
(Andrus ve Stokoe, 1997-2000), arazi kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) ölçümlerinden “sıvılaşma direnci” kriterini geliştirmişlerdir.  $V_s$ ' nin sıvılaşma direnci indeksi olması gayet uygundur. Çünkü hem  $V_s$  hem de CRR, boşluk oranı ( $e$ ), efektif çevre basıncı ( $\sigma'_c$ ), gerilme geçmişi ve jeolojik yaşla ilişkilidir.  $V_s$  yönteminin diğer penetrasyon testlerine olan avantajı şöyledir:

- Bir zemin kolonunda iri tanelerin var olması (çakıl, taş vs gibi), SPT, CPT gibi yöntemlerin performansını etkilemektedir. Ancak  $V_s$  tekniğinde, penetrasyon yöntemi ile zemine dalmanın zor olduğu ve kuyu açma imkanının güç olduğu bölgelerde çalışmak ve veri almak mümkün olmaktadır.
- $V_s$ , zemin malzemesinin temel bir mekanik özelliği olup direkt olarak küçük-birim deformasyon kayma modülü ( $G$ ) ile doğrudan ilişkilidir.

- Kayma modülü  $G$ , zemin-yapı etkileşim analizleri ile ileri dinamik zemin davranış analitik analizlerin kullanılan bir parametredir.

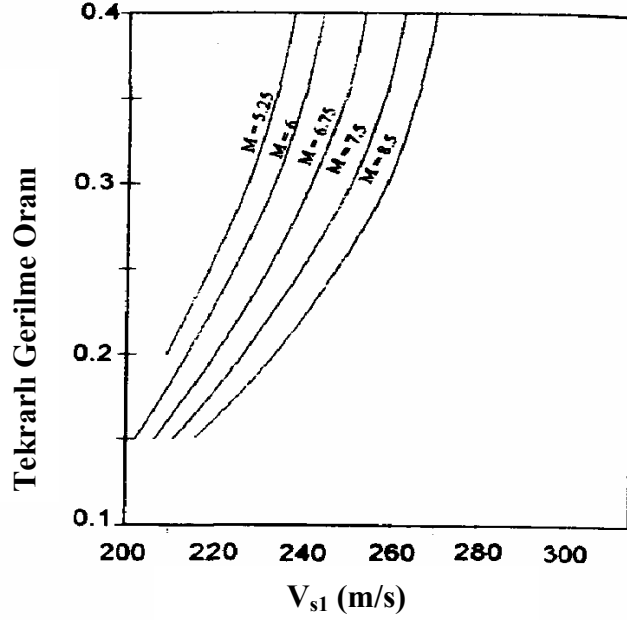
$V_s$  tekniğinin dezavantajları ise şöyledir:

- Sismik dalga hızı ölçümleri, küçük birim deformasyonlar da yapılmaktadır. Buna karşılık, boşluk suyu basıncı gelişimleri ve sıvılaşma deformasyonları büyük deformasyon olayıdır.
- Sismik  $V_s$  deneyi ile zeminlerin sınıflandırılabilmesi amacıyla numune almak mümkün değildir. Bu yüzden sıvılaşmayan yumuşak killi zeminlerin tespiti ve ayırt edilmesi mümkün değildir.
- $V_s$  yöntemi genelde geniş aralıklarla yapılmakta olup, bu da ince düşük  $V_s$  tabakasının tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, zayıfça çimentolanmış yüksek  $V_s$  hızlı zeminlerin tespiti için SPT ve CPT gibi testlerin yapılmasına ihtiyaç vardır. Şekil 2.14 de yedi tane  $CRR-V_{s1}$  eğrisi karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2.14 Sıvılaşma direnci ve taneli zeminler için kayma dalgası hızı ilişkileri (Youd ve Idriss, 2001)

Şekil 2.15’de, farklı deprem büyüklükleri için kayma dalgası hızı ile tekrarlı gerilme oranı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.15 Kayma dalgası hızı kullanarak farklı deprem büyüklükleri için zemin sıvılaşması değerlendirme şeması (Kayabalı, 1996)

#### BPT Metodu:

Çakıl boyutunda taneler içermeyen zeminlerin sıvılaşma direnci genellikle CPT, SPT ve  $V_s$  ölçümleri ile değerlendirilmektedir. Fakat iri çakıllı zeminlerde penetrasyon deney değerleri aldatıcı ölçüde yüksek değerler verdiği için, geniş çaplı Becker penetrasyon testi efektif olarak kullanılmaktadır. Bu test 1950’ler de Kanada’da geliştirilmiş olup, 16.8 cm çapında 3 m uzunluğunda çifte duvarlı boru içinde zemine sürülen dizel sürgülü bir çekiştir. Fakat, BPT standart haline getirilmemiş olup, birkaç türü vardır. Ayrıca BPT ile sıvılaşma değerlendirilmesi yapılan çok az sıvılaşma bölgesi vardır.

Zeminlerin sismik sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilebilmesi için, çeşitli metotlar geliştirilmiş olmakla beraber, daha önce de bahsedildiği gibi başlıca iki metot vardır. Bunlardan birincisi; laboratuvar deney sonuçlarının kullanıldığı sıvılaşmaya neden olan tekrarlı gerilme veya deformasyonların değerlendirilmesine yönelik metottur.

(Seed ve Lee, 1966; Seed ve Idriss, 1971;1979). İkincisi ise, arazi sıvılaşma karakteristiklerinin bir indeksi olan arazi test tekniklerinden SPT, CPT, VS, BPT kullanılarak geliştirilmiş arazi performans korelasyonlarına dayalı ampirik metotlardır (Seed vd, 1983;1985). Birinci gruba dahil metotlarda bir çok belirsizlikler mevcuttur. Çünkü laboratuvar ortamında, arazideki zeminin yapısını ve yerleşimini, yoğunluğunu ve gerilme durumlarını, üzerlerindeki gerilme durumunu, tarihçesini tam oluşturmak çok zor, hatta mümkün değildir (Robert ve Campanella, 1985; Mahmood ve Zadegon vd., 1991). Özellikle iri taneli zeminlerden bozulmamış numuneleri elde etmek ve test etmek çok zor olduğundan, genelde ikinci türdeki yöntemler kullanılmaktadır. En çok SPT' ye dayalı metot kullanılmaktadır (Seed vd., 1985; Tokimatsu ve Yoshimi, 1983). Bundan başka arazinin karakterizasyonu noktasında CPT'ye olan dünyaca ilgi dolayısıyla, CPT'ye dayalı bazı sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik yöntemler de geliştirilmiştir (Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve De Alba, 1986; Shibata ve Teparaksa, 1988; Stark ve Olson, 1995). CPT nin en önemli özelliği, sürekli penetrasyon verileri sağladığından, 15 cm den daha kalın veya ince sıvılaşabilir kum ve silt tabakalarını tanımlayabilmektedir (Zhang, 1998).

#### **2.4.2. İstatistiki ve Yapay Sinir Ağları ile Sıvılaşma Risk Değerlendirmesi**

Hem laboratuvar deneylerine dayalı, arazi-davranış modellemeleri ile tekrarlı gerilmelerin elde edildiği ileri dinamik analizlerinde; hem de yine bu tekrarlı gerilmelerin ampirik olarak belirlendiği yine arazi deneylerine dayalı basitleştirilmiş metotlarda yukarıda bahsedilen belirsizlikler nedeniyle, sıvılaşmaya yol açan tekrarlı gerilmelerin doğru olarak elde edilmesinde bazı güçlükler vardır. Bu nedenlerden dolayı, kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için, istatistiki metotlarla, son zamanlarda zemin mühendisliğinde, uygulama alanı bulan yapay sinir ağları, genetik algoritma ve bulanık mantık metotları geliştirilmiştir. Bu metotlarda tekrarlı kayma gerilmelerinin kullanımına direkt ihtiyaç duyulmamaktadır. İstatistiki metotlarda; Dr %, SPT ve sıvılaşma %'si arasında istatistiki ilişkiler oluşturulmuştur (Christran ve Swige, 1975; Liao vd., 1988). Bu ilişkilerde; parametrelerin ve değişkenlerin normal olarak dağılımı gibi veya

sıvılaşma ve sıvılaşmama durumlarının bireysel varyans ve kovaryanslarının, beraber alınan bütün durumlar için aynı olduğu şeklinde kabuller yapılmaktadır (Christian ve Surge, 1975).

Yapay sinir ağları ile sıvılaşma potansiyelinin tespitinde, bilgisayar programları ve gerçek arazi kayıtları kullanılmaktadır. Klasik, kompleks matematiksel modellerin yerine, yapay sinir ağları metodu kullanılırsa, bir çok değişkene sahip kompleks ilişkileri, kolayca değerlendirmek mümkün olmaktadır. Bu durum, bulanık mantık metodu için de geçerlidir. Yapay sinir ağları ile sıvılaşma potansiyelinin tahmin çalışması, ilk olarak Anthony Goh (1994) tarafından yapılmıştır. Goh, Seed, vd (1985) çalışmalarına; sıvılaşmaya etken benzer parametreler kullanmışlardır. Bunlar; SPT değeri, ince tane oranı,  $D_{50}$  tane boyutu, eşdeğer dinamik gerilme oranı ( $\tau_{av}/\sigma'_0$ ), toplam düşey gerilme ( $\sigma_0$ ), efektif düşey gerilme ( $\sigma'_0$ ), deprem magnitütü ( $M$ ) ve zemin yüzeyindeki maksimum yatay deprem ivmesi ( $a_{max}$ )' dır. Bu parametrelerin içinde; SPT değerleri ile, ince tane oranı, sonuçları en çok etkileyen parametreler olarak verilmiştir.

#### **2.4.3. Bulanık Mantık Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi**

Bulanık Mantık Yöntemi ile, bir zeminin sıvılaşma potansiyelinin tespiti çalışmaları çok yeni olup, bu konu üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Bu konuda fazla yayın olmamakla birlikte, çalışmalarda bulanık mantık metodu daha çok Monte Carlo Yöntemi ile beraber kullanılmıştır. Bulanık Mantıkla sıvılaşma risk analizinde, sıvılaşmaya etki eden parametreler ve bulanık küme aralıkları şu şekilde alınmıştır (David J. Elton vd, 1995):

- Zemin tipi
- Zeminin yaşı (Depozit yaşı)
- Yeraltı su seviyesi (YASS)
- Tane boyu dağılımı,
- Tane boyutu,  $D_{50}$
- SPT, N değeri

- Zemin tabakasının derinliği
- Zemin eğimi
- Sıvılaşabilir tabaka kalınlığı
- Zemin rölatif sıklığı (Dr)
- Sıvılaşabilir alan genişliği
- Sıvılaşabilir tabaka üstünde düşük permabiliteli (geçirimsiz) zemin tabakası mevcudiyeti

#### *Zemin Tipi:*

Bir zeminin sıvılaşma potansiyelinin, çökme şekli ve ortamından etkilendiği düşünölmektedir. Çünkü çökme ortamı ve şekli zeminin yoğunluğunu ve tane boyutu dağılımını etkilemektedir. Youd ve Perkin (1978), çökme ortamına bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli açısından zeminleri gruplamışlardır. Burada çok sayıda zemin tipi, zemin yaşına göre sınıflandırılarak sıvılaşma riskleri “çok yüksek”, “orta”, “düşük” ve “çok düşük” olmak üzere kümelendirilmiştir. Rahman ve Zahaby (1996) ile Elton vd (1995) makalelerinde bulanık kümeleri kullanarak sıvılaşma riskini değerlendirirken Youd vd (1978)’nin sınıflandırdığı çok sayıda zemin tipi içinden yalnız “nehir kanalı”, “delta”, “yamaç molozu”, “kum tepelikleri” ve “residüel zemin” gibi beş türünü dikkate alabilmiş diğerlerini alamamıştır. Çünkü, bütün zemin türleri alınırsa, bulanık küme ve bulanık aralık sayısı ile bulanık kural sayısı çok artmaktadır. Buna bağlı olarak ta işlem yükü çok artmakta ve sıvılaşma potansiyelinin tespiti çok güçleşmektedir. Bu beş tip zemin depoziti, zeminlerin yerleşme ortamının bütününü temsil etmemektedir.

Bu nedenlerden dolayı, bu tez çalışmasında zemin tipi ve yaşı dikkate alınmamıştır. Bunların yerine zemin yoğunluğu ve tane yerleşimini en iyi temsil eden SPT, N değerleri dikkate alınmıştır.

#### *Zemin Yaşı (Depozit Yaşı):*

Depozit yaşı 500 yıldan küçük olduğunda ( genç holosen, holosen, pleyistosen ve ilk pleyistosen gibi), sıvılaşma potansiyeli artmaktadır. Daha yaşlı olan zeminler, daha çok çimentolaşma ve daha çok yoğunlaşmaya maruzdurlar. Daha sıkı olan veya daha



fazla çimentolaşmış zeminin de sıvılaşma riski daha düşük olmaktadır. Fakat zemin sıklığını ve çimentolanmayı “depozit yaşından” çok en iyi yansıtan SPT, N değeridir. Bu bakımdan depozit yaşı yerine tez çalışmasında SPT, N değeri dikkate alınmıştır. Ayrıca depozit yaşı doğrudan sıvılaşma potansiyeline etki etmemektedir. Bazen çok yeni depozitlerde sıvılaşma olmazken çok daha yaşlı depozitlerde sıvılaşma olmaktadır (Didneson vd., 1988).

#### *Yeraltı Su Seviyesi (YASS):*

YASS, Elton vd (1995) ile Rahman ve Zahaby (1996) nin bulanık mantık teorisine dayanan makalelerinde YASS'nin 6.1 m 'ye kadar yükselmesinde sıvılaşma riskini “çok yüksek”, “yüksek” ve “orta” olarak almışlar; 6.1 m den sonra ise “düşük” ve 9.2 m den sonra ise “çok düşük” olarak gruplandırmışlardır.

#### *Tane Boyutu Dağılımı:*

Zeminlerin tane boyutu dağılımları, (uniform boşluklu, iyi derecelenmiş veya kötü derecelenmiş olması), doğrudan sıvılaşma potansiyeli ile ilgilidir. Çünkü uniform zeminler daha kolay sıvılaşmaktadır. Ancak, literatürde, bütün depremler için sıvılaşan veya sıvılaşmayan zeminlerin tane boyutu dağılımıyla ilgili yeterli bilgi mevcut değildir. Bu çalışmada, zeminlerin gradasyonunun sıvılaşmaya etkisi, çalışmada dikkate alınmış olan kayma dalgası hızı ve SPT-N değerleri ile ifade edilmiştir.

#### *Tane Boyutu:*

Elton vd (1995), tane boyutunun sıvılaşma potansiyeli ile yakın alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Tane boyutları, 0,075 mm ile 3 mm arasında değişen zeminlerin, daha fazla sıvılaşabilir olduğunu göstermişlerdir. Literatürde verilen sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlere ait,  $D_{50}$  boyutları ile YASS,  $V_s$ , SPT ve zemin derinliği arasında üç boyutlu dağılım grafikleri üretilmiştir. Ancak,  $D_{50}$  boyutlarının sıvılaşma potansiyeline olan etkisi açısından kesin aralıklar veya bağıntılar bulunamamıştır. Bu sebeple,  $D_{50}$  boyutunun, sıvılaşmaya etki eden önemli parametrelerden olmadığı kanaatiyle tez çalışmasında dikkate alınmamıştır.

*SPT, N Değeri:*

SPT, N değeri sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde zeminlerin rölatif yoğunluğunu ve statik düşey efektif gerilmeyi yansıttığı için önemli bir parametredir. Hatta sıvılaşmaya etki eden ikincil parametreler (tane şekli, fabrik taneler arası çimentolanma ve statik çevre basıncı v.b. ) dahi, SPT değeri ile belli bir derecede olsun tahmin edilebilmektedir. (Seed, 1979).

Düşük SPT,N değerleri, sıvılaşma riskinin yüksek olduğuna işaretir. Elton vd (1995), SPT, N değerlerinin bulanık küme aralıklarını,  $N < 2$  için sıvılaşma riski “çok yüksek”,  $2 < N < 5$  için “yüksek”,  $5 < N < 8$  için “orta”,  $8 < N < 11$  için “düşük” ve  $N > 11$  için “çok düşük” olarak vermişlerdir. Gerçekte ise, bu tez çalışmasında literatürden elde edilen çok sayıdaki SPT, N datası kullanılarak elde ettiğimiz sıvılaşmaya etki eden diğer parametrelerle olan üç boyutlu dağılım ilişkilerinden de görüleceği gibi,  $N < 12$  için sıvılaşma riski “çok yüksek”  $12 < N < 15$  için sıvılaşma riski “yüksek” ve  $12 < N < 25$  için sıvılaşma riski “orta” ve  $N > 25$  için sıvılaşma riski “düşük” olmaktadır.

*Zemin Derinliği:*

Zemin derinliği arttıkça düşey efektif basınç arttığından sıvılaşma riski azalmaktadır. 10 m den derin depozitlerde, yanal çevre basıncı çok fazla olduğundan sıvılaşma riski az olmaktadır. Ancak zemin derinliği 1.0 m den az ise, suyun drenajı kolay olacağından sıvılaşma riski azalmaktadır.

*Zeminin Rölatif Sıklığı, (Dr):*

Rölatif sıklığı arazide tespit etmek, granüler zeminler için hem çok zor olup hem de pahalı yöntemler gerektirmektedir. Laboratuarda da granüler zeminin arazideki yoğunluğunu tam tespit etmek zor olduğundan, sıvılaşan ve sıvılaşmayan yerlere ait rölatif sıklık değerlerine literatürde pek rastlanmamıştır. Bazı ampirik ifade ve korelasyonlar kullanılarak SPT değerlerinden rölatif sıklıklar elde edilebilir. Ancak, bu şekilde bulunan rölatif sıklık değerleri, oldukça yaklaşık değerler vereceğinden, bu çalışmada,  $Dr(\%)$  bulanık kümesi alınmamış, bunun yerine, arazideki zemin sıklığını yansıtan SPT, N değerleri kullanılmıştır.

Geniş alanlar ve kalın tabakalar genelde boşluk suyu basınçlarının drenajını engellediğinden veya drenaj boyunu uzattığından sıvılaşma açısından riskli olmaktadır. Keza düşük permabiliteli bir üst tabakanın varlığı, boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini engelleyeceğinden sıvılaşma riskini artıracaktır.

### 3.BULANIK MANTIK METODU

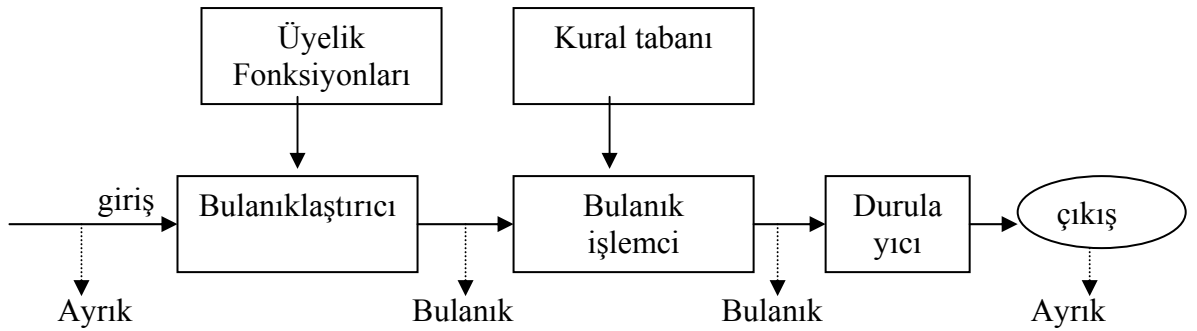
#### 3.1. Giriş

Bir kümenin elemanları,  $[0,1]$  arasında değişen üyelik dereceleri alarak o kümeye dahil oluyorsa bu tür kümelere bulanık kümeler denir. Klasik kümeler teorisinde bir eleman herhangi bir kümeye aittir veya ait değildir. Yani üyelik dereceleri ancak sıfır veya bir olabilir. Sıfır ile bir arasında herhangi bir değer alamazlar. İşte, bulanık kümeler, klasik kümelerin genişletilmiş hali olup; üyelik dereceleri  $[0,1]$  aralığında sonsuz değer alabilir. Bir elemanın bir kümeye ait üyelik derecesi "0" ise o kümeye ait değildir, "0.3" ise o kümeye %30 aittir, "0.7" ise o kümeye %70 aittir, ve "1" ise o kümeye %100 aittir denilir. Bu metodu ilk olarak 1965 senesinde Lütfü Askerzade bulmuştur (Şen, 1999).

Aristo mantığına göre insanlar boy bakımından uzundur veya kısadır. Oysa Zadeh uzun boyluluk kavramının kişilere göre değişeceğini söylemektedir. Uzun boylu insanlardan bir tanesi gerçek uzun boylu olarak alınırsa bundan biraz daha kısa veya uzun olanlarda değişik üyelik dereceleri ile uzun boylular kümesine dahil olabilirler. Yani küme dışı kalmazlar. Gerçek uzun boylu olandan çok daha kısa olanlarda, belli bir üyelik derecesi ile yine uzun boylular kümesine dahil olabilmektedir. İşte Zadeh, bulanık kümelerdeki elemanların üyelik derecelerinin, 0 ile 1 arasında değişebileceğini ileri sürmekle, kümeler teorisinde yeni olan ve gerçek hayatla uyumlu kümeler metodunda geniş uygulamaya sahip bulanık küme teorisini geliştirmiştir (Şen, 1999). 1970'lerde bulanık teori büyük gelişme göstermiş ve gerçek sistemler için bulanık kontrolörler yapılmıştır. 1975'de Mamdani ve Assilian bulanık kontrolör kullanarak bir buhar makinesini kontrol etmiştir. 1978'de Holmblad ve Ostergaard çimento fırını için ilk bulanık kontrolörü geliştirmiştir. 1980'lerde özellikle Japonya'da bulanık mantık teorisine dayalı bulanık kontrollere geliştirilmiş ve metrolar bu sistemle kontrol edilmeye başlanmıştır.

Bulanık sistemlerin Japonya'daki başarısı neticesinde, 1990 yılından itibaren bütün dünyada özellikle mühendislik alanlarında ve endüstride bulanık sistemler hızla

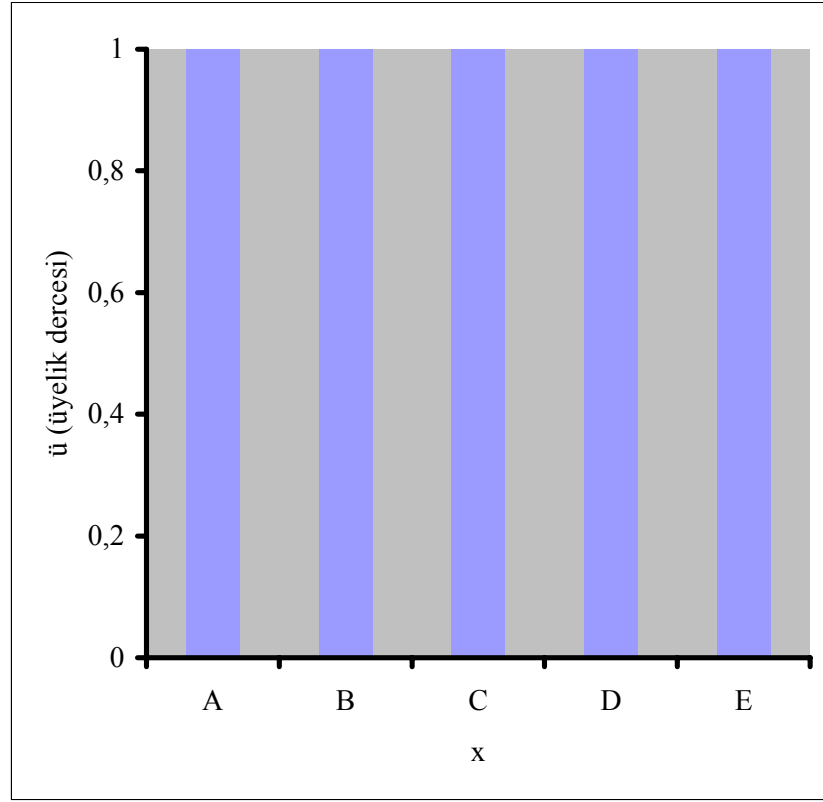
kullanılmaya başlanmıştır. Canon, Mitsubishi, Boeing, General Motors, Allen-Brudley, Chrysler gibi önemli firmalar ürünlerinde bulanık sistemlerden yararlanmaktadır (Şaka, 1999). Bulanık mantık, bir sistem içindeki belirsizlikleri ifade etmekte kullanılan bir yöntemdir. Bu belirsizlikler bir çok yolda olabilir. Mesela ölçümlerde bir takım problemler olabilir veya değerler hafifçe sapabilir, veri kayıpları oluşabilir ve bunun gibi daha bir çok değerler belirsiz olabilir (Çimen, 2002). İşte bulanık fonksiyonlar, bu belirsizlikleri azaltmak için eldeki verileri ayarlamaktadır. Ayrıca, bir sistemi kontrol etmek için karar vermeleri kolaylaştırmakta da yine bulanık mantık kullanılmaktadır. Grima, (2000)'ya göre, bulanık modeller kompleks giriş-çıkış ilişkilerini tariflemekte ve tanımlamakta kullanılmaktadır. “Bulanık kümeler”, “bulanık mantık” ve “yaklaşık değerlendirme” metotları kullanılarak, özel bir problemin giriş-çıkış ilişkilerini değerlendirmek mümkün ve kolay olmaktadır. Şekil.3.1 de bulanık modelin tipik yapısı görülmektedir.



Şekil.3.1. Bulanık mantık model (Clement, 1998)

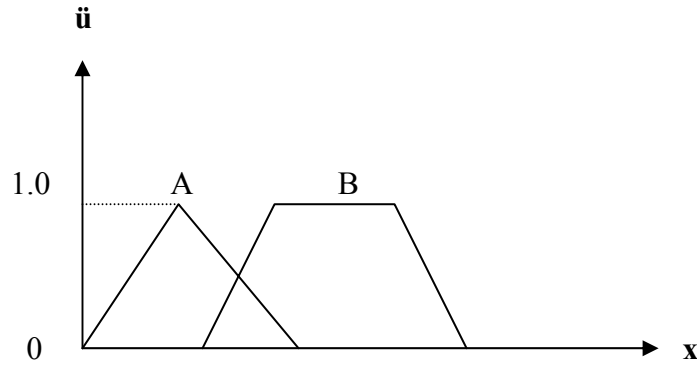
### 3.2. Bulanık Kümeler

Klasik kümelerde bir elemandan diğerine geçiş keskin ve ani olmakta ve her elemanın üyelik derecesi söz konusu küme için 1'e eşit olmaktadır. Yani klasik kümelerde herhangi bir eleman kümeye aitse üyelik derecesi birdir, ait değilse üyelik derecesi sıfırdır (Şekil.3.2).



Şekil 3.2 Klasik küme üyelik derecesi fonksiyonları;  
 $x = \{A, B, C, D, E\}$  ;  $\bar{u}_A = \bar{u}_B = \bar{u}_C = \bar{u}_D = \bar{u}_E = 1.0$

Bulanık kümelerde ise üyelik derecesi fonksiyonu sadece 1 olmayıp  $[0,1]$  arasında değişkendir (Şekil.3.3).



Şekil 3.3 Bulanık küme üyelik derecesi fonksiyonları;  $x = \{A, B\}$

Bulanık kümelerde elamanlar arasındaki geçiş sert ve aniden olmayıp yumuşak ve sürekli olan üyelik dereceleri ile olmaktadır. Yani bulanık kümede bütün elamanlar değişik üyelik dereceleri ile o kümeye dahildir. Aynı zamanda, bir bulanık küme ögesi farklı üyelik derecesi ile başka bir kümenin de ögesi olabilir. Mesela 1,70 m boyundaki bir insan  $\bar{u}=0.8$  lik üyelik derecesi ile uzunlar kümesine üye olabileceği gibi  $\bar{u}=0.20$  üyelik derecesi ile de kısalar ve  $\bar{u}=0.60$  üyelik derecesi ile orta boylular kümelerine dahil olabilir.

Bulanık kümede yatay eksendeki gerçek sayıların her biri, düşey eksende 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerine dönüştürülür. Genelde bir klasik “x” kümesinin elemanları  $x=\{x_1, x_2, x_3, \dots\}$  şeklinde ifade edilir. Fakat bulanık “x” kümesinde elamanlar kendilerine ait üyelik derecesi ile birlikte verilmektedir:

$$x = \left\{ \frac{\bar{u}(x_1)}{x_1} + \frac{\bar{u}(x_2)}{x_2} + \frac{\bar{u}(x_3)}{x_3} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\bar{u}(x_i)}{x_i} \right\} \quad (3.1)$$

burada “toplam” işareti; toplam işlemi olmayıp, sadece küme üyeleri ve üyelik derecelerinin “x” kümesine dahil olduğunu göstermek amacıyla kullanılmaktadır. Eğer bulanık küme sürekli bir küme ise bu durumda;

$$x = \left\{ \int \frac{\bar{u}(x)}{x} \right\} \text{ olur.} \quad (3.2)$$

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 deki “bölüm” işaretleri gerçek bir bölme işlemi ifade etmeyip, sadece alttaki değer, gerçek sayıya ve üstteki değer de altta yer alan küme elemanının üyelik derecesine, karşılık geldiğini ifade etmek için kullanılmaktadır. “İntegral” işareti veya “toplam” işareti ise küme elamanlarının toplamını ifade etmektedir. Gerçek bir integral veya toplama işlemi değildir (Şen, 1999).

Bulanık gösterimin diğer bir tarzı şöyledir:

Bir “X” uzayında, “x” X’in özel bir elemanı ise, o zaman X üzerinde tanımlanan bir bulanık A kümesi şu şekilde yazılabilir:

$$A = (x, \tilde{u}_A(x)), x \in X \quad (3.3)$$

burada;

x : A kümesi elemanı

$\tilde{u}_A(x)$ : x elemanının üyelik derecesi

### 3.3 Başlıca Bulanık İşlemler ve Terimler

Kesişme ve birleşme gibi birçok bulanık küme operasyonları min ( $\wedge$ ) ve max ( $\vee$ ) operatörleri ile tanımlanmaktadır. Min ( $\wedge$ ) ve max ( $\vee$ ), verilmiş iki elemanın içinden minimum ve maksimum üyelik derecelerini seçmek için kullanılır. Mesela,  $2 \wedge 3 = 2$ , veya  $2 \vee 3 = 3$ . Bunu aynı zamanda min (2, 3) = 2, veya max (2, 3) = 3 tarzında gösterebiliriz.

İki üyelik derecesi arasında, min ( $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2$ ) veya  $\wedge (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2)$  yada  $\tilde{u}_1 \wedge \tilde{u}_2$  şeklinde ifade edilen minimum ilişki şu şekilde yazılabilir:

$$\tilde{u}_1 \wedge \tilde{u}_2 = \min(\tilde{u}_1, \tilde{u}_2) \equiv \{\tilde{u}_1 \text{ eğer } \tilde{u}_1 \leq \tilde{u}_2, \tilde{u}_2 \text{ eğer } \tilde{u}_1 > \tilde{u}_2\} \quad (3.4)$$

benzer olarak  $\tilde{u}_1$  ve  $\tilde{u}_2$  gibi iki üyelik derecesi arasındaki maksimum ilişki şöyle tanımlanır:

$$\tilde{u}_1 \vee \tilde{u}_2 = \max(\tilde{u}_1, \tilde{u}_2) \equiv \{\tilde{u}_1 \text{ eğer } \tilde{u}_1 \geq \tilde{u}_2, \tilde{u}_2 \text{ eğer } \tilde{u}_1 < \tilde{u}_2\} \quad (3.5)$$

Şayet bir kümede birçok eleman varsa o zaman minimum  $\tilde{u}$ ,

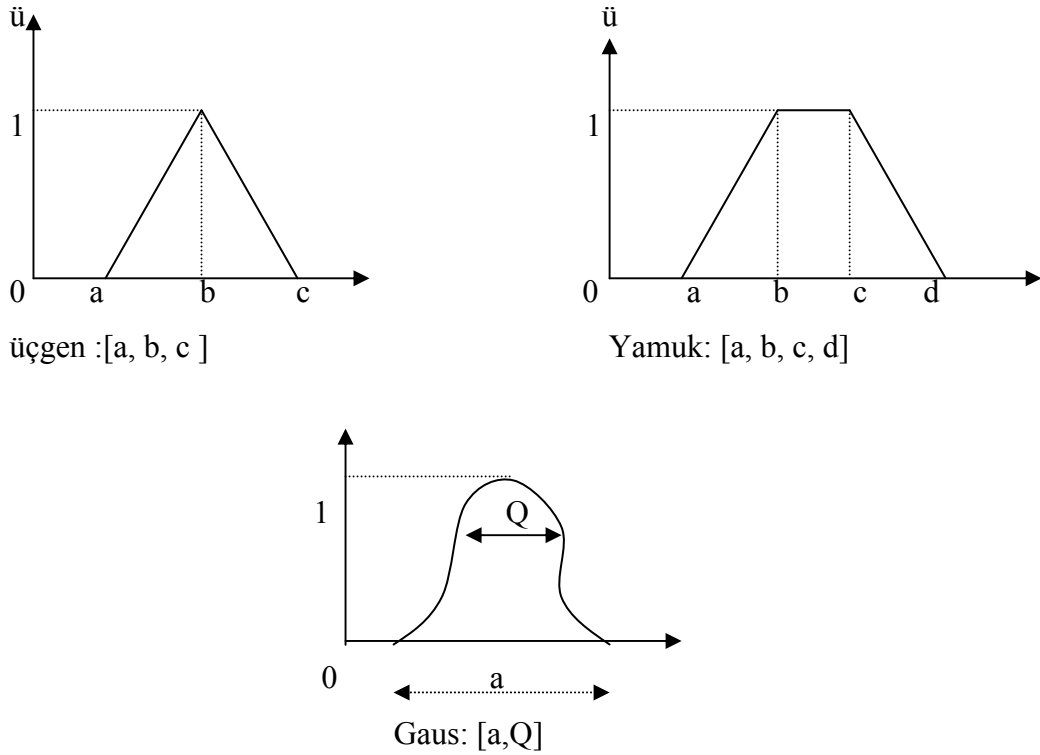
$$\tilde{u} = \wedge (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \dots, \tilde{u}_m) = \tilde{u}_1 \wedge \tilde{u}_2 \wedge \tilde{u}_3 \wedge \dots \wedge \tilde{u}_m \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir.



### 3.4. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, verilen nümerik ayrık giriş parametrelerinin, bulanık işlem mekanizmasında değerlendirilmesi için, bulanık kümelere dönüştürülmesi işlemidir. Bir çok bulanıklaştırma şekli vardır. Bunlardan en çok kullanılanları; üçgen, yamuk veya Gauss biçimli üyelik fonksiyonları ile temsil edilenlerdir (Şekil.3.4).

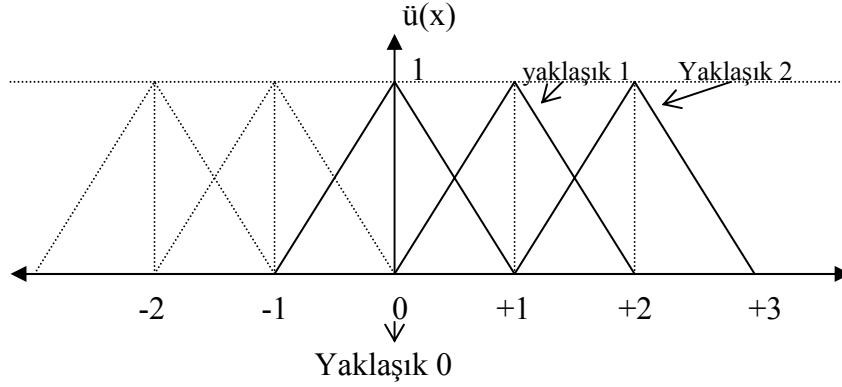


Şekil.3.4 Üyelik derecesi fonksiyonları (Jacob, 2003)

### 3.5. Bulanık Sayılar

Arazi ve laboratuvar ölçümleri, daima kesin olmayıp, genellikle hata içerebilmektedir. Genellikle bu gibi ölçümler tek bir rakam ile ve bu rakam etrafında belli miktarda  $\mp$  hata payı ile modellenmektedir. İşte bu durum, "yaklaşık  $x$ " diye ifade edilir. Bulanık kümeleri kullanarak bu "yaklaşık  $x$ " ifadesini direkt olarak elde edebiliriz.

Aşağıdaki şekilde üçgen fonksiyonlardan oluşan tipik bulanık sayılar görülmektedir (Şekil.3.5.).



Şekil.3.5 Bulanık sayıların gösterimi

### 3.6. Üyelik Derecesi Atamaları

Bulanık kümelerin üyelik dereceleri, “sezgi”, “çıkarım”, “dereceleme”, “yapay sinir ağları”, “genetik algoritmalar”, “tecrübe”, “data yorumlama” yöntemleri gibi daha bir çok dilsel terimlerle ifade edilebilir (Şen, 1999)

Bu çalışmada sınılaşmaya etki eden parametrelerin bulanık alt kümelerine ait üyelik dereceleri atamaları; parametreler arasındaki üç boyutlu dağılım grafikleri üretilerek bunların yorumlanması neticesinde yapılmıştır. Konu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4’te verilmiştir.

### 3.7. Kural Tabanı

Bilgiyi temsil etmek üzere, bulanık sistemler çoğunlukla dilsel kuralları kullanırlar. Eğer-ise tarzında ifade edilen bir kural standart olarak şu şekildedir.

Eğer  $a_1$  ve  $a_2$  .... ve  $a_n$  ise  $b$  (3.7)

Bir kuralın "Eğer" kısmı; bulanık kümelerin girdi kısmının üyelik derecesine referanstır. "İse" kısmı da sonuca referanstır. Toplam kural sayısı, sistemi karakterize eden bulanık alt kümelerin sayılarının çarpımlarının toplamına eşittir. İnsan düşünce sisteminin ilk aşamaları oldukça bulanıktır ve zaman içinde berraklaşarak durulabilir ve daha belirgin hale gelir. İnsan düşünce öğeleri kelimelerle ifade edilir. İşte bu "az-çok", "aşağı-yukarı", "yaklaşık", "oldukça", "biraz", "sıklıkla" vs. gibi dilsel ifadeler bulanık kümelerle modellenerek sözelden ifadelerden sayısal ifadelere geçiş için önemli bir köprü bir vasıta elde edilmiştir. Şimdi iki girdili tek çıktılı bir kural tabanını örnek alalım:

Kural: Eğer  $(x_1, A_{1ki})$  ve  $(x_2, A_{2ki})$  ise  $(y, Q_m^i)$  dir. (3.8)

Burada;

$A_{1k}$ :  $x_1$  değişkeni (girişi)'nin bir bulanık alt kümesi

$A_{2k}$ :  $x_2$  değişkeni (girişi)'nin bir bulanık alt kümesi

$Q_m^i$  :  $y$  değişkeni (çıkışı)'nın bir bulanık alt kümesi

$x_1$  ve  $x_2$  nin verilen sayısal değerleri için çıkış elemanının üyelik derecesi,  $\mu_{A_{1k}}(x_1)$  ve  $\mu_{A_{2k}}(x_2)$ ' gibi giriş üyelik fonksiyonlarının minimum değeridir:

$$\mu_{Q_m^i}(y) = [\mu_{A_{1ki}}(x_1), \mu_{A_{2ki}}(x_2)] \quad (3.9)$$

Bir sistemin modellenmesinde birden fazla bulanık kurallara ihtiyaç vardır. Sistemin bütünü için tek bir sonuç elde etmek, her bir kuralın çıkarım kısmında ortaya çıkan sonuçların harmanlanması ile olur. Denklem 3.10 da verildiği gibi bu kurallardan aynı sonuçlu olanlar içinde, en büyük üyelik derecesine sahip olan dikkate alınır. Örneğin, iki girişli bir çıkışlı  $p$  ve  $q$  kuralları, aynı  $Q_m$  sonucuna sahip olsunlar, bu durumda bu iki kuralın bileşimi şu şekilde olur:

$$\mu_{Q_m^{p \vee q}}(y) = \max \{ \min[\mu_{A_{1jp}}(x_1), \mu_{A_{2kp}}(x_2)], \min [\mu_{A_{1jq}}(x_1), \mu_{A_{2kq}}(x_2)] \} \quad (3.10)$$

burada;

$\mu_{Q_m}$  :  $Q_m$  bulanık çıkış kümesinin üyelik derecesi

$\mu_{A_{1jp}}(x_1)$ :p kuralında,  $A_{1j}$  bulanık kümesindeki  $x_1$  değişkenin üyelik derecesi

$\mu_{A_{2kp}}(x_2)$ :p kuralında,  $A_{2k}$  bulanık kümesindeki  $x_2$  değişkenin üyelik derecesi

$\mu_{A_{1jq}}(x_1)$ :q kuralında,  $A_{1j}$  bulanık kümesindeki  $x_1$  değişkenin üyelik derecesi

$\mu_{A_{2kq}}(x_2)$ :q kuralında,  $A_{2k}$  bulanık kümesindeki  $x_2$  değişkenin üyelik derecesi

Birden fazla kuralların harmanlamasında iki metot vardır:

- Kurallar “ve” bağlacı ile bağlanır. Yani kümeler teorisine göre bunların kesişimleri alınır (Şen, 1999):

$$\mu(y) = \min [\mu_1(y), \mu_2(y), \dots, \mu_r(y)] \quad (3.11)$$

- Kurallar “veya” bağlacı ile bağlanır. Yani kural tabanlı tekil çıkarımlardan en az birisi, doğru olmak şartıyla birleştirilir:

$$\mu(y) = \max [\mu_1(y), \mu_2(y), \dots, \mu_r(y)] \quad (3.12)$$

### 3.8.Bulanık Çıkarım Mekanizması

Bulanık çıkarım mekanizması; bulanık dilsel tanımlamaların değerlendirilmesi için kullanılan hesaplama yöntemleridir. Bulanık “Eğer-ise” kuralları bir dilsel değişkenin diğer birine olan bağlantısını tanımlar. “Eğer-ise” kurallarının analitik formlarına bulanık işlem ilişkileri denilir. Literatürde 40 farklı tür ilişki vardır. En çok kullanılan, üyelik dereceleri ile ilgili çıkarım işlemcileri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bulanık Çıkarım Mekanizmaları (Hines, 1997)

İsim	İşlemci $\phi[\bar{u}_A(x), \bar{u}_B(y)]$
$\phi_m$ , Zadeh max-min	$(\bar{u}_A(x) \wedge \bar{u}_B(y)) \vee (1 - \bar{u}_A(x))$
$\phi_c$ Mamdani min	$\bar{u}_A(x) \wedge \bar{u}_B(y)$
$\phi_p$ Larsen çarpım	$\bar{u}_A(x) \cdot \bar{u}_B(y)$
Çizelge 3.1 devam	
$\phi_a$ , Aritmetik	$1 \wedge (1 - \bar{u}_A(x) + \bar{u}_B(y))$
$\phi_b$ , Boolean	$(1 - \bar{u}_A(x)) \vee \bar{u}_B(y)$
$\phi_{bp}$ , Sınırlanmış (bağlı) çarpım	$0 \vee (\bar{u}_A(x) + \bar{u}_B(y) - 1)$
$\phi_{dp}$ , Etkin çarpım	$\bar{u}_A(x)$ , eğer $\bar{u}_B(y) = 1$ , $\bar{u}_B(y)$ , eğer $\bar{u}_A(x) = 1$ , 0, eğer $\bar{u}_A(x) < 1$ , $\bar{u}_B(y) < 1$
$\phi_s$ , Standart dizi	1, eğer $\bar{u}_A(x) \leq \bar{u}_B(y)$ 0, eğer $\bar{u}_A(x) > \bar{u}_B(y)$
$\phi_g$ Gödelian	1, eğer $\bar{u}_A(x) \leq \bar{u}_B(y)$ $\bar{u}_B(y)$ , eğer $\bar{u}_A(x) > \bar{u}_B(y)$

Çizelge 3.1 deki bulanık çıkarım mekanizmaları içinden en çok Mamdani (dilsel) bulanık çıkarım işlemi kullanılmaktadır. Bu durumda,

$$R_i: \text{Eğer } x_1 = A_{i1} \text{ ve } \dots \text{ ve } x_r = A_{ir}, \text{ ise } y = B_i \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.13)$$

olur. Burada;

k : kural sayısıdır.

$x_i$  : input değişkenidir.

$R_i$  : kural numarasıdır.

$A_{ij}$  ve  $B_{ij}$ :  $\bar{u}_{A_{ij}}(x_i)$  ve  $B_i$  üyelik fonksiyonları ile tanımlanan dilsel bulanık küme terimleridir.

Bulanık kuralların giriş kısmının birleştirilmesinde (harmanlanmasında), “ve”, “veya”, “değil” gibi bulanık küme operatörleri kullanılmaktadır. Fakat en çok kullanılan operatör, aşağıda verilen örnek kuralda gösterildiği gibi “ve” operatörüdür:

$$R_i: \text{Eğer } x_1=A_{i1} \text{ ve } x_2=A_{i2} \text{ ve} \dots \text{ ve } x_n=A_{in} \text{ ise } y_1=B_{i1} \text{ ve } y_2=B_{i2} \text{ ve} \dots \text{ ve } y_p=B_{ip} \quad (3.14)$$

Mamdani bulanık metodunda, her bir kuralın, modelin çıkışına olan katkısı yine bir bulanık kümedir. Bu metot bir max-min çıkarım işlemidir. Mamdani çıkarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşur (Grima, 2000):

- Her bir kuralın giriş kısmının  $\alpha_i$  olarak gösterilen “kural ağırlık faktörü” veya “ateşleme derecesini” hesapla:

$$\alpha_i = \bar{u}_{A_{i1}}(x_1) \wedge \bar{u}_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \bar{u}_{in}(x_n), \quad 1 \leq i \leq k \quad (3.15)$$

- Her bir kural için bulanık küme  $B'_i$  nü  $\alpha_i$  den elde et:

$$\bar{u}_{B'_i}(y) = \alpha_i \wedge \bar{u}_{B_i}(y) \quad (3.16)$$

- Maksimum birleştirme operatörünü kullanarak bütün kuralların çıkışlarını birleştir:

$$\bar{u}_{B'_i}(y) = \max (\bar{u}_{B'_i}(y)) = \vee (\bar{u}_{B'_i}(y)), \quad i=1,2,\dots,k \quad (3.17)$$

### 3.9. Mamdani Bulanık Mantık Çıkarım Mekanizmasının Grafikselleştirilmesi

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere “ $x_1, x_2, x_3$ ” gibi üç giriş değişkenli ve tek “ $y$ ” çıkışlı bulanık kurallardan oluşan bir set düşünelim ve kuralları aşağıdaki gibi belirleyelim:

Kural 1: Eğer  $x_1=A_{11}$  ve  $x_2=A_{12}$  ve  $x_3=A_{13}$  ise  $y=B_1$  veya

Kural 2: Eğer  $x_1=A_{21}$  ve  $x_2=A_{22}$  ve  $x_3=A_{23}$  ise  $y=B_2$  veya

⋮

Kural k: Eğer  $x_1=A_{k1}$  ve  $x_2=A_{k2}$  ve  $x_3=A_{k3}$  ise  $y=B_k$

(3.18)

Burada,  $k=1,2,\dots$  olup  $A_{ki}$  ( $i=1,2,3$ ) ile  $B_k$ , “Az”, “orta”, “çok”, “küçük”, “büyük” gibi dilsel bulanık fonksiyonlardır. Örnek olarak  $A_{k1}$  ve  $A_{k3}$ 'ün üyelik fonksiyonları ‘üçgen’  $A_{k2}$  ve  $B_k$  ‘nın ise ‘yamuk’ olduğu kabul edilirse çıkış bulanık küme agregasyonu (birleşimi) Şekil 3.6 dan şöyle yazılır:

$$B=Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup \dots \cup Y_k \quad (3.19)$$

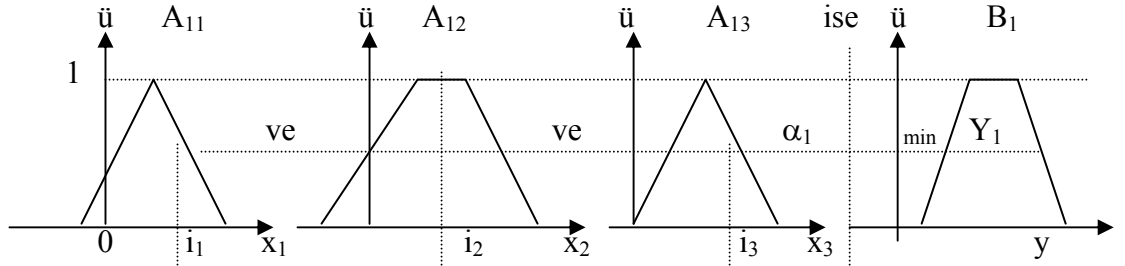
‘B’ bulanık çıkışın üyelik derecesi ise şöyledir (Şekil 3.6):

$$\mu_B(y)=\max \{ \min[\mu_{A_{k1}}(i_1), \mu_{A_{k2}}(i_2), \mu_{A_{k3}}(i_3)] \}, k=1,2,\dots$$

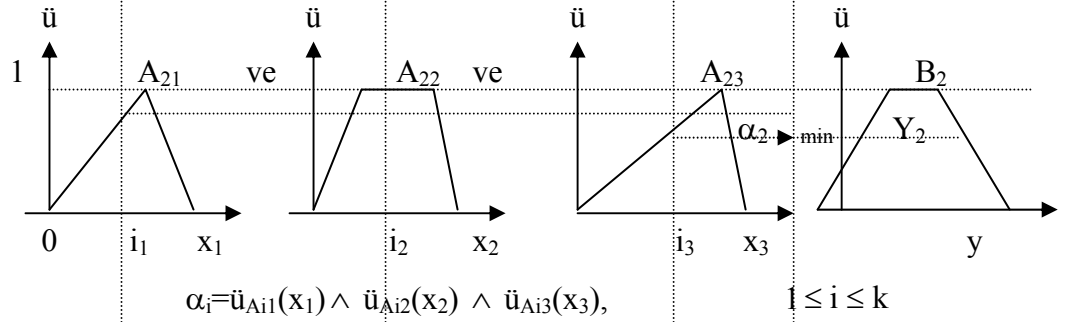
veya

$$\mu_B(y)=\max \{ \mu_{y1}(y), \mu_{y2}(y), \dots, \mu_{yk}(y) \} \quad (3.20)$$

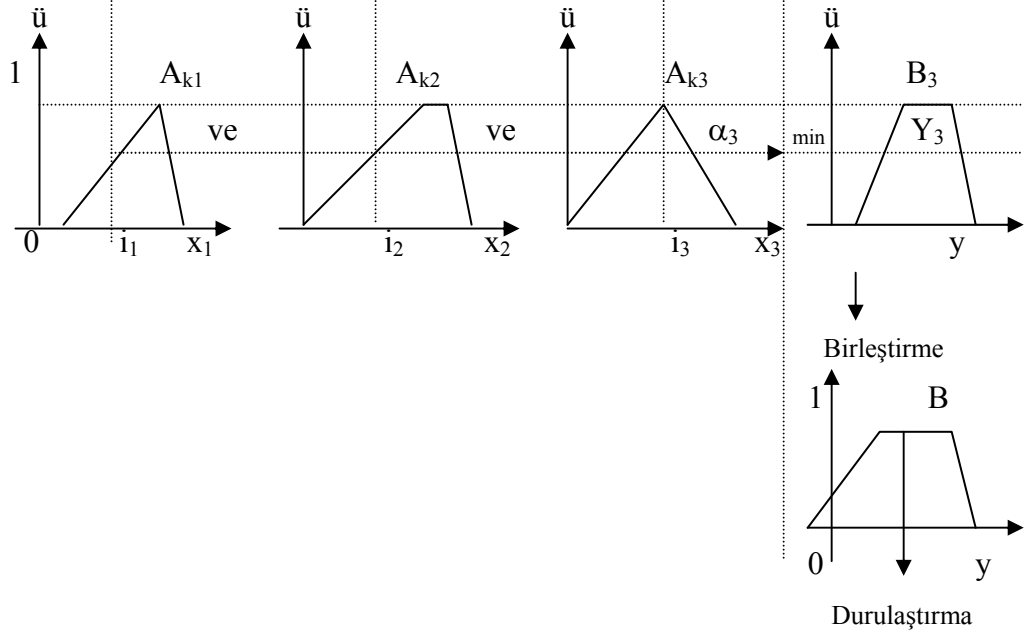
Kural 1:



Kural 2:



Kural k



Şekil 3.6 Grafiksel Mamdani bulanık mantık çıkarım mekanizması

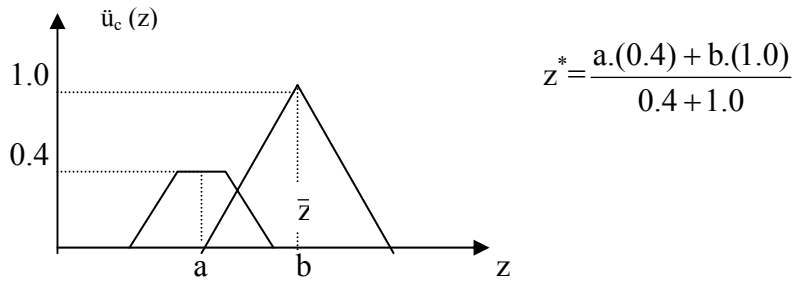


### 3.10. Durulaştırma İşlemleri

Bir bulanık çıkış kümesinin tek bir nümerik değer haline dönüştürülmesine durulaştırma denilir. Bu işlem nümerik giriş datalarının bulanıklaştırma işleminin tersi bir işlemdir. Literatürde birkaç durulaştırma işlemi mevcuttur. Bunlar:

#### 1. Ağırlıklı Ortalama Yöntemi:

Ağırlıklı ortalama yöntemi Şekil 3.7 de gösterildiği gibi hesaplanır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için üyelik fonksiyonu simetrik olmalıdır (Şen,1999). Denklem 3.21 kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 3.7 Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırması

$$z^* = \frac{\sum \bar{u}_\varphi(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \bar{u}_\varphi(z)} \quad (3.21)$$

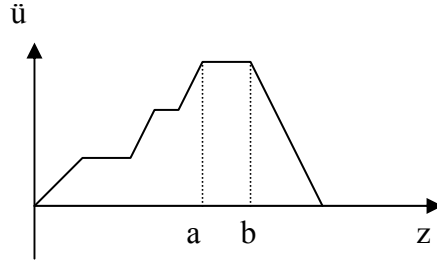
$\Sigma$  : Cebirsel toplam

$z^*$  : Ağırlıklı ortalama durulaştırması

$\bar{u}_\varphi(z)$  : Üyelik derecesi

## 2. Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi:

Bu yöntemde en büyüklerin ortalaması alınır (Şekil 3.8.). Denklem 3.22 kullanılarak hesaplanabilir.

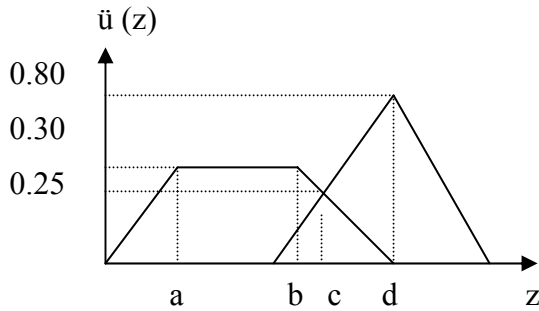


Şekil 3.8 Ortalama en büyük üyelik yöntemi durulaştırması

$$z^* = \frac{a + b}{2} \quad (3.22)$$

## 3. Toplamların Merkezi Durulaştırması:

İki bulanık kümenin birleşimi değil de onların cebirsel toplamı kullanılır (Şekil 3.9.) Bu yöntemin dezavantajı örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir (Şen, 1999). Denklem 3.23 kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 3.9. Toplamların merkezi durulaştırması

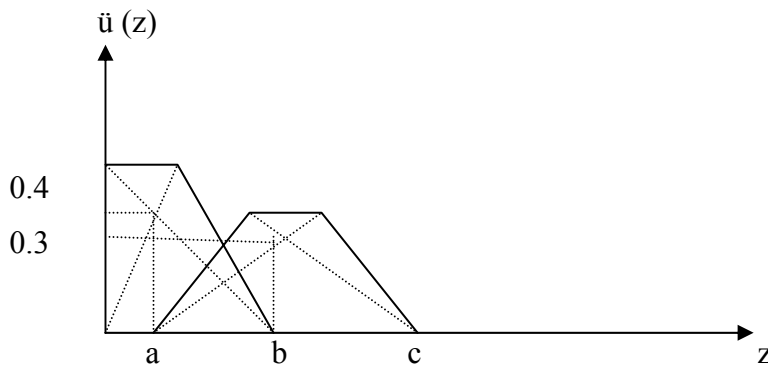
$$z^* = \frac{\int_z z \sum_{k=1}^n \tilde{u}_\zeta(z) dz}{\int_z z \sum_{k=1}^n \tilde{u}_\zeta(z) dz} = \frac{0.3.a + 0.3.b + (0.25 + 0.25).c + 0.8.d}{0.3 + 0.3 + 0.25 + 0.25 + 0.8} \quad (3.23)$$

#### 4. En Büyük Üyelik İlkesi:

Kullanılması için pikleri olan çıkarımlara ihtiyaç vardır. En büyük üyelik derecesine sahip olan değer direkt çıktı olarak alınır.

#### 5. Sentroid Yöntemi:

Bu yöntem bulanık çıktının ağırlık merkezinin bulunması ve buna karşılık gelen değerlerin alınması işlemidir. En yaygın kullanılan yöntem budur (Şen, 1999). Denklem 3.24 ten bulunur.



Şekil 3.10 Ağırlık merkezi durulaştırması

$$z^* = \frac{\int \tilde{u}_\zeta(z) z dz}{\int \tilde{u}_\zeta(z) dz} = \frac{0.4.a + 0.3.b}{0.4 + 0.3} \quad (3.24)$$

Burada bahsedilenlerden başka durulaştırma yöntemleri de mevcuttur. Bunlar en büyük alan merkezi durulaştırması ile en büyük ilk veya son üyelik derecesi yöntemleridir. Bu çalışmada; zeminlerin sıvılaşma riskinin bulanık çıktıları, literatürde en çok tercih edilmiş olan, “ağırlık merkezi durulaştırması” yöntemi ile elde edilmiştir (Şen, 1999).

## 4. GEVŞEK SUYA DOYGUN KUM ZEMİNLERİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BULANIK MANTIK YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

### 4.1 Giriş

Zemin Mühendisliği problemlerinin çözümünde, Bulanık Mantık Metodu'nun uygulanması çok yeni olup, geçmişi son 15-20 yıla dayanmaktadır. Juang vd (1992), senesinde bulanık mantık yöntemi ile şevlerin kayma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada tabii şev stabilitesine etki eden faktörler dört ana alan içinde (Jeoloji, topografya, meteoroloji ve çevre) toplanmıştır. Deprem faktörü ise dikkate alınmamıştır. Her bir faktörün kendisinin ve kendi içindeki alt faktörlerin şev stabilitesine olan etkilerinin dereceleri A=Çok çok önemli, B=Çok önemli, C=Önemli, D= Kısmen önemli, E= Önemsiz gibi dilsel ifadelerle verilmiş ve bu ağırlık terimleri bulanık kümelerle tanımlanmıştır. Juang vd (1996), bulanık kümeler teorisini kullanarak, “kumların rölatif sıklıklarını” konik penetrasyon deney sonuçlarından belirlemişlerdir. Bu çalışmada kumların sıkışabilirliğini etkileyen; mineral tipi, tane gradasyonu, tane yüzey pürüzlüğü, tane şekli, tane boyutu ve gerilme geçmişi gibi faktörlerden çok,  $R_f$  kayma oranı ile ilgilenmişlerdir. Kayma oranını, “düşük”, “orta”, “yüksek” gibi dilsel bulanık kümelerle ifade ederek kumların sıkışabilirliğini  $R_f$  derecesine göre ifade etmişlerdir.

Juang vd (1998), bir başka çalışmalarında, bulanık küme teorisi ile, şevlerin stabilite analizinde kullanılan parametrelerdeki belirsizlikleri ve parametre sapmalarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca Zhang vd (1999), CPT zemin sınıflandırmasında bulanık yaklaşımı kullanmışlardır.

Zeminlerin sınıvlaşması alanında bulanık mantık metodu ile yapılan çalışmalar ise aşağıda kısaca özetlenmiştir:

Elton vd (1995), zemin sınıvlaşmasına etki eden önemli parametreleri gruplandırarak her bir gruptaki “alt faktörlere” ve “gruplara”, sınıvlaşmaya etki derecelerine göre ağırlık faktörleri atamışlardır. Bunları da dilsel bulanık kümelerle ifade etmişler ve

sıvılaşma risk indeksini (FSLI) bulanık mantık metodu ile elde etmişlerdir. Fakat Elton ve arkadaşlarının sıvılaşmaya etki eden parametreler içinde, zemin sıkılığını ifade eden SPT,N değerleri için almış oldukları bulanık alt küme aralıkları, bu tez çalışmasında aldığımız alt küme aralıklarından farklıdır. Elton vd(1995), çalışmalarında SPT,  $N < 2$  için sıvılaşma riskine etki faktörünü “çok önemli”;  $2 < N < 5$  ; için “önemli”;  $5 < N < 8$  için “orta önemli”; ve  $N > 8$  için “oldukça önemsiz” olarak almışlardır. Ancak sıvılaşma riski derecesi  $N < 12$  için çok çok fazladır. Bu durum, çalışmanın dördüncü bölümünde verilmiş olan, “SPT, N”, “kayma dalgası hızı”, “yer altı su seviyesi”, “zemin derinliği” ve “deprem ivmesi” arasındaki, üç boyutlu dağılım grafiklerinden açıkça görülmektedir. Yani SPT,  $N < 12$  için risk “hayli fazla”,  $SPT < 25$  için “orta”,  $SPT > 25$  için ise risk “az” olmaktadır. Ayrıca, Elton (1995) çalışmalarında, sıvılaşmaya etki eden 12 adet parametre dikkate almışlardır. Alınan bu parametrelerin bütünü için yeterli literatür bilgisi ve data tabanı yoktur. Bu da bazı parametrelerin bulanık aralıklarının tespitinde hata payı içermektedir. Böylece, sıvılaşma risk sonuçlarında yanılma artacaktır. Bu nedenle bu çalışmada gösterildiği gibi, daha az, ama daha önemli parametre ile çalışarak sıvılaşma riskini değerlendirmek hem mümkün hem de pratiktir.

Rahman ve Zahaby (1996), probabilistik sıvılaşma risk analizinde, bulanık değişkenleri kullanmışlardır. Chern vd (2001), CHI-CHI depreminde Yuan-Lin alanındaki sıvılaşmayı tahmin etmek için bulanık küme mantığı ile yapay sinir ağları yöntemini beraber kullanmışlardır. Rahman ve Wang (2002), bulanık modelle yapay sinir ağları modelini kullanarak sıvılaşma tahmini yapmışlardır. Geliştirdikleri model, geniş sıvılaşma data tabanı kullanılarak test edilmiştir. İki farklı test algoritmasının ikinci fazında tek parametreler için bulanık kümelerin üyelik dereceleri geliştirilmiş ve test fazı boyunca girdi değişkenleri “yüksek”, “düşük” gibi dilsel terimlerle ifade edilmiştir. Çalışmalarında, sıvılaşmaya etki eden faktörler; “magnitüd”, “toplam düşey zemin gerilmesi”, “düşey efektif gerilme”, “SPT, N”, “deprem ivmesi”, “ince tane yüzdesi”, “ortalama tane çapı- $D_{50}$  (mm)” ve “yer altı suyu derinliği”dir.

## 4.2 Sıvılaşmaya Tesir Eden Önemli Parametrelerin Seçimi

Gerek teorik çalışmalar, gerekse laboratuvar araştırmaları, gevşek kum depozitlerinin sıvılaşma potansiyelini etkileyen birçok faktörün olduğunu göstermiştir. Bunların çoğunluğu ve önemlileri önceki bölümlerde izah edilmişti. Her bir faktörün kumların sıvılaşması üzerine, farklı seviyelerde etkisi bulunmaktadır. İşte bu çalışmada kumların sıvılaşmasına tesir eden ve sıvılaşma potansiyelinin tespitinde giriş değişkenleri olarak alınacak faktörlerin seçimi, aşağıdaki şu dört kriter dikkate alınarak yapılmıştır:

- En fazla tesir eden birinci derecede etkin olan faktörler.
- Sıvılaşma veri tabanının dikkate alındığı faktörler
- Teorik olarak ve arazi çalışmalarıyla elde edilmesi kolay olan faktörler
- Literatürde yer alan sıvılaşma veri tabanında verilen faktörler kullanılarak çıkartılan , üçlü korelasyon dağılımları üzerinde yapılan değerlendirmelerde; belirgin bulanık alt küme sınırlarının tespit edilebilirliği parametreler.

Bu şartlar dikkate alınarak seçilen bulanık küme giriş değişken faktörleri özetle şunlardır:

- SPT, N değeri
- Kayma Dalgası Hız,  $V_s$  değeri
- Yer altı su seviyesi
- Zemin Derinliği
- Maksimum Yüzey İvmesi değeri

*SPT :*

SPT, N değeri, sıvılaşma veri tabanında enerji düzeltilmesi ve derinlik düzeltilmesi yapıldıktan sonra, çoğunlukla  $(N_1)_{60}$  değeri ile verilmektedir.

$$N_{60} = \frac{C_E C_B C_S C_R N_m}{0.60} \quad (4.1)$$

$N_{60}$  = Enerji düzeltmesi yapılmış SPT değeri

$N_m$  = SPT arazi ölçülmüş değeri

$C_E$  = Çekiç verimi (enerji) düzeltmesi (%60 için)

$C_B$  = 1.0 ~1.15 (delik çapı düzeltmesi)

$C_S$  = Numune kaşığı tipi düzeltmesi (standart koruyuculu tip için  $C_S=1.0$ , koruyucusuz tip için  $C_S=1.20$ )

$C_R$  =0.75 ~1.0 (Çubuk uzunluğu düzeltmesi: $C_R=1.0$   $L>10$  m için)

$$(N_1)_{60} = N_{60} \sqrt{\frac{101.325 \text{ kPa}}{\sigma_{v0'}}} \quad (4.2)$$

$\sigma_{v0'}$  = Düşey efektif gerilme

*Kayma Dalgası Hızı,  $V_s$ :*

Arazideki kayma dalgası hızları kullanılarak, tekrarlı gerilme oranları ile ilişkili, sıvılaşma zonu sınırlarını veren korelasyon eğrileri literatürde mevcuttur. Kayma dalgası hızı yönteminin, SPT ve CPT tekniklerine göre üstün yönleri vardır. Çünkü, SPT metodunda kum depozit içinde yer alan iri taneli malzemeler varsa, deney

çubuğu bunların üstüne geldiğinde, zemin direnci suni olarak artacağından, sonuçlarda sapmalar olabilmektedir. Ayrıca kayma dalgası hızı tekniği, zemini mümkün olduğunca örsellemeyen bir deneydir. Diğer deneylerde ise bu mümkün değildir. Kayma mukavemeti düşük olan zeminlerde, sismik dalga hızları düşük olmaktadır. Çünkü kayma mukavemeti olmayan ortamlarda (hava, su gibi) sismik enine dalgalar yayılmazlar. Kaya zeminler boşluğu az olan ortamlar olduğundan sismik dalga hızları yüksektir. Seed (1982), kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) yaklaşık 360 m/s'nin altında olan zeminleri, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminler olarak kabul etmiştir.

Genel olarak  $V_s > 700$  m/s ise, zemin, ana kaya (sağlam kayaç) veya pekleşmiş çok sıkı kum, çakıl, sert kildir. Böyle zeminlerde sıvılaşma riski çok düşüktür. Hatta yoktur.



$300 < V_s < 700$  m/s ise zemin, ayrıışmış kayaç veya sıkı kum, çakıl, çok katı kil ve siltli kildir.  $200 < V_s < 300$  ise, zemin çok ayrıışmış kayaçlar ile orta sıkı kum, çakıl, katı kil ve siltli kildir.  $V_s < 200$  ise, yer altı su seviyesinin yüksek olduğu, yumuşak kalın alüvyon tabakalar, gevşek kum, yumuşak kil ve siltli kildir. Gevşek kum ve silt zeminlerde  $V_s < 200$  ise sıvılaşma riski fazladır. Kayma dalgası hızı  $< 180$  m/s olan zeminlerde SPT, N değeri genelde 15 den küçüktür (Wang, vd, 2001). Literatürde kayma dalgası hızı ile ilgili yeterli bilgi olmadığından, deprem etkisi ile sıvılaşma olan veya olmayan yerlerle ilgili olarak eldeki mevcut datada yer alan SPT,  $(N_1)_{60}$  değerleri kullanılarak kayma dalgası hızları ( $V_s$ ) elde edilmiştir. Değişik zemin cinsleri için “kayma dalgası hızı” ile “arazi SPT,  $N_m$ ” (arazide tespit edilmiş, düzeltilmemiş SPT ölçümleri) değerleri arasında, bir çok araştırmacının verdiği korelasyonlar mevcuttur. Bu korelasyonlardan önemli bir kısmı Çizelge 4.1 de ki gibi özetlenmiştir (Jafari vd, 2002):

Çizelge 4.1 Değişik Zeminler İçin Kayma Dalgası Hızı Formülleri

İsim	Zemin Türü	$V_s$ (m/s)
Kanai vd (1966)	Bütün zeminler	$V_s = 19N_m^{0,6}$
Shibata (1970)	Kum	$V_s = 32N_m^{0,5}$
Ohba ve Toriuma (1970)	Alüvyon	$V_s = 85N_m^{0,31}$
Ohta vd (1972)	Kum	$V_s = 87N_m^{0,36}$
Ohsaki ve Iwasaki (1973)	Bütün zeminler	$V_s = 82N_m^{0,39}$
Ohsaki ve Iwasaki (1973)	Kohezyonsuz	$V_s = 59N_m^{0,47}$
Imai ve Yashimura (1975)	Bütün zeminler	$V_s = 92N_m^{0,329}$
Imai ve Yashimura (1975)	Bütün zeminler	$V_s = 90N_m^{0,341}$
İmai (1977)	Bütün zeminler	$V_s = 91N_m^{0,337}$
Ohta ve Goto (1978)	Bütün zeminler	$V_s = 85N_m^{0,348}$
Ohta ve Goto (1978)	Kumlar	$V_s = 88N_m^{0,34}$
Ohta ve Goto (1978)	Çakıllar	$V_s = 94N_m^{0,34}$
JRA (1980)	Killer	$V_s = 100N_m^{1/3}$
JRA (1980)	Kumlar	$V_s = 80N_m^{1/3}$
Seed ve Idris (1981)	Bütün zeminler	$V_s = 61N_m^{0,5}$
İmai ve Tonouchi (1982)	Bütün zeminler	$V_s = 97N_m^{0,314}$
Seed vd (1983)	Kumlar	$V_s = 56N_m^{0,5}$
Sykora ve Stokoe (1983)	Granüler	$V_s = 100N_m^{0,29}$

Çizelge 4.1 devam		
Lee (1990)	Kumlar	$V_s=57N_m^{0.49}$
Lee (1990)	Killer	$V_s=114N_m^{0.31}$
Lee (1990)	Siltler	$V_s=106N_m^{0.32}$
Jafari vd (1997)	Bütün zeminler	$V_s=22N_m^{0.85}$
Yokota vd (1991)	Bütün zeminler	$V_s=121N_m^{0.27}$

Çizelge 4.1’de verilen denklemler kullanılarak bütün zemin türleri için Çizelge 4.2’de verilen kayma dalgası hızları hesaplanmıştır.

### Çizelge.4.2 Kayma Dalgası Hız Hesapları

$N_m$	$V_s=32N_m^{0,5}$	$V_s=85N_m^{0,31}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	$V_s=59N_m^{0,47}$	$V_s=88N_m^{0,34}$	$V_s=94N_m^{0,34}$	$V_s=80N_m^{0,3333}$	$V_s=56N_m^{0,5}$	$V_s=100N_m^{0,29}$	$V_s=57N_m^{0,49}$	$V_s=106N_m^{0,32}$	$V_s=95,5N_m^{0,226}$	$V_s=103,4N_m^{0,205}$	$V_s=101,8N_m^{0,205}$
2	45,25	105,38	111,66	81,72	111,39	118,98	100,79	79,20	122,26	80,05	132,32	111,70	119,19	117,34
4	64,00	130,63	143,30	113,19	140,99	150,60	126,99	112,00	149,48	112,43	165,18	130,64	137,39	135,26
6	78,38	148,13	165,83	136,96	161,83	172,86	145,36	137,17	168,14	137,14	188,07	143,17	149,29	146,98
8	90,51	161,95	183,92	156,78	178,46	190,62	159,99	158,39	182,77	157,90	206,20	152,79	158,36	155,91
10	101,19	173,55	199,31	174,12	192,52	205,65	172,34	177,09	194,98	176,15	221,47	160,70	165,78	163,21
12	110,85	183,64	212,83	189,70	204,84	218,80	183,14	193,99	205,57	192,61	234,77	167,46	172,09	169,43
14	119,73	192,63	224,97	203,95	215,86	230,57	192,79	209,53	214,97	207,72	246,64	173,39	177,61	174,87
16	128,00	200,77	236,05	217,16	225,88	241,28	201,57	224,00	223,46	221,77	257,41	178,70	182,54	179,72
18	135,76	208,23	246,27	229,53	235,11	251,14	209,64	237,59	231,22	234,94	267,30	183,52	187,00	184,11
20	143,11	215,15	255,79	241,18	243,69	260,30	217,13	250,44	238,40	247,39	276,46	187,95	191,09	188,13
22	150,09	221,60	264,72	252,23	251,71	268,88	224,14	262,66	245,08	259,22	285,02	192,04	194,86	191,84
24	156,77	227,66	273,15	262,76	259,27	276,95	230,74	274,34	251,34	270,51	293,07	195,85	198,36	195,29
26	163,17	233,38	281,13	272,83	266,42	284,59	236,97	285,55	257,24	281,33	300,68	199,43	201,65	198,53
28	169,33	238,80	288,73	282,50	273,22	291,85	242,90	296,32	262,83	291,73	307,89	202,80	204,73	201,57
30	175,27	243,96	295,99	291,81	279,71	298,78	248,55	306,72	268,14	301,76	314,76	205,98	207,65	204,44
32	181,02	248,89	302,95	300,80	285,91	305,41	253,95	316,78	273,21	311,46	321,33	209,01	210,41	207,16
34	186,59	253,62	309,64	309,49	291,87	311,77	259,14	326,53	278,05	320,85	327,63	211,89	213,05	209,75
36	192,00	258,15	316,07	317,92	297,59	317,89	264,12	336,00	282,70	329,96	333,67	214,65	215,56	212,22
38	197,26	262,51	322,29	326,10	303,12	323,78	268,93	345,21	287,17	338,82	339,50	217,29	217,96	214,59
40	202,39	266,72	328,29	334,06	308,45	329,48	273,56	354,18	291,47	347,44	345,12	219,82	220,26	216,86
42	207,38	270,79	334,11	341,81	313,61	334,99	278,05	362,92	295,63	355,85	350,55	222,26	222,48	219,04
44	212,26	274,72	339,75	349,36	318,61	340,33	282,39	371,46	299,64	364,05	355,80	224,61	224,61	221,13
46	217,03	278,53	345,23	356,74	323,46	345,51	286,61	379,81	303,53	372,07	360,90	226,87	226,67	223,16
48	221,70	282,23	350,56	363,94	328,17	350,55	290,70	387,98	307,30	379,91	365,85	229,07	228,65	225,11
50	226,27	285,82	355,75	370,99	332,76	355,45	294,68	395,98	310,96	387,59	370,66	231,19	230,57	227,01
52	230,76	289,32	360,81	377,90	337,23	360,22	298,56	403,82	314,51	395,11	375,34	233,25	232,43	228,84
54	235,15	292,73	365,75	384,66	341,58	364,87	302,34	411,51	317,98	402,48	379,90	235,25	234,24	230,62
56	239,47	296,04	370,57	391,29	345,83	369,41	306,03	419,07	321,35	409,72	384,35	237,19	235,99	232,34
58	243,70	299,28	375,28	397,80	349,98	373,85	309,63	426,48	324,63	416,83	388,69	239,08	237,70	234,02
60	247,87	302,44	379,89	404,19	354,04	378,18	313,15	433,77	327,84	423,81	392,93	240,92	239,35	235,65

Çizelge 4.2 de verilen ve farklı zemin türleri için hesaplanmış kayma dalgası hızlarının SPT değerleri ile olan ilişkileri şekil 4.1 de görülmektedir. Kayma dalgası hız korelasyonları SPT,  $(N_1)_{60}$  değerlerine göre olmayıp her ülkenin düzeltilmemiş arazi SPT  $N_m$  değerleri ile ilişkilidir. Bu nedenle, çizelge 4.2' de verdiğimiz kayma dalgası hızlarını doğru olarak elde etmek için, sıvılaşma veri tabanında mevcut olan SPT,  $(N_1)_{60}$  değerlerini her ülkenin düzeltilmemiş arazi  $N_m$  değerlerine aşağıdaki formülleri ve Çizelge 4.3 'ü kullanarak dönüştürmek gereklidir:

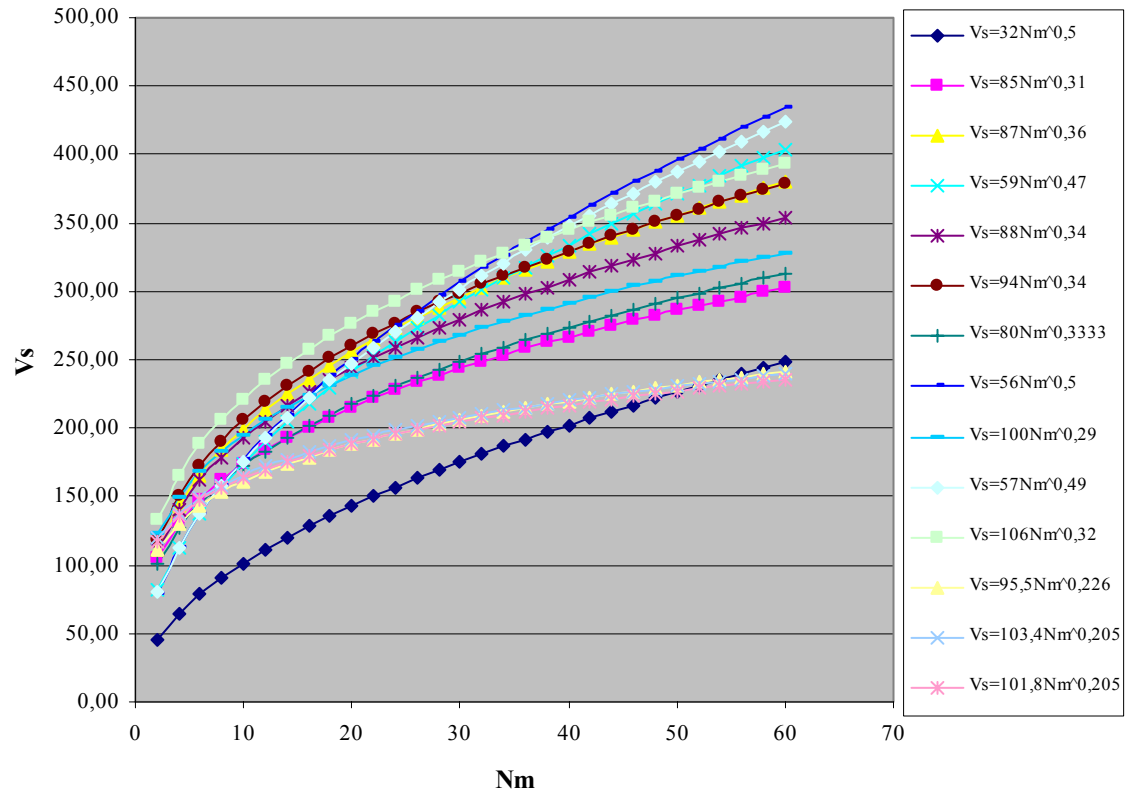
$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (4.3)$$

$$\text{burada, } C_N = \sqrt{\frac{101.325 \text{ kPa}}{\sigma_{v0'}}} \quad (\sigma_{v0'} < 200 \text{ kPa için}) \quad (4.4)$$

$$\text{veya } C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma_{v0'}}{101.325}} \quad 200 < \sigma_{v0'} < 300 \text{ kPa için}) \quad (4.5)$$

$$N_m = \frac{(N_1)_{60}}{C_N \cdot C_E \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B} \quad (4.6)$$

$C_N$ ,  $C_E$ ,  $C_R$ ,  $C_S$  ve  $C_B$  SPT düzeltme faktörleri olup Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı zeminler için kayma dalgası korelasyon eğrileri

Çizelge 4.3 SPT için düzeltme faktörleri (Uzundurukan, 2001 ve [www.greggdrilling.com](http://www.greggdrilling.com))

Düzeltilme Faktörleri	Türkiye	Amerika	Japonya	Çin	Arjantin
$C_E$	0.75	1.0	$(1.3+1.12)/2=1.21$	$(1.0+0.83)/2=0.915$	0.75
$C_R$	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$C_S$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$C_B$	1.05	1.0	1.0	1.0	1.0

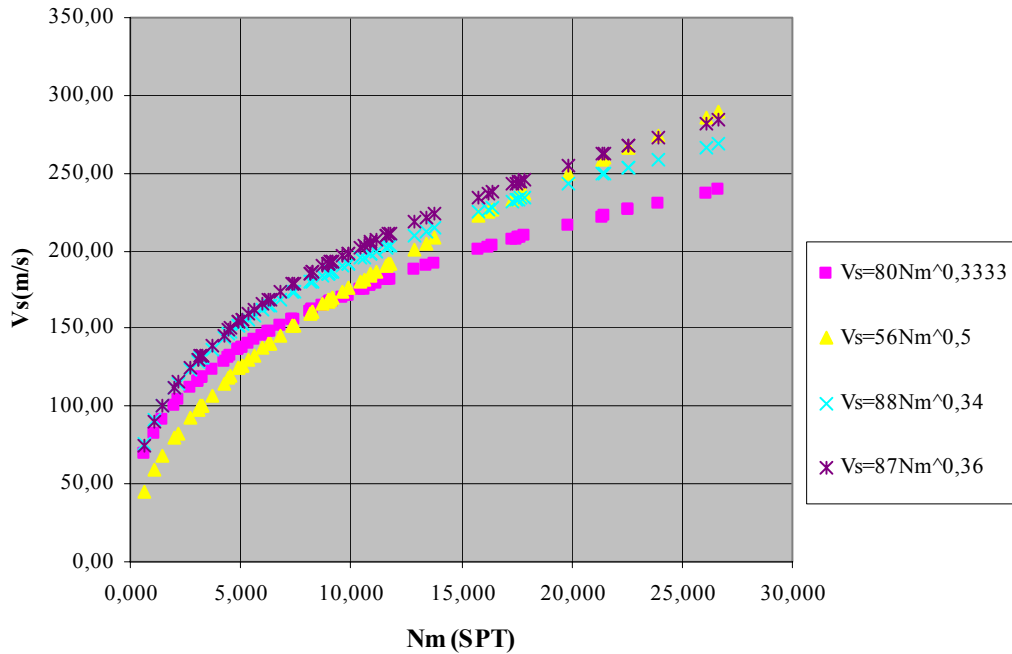
$C_B \cong C_S = 1.0$  olduğu için:

$$N_m = \frac{(N_1)_{60}}{C_N \cdot C_E \cdot C_R} = \frac{(N_1)_{60}}{0.75 C_N \cdot C_E} \quad (4.7)$$

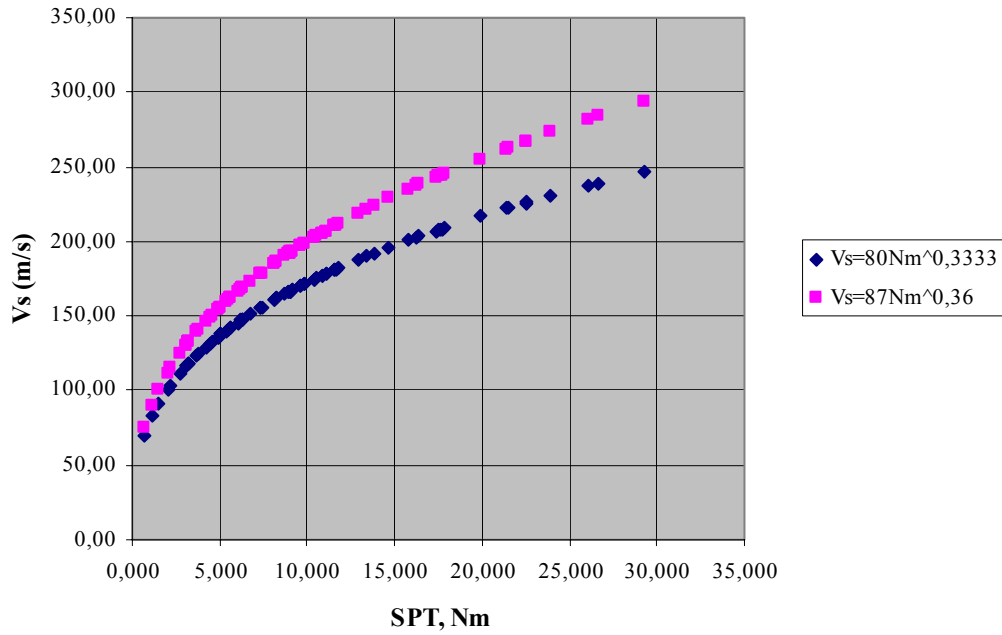
Olur. Sonuç olarak, düzeltme faktörleri kullanılarak SPT,  $(N_1)_{60}$  değerlerinden geriye dönülerek, Çizelge 4.4 de özetlenen formüllerle, her ülke için arazi  $N_m$  değerleri elde edilmiştir. Bunun için, Microsoft Excel’de Ek-1 de verilen çizelge oluşturulmuş ve SPT,  $N_m$  değerleri ile, “kohezyonsuz, alüvyon, kum, silt ve çakıl zemin depozitleri” için Jafari vd (2002), tarafından verilen kayma dalgası hız korelasyonları kullanarak,  $V_s$  değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan bu değerlerden, “granüler zeminler” için kayma dalgası hız eğrileri” üretilmiştir (Şekil 4.2). Daha sonra yalnız “kumlar” için geçerli olan  $V_s$  hız korelasyonlarından  $V_s=87 N_m^{0,36}$  ve  $V_s=80 N_m^{0,333}$  kullanılarak alt ve üst sınır eğrileri üretilmiştir (Şekil.4.3).

Çizelge 4.4 Ülkelere göre  $N_m$  formülleri

Ülke	Türkiye	Amerika	Japonya	Çin	Arjantin
SPT, $N_m$	$\frac{1.693(N_1)_{60}}{C_N}$	$\frac{1.333(N_1)_{60}}{C_N}$	$\frac{1.102(N_1)_{60}}{C_N}$	$\frac{1.457(N_1)_{60}}{C_N}$	$\frac{1.778(N_1)_{60}}{C_N}$



Şekil.4.2 Granüler zeminler için kayma dalgası hız eğrileri



Şekil 4.3 Kumlar için kayma dalgası hızı alt ve üst sınır eğrileri.

Çizelge 4.5 de verilen depremlere ait sıvılaşma veri tabanındaki sıvılaşmaya etken arazi parametreleri, “magnitüd, ivme, YASS, zemin derinliği,  $(N_1)_{60}$ , ince tane yüzdesi (F%) ve ortalama tane boyutu ( $D_{50}$ )” EK-2 deki çizelgede özetlenmiştir. Ek-2 de sunulan çizelgede “sıvılaşma hanesinde” “verinin tümü”, “Yes” ve “No” seçeneklerinden “Yes” seçilirse sıvılaşmanın olduğu parametreler dizilmekte, şayet “No” seçilirse sıvılaşmanın olmadığı parametreler dizilmekte, şayet “tümü” seçilirse sıvılaşmanın olduğu ve olmadığı parametreler beraberce elde edilmektedir.

Bu çizelgenin bu şekilde hazırlanmasının sebebi üç boyutlu sıvılaşma korelasyon grafiklerinin üretilmesinde kullanmak için sıvılaşma: “Yes (var)” ve sıvılaşmama: “No (yok)” veri dağılımlarını ayrı ayrı elde edebilmektedir.

Çizelge.4.5 Sıvılaşma verilerinin elde edildiği depremler

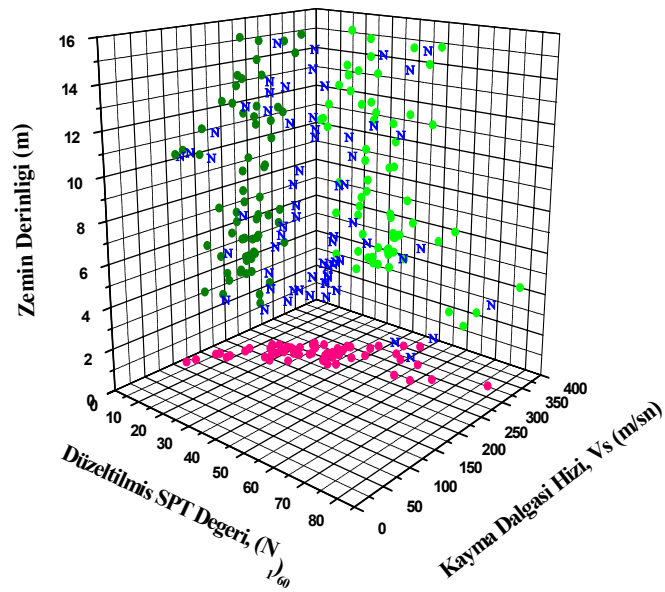
Ülke	Yer	Tarih	Magnitüd	$a_{max}/g$
Japonya	Mino-Owari	1891	7.9	0.20~0.32
Japonya	Kanto	1923	7.9	0.13~0.23
Japonya	Tohnankai	1944	8.0	0.16~0.20
Japonya	Fukui	1948	7.3	0.35-0.40
Japonya	Niigata	1964	7.5	0.16
Japonya	Tokachi-Oki	1968	7.9	0.20-0.23
Japonya	Miyagiken-Oki	1978	6.7	0.10-0.14
Japonya	Miyagiken-Oki	1974	7.4	0.20-0.28
Japonya	Chibakenchubu	1980	6.1	0.10
USA	San Francisco	1957	5.5	0.19
USA	Alaska	1964	8.3	0.16
USA	San Fernando	1971	6.6	0.45
USA	Loma Priet	1989	7.1	
USA	Imperial Valley	1979	6.6	0.2-0.60
Pan Amerika	Guatemala	1976	7.5	0.14
USA	Chaleston Alanı	1886		0.20~0.50
USA	Borah Peak	1983	7.5	0.3-0.5
USA	Luzon Alanı	1990	7.8	0.13-0.15

#### 4.3. $(N_1)_{60}$ , YASS, Zemin Derinliği, Deprem İvmesi ve Kayma Dalgası Hızı, $(V_s)$ Arasında Üçlü Dağılımların ve Bulanık Alt Küme Aralıklarının Bulunması.

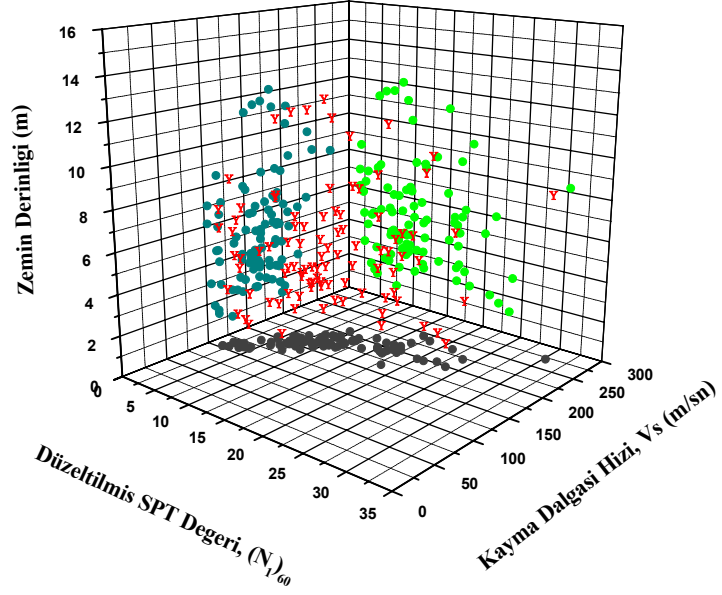
Microsoft Excel programında oluşturulan EK-2 de verilen çizelge kullanılarak  $SPT(N_1)_{60}$ , Kayma Dalgası Hızı,  $(V_s)$  ve Zemin Derinliği arasında, sıvılaşma ve sıvılaşmama verisinin dağılım ilişkisi, Şekil 4.4 ve 4.5 de görüldüğü biçimde elde edilmiştir. Bulanık alt küme aralıklarının belirlenmesi açısından bu iki şekil beraberce değerlendirilmelidir. Şekil 4.5 den görüleceği gibi,  $SPT(N_1)_{60} \leq 30$  için sıvılaşma çoğunlukla olmakta iken, Şekil 4.4 den görüleceği üzere  $SPT(N_1)_{60} > 30$  için



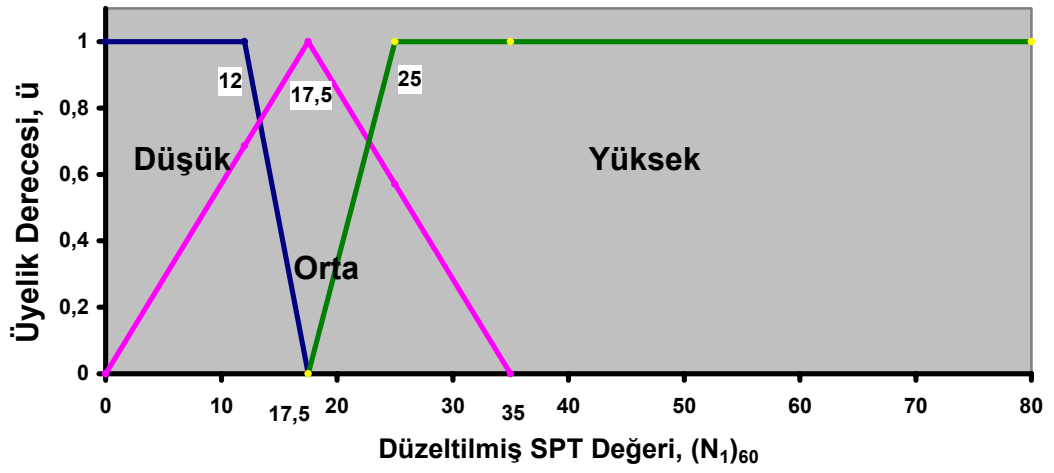
sıvılaşma olmamaktadır. Yine Şekil 4.4 ve 4.5 ten, SPT  $(N_1)_{60} \leq 12$  için sıvılaşma datasının sıvılaşmama datasına göre çok daha fazla olduğu görülmektedir.  $12 < \text{SPT } (N_1)_{60} \leq 30$  için ise sıvılaşma veya sıvılaşmama riski orta derecededir, yani birbirine yakındır. SPT  $(N_1)_{60}$  için yukarıda belirlenen sınırlar, ileride verilecek grafiklerde de aynı şekilde gözlenebilir. Buna göre, SPT  $(N_1)_{60}$  için tespit edilen bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.6 da görülmektedir.



Şekil 4.4. SPT  $(N_1)_{60}$ , kayma dalgası hızı ( $V_s = 80 N_m^{0.333}$ ) ve zemin derinliği ilişkisi (N: “Sıvılaşma yok” için)

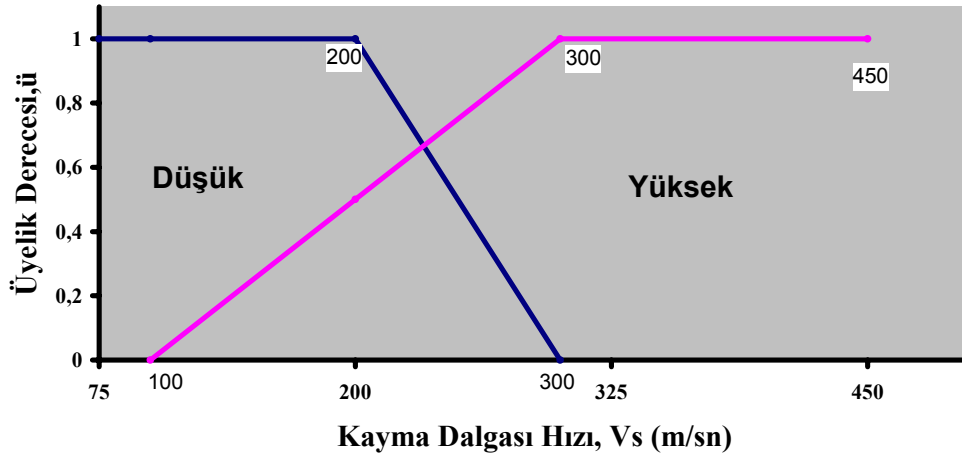


Şekil 4.5. SPT  $(N_1)_{60}$ , kayma dalgası hızı ( $V_s=80 N_m^{0.333}$ ) ve zemin derinliği ilişkisi (Y: “Sıvılaşma var” için)

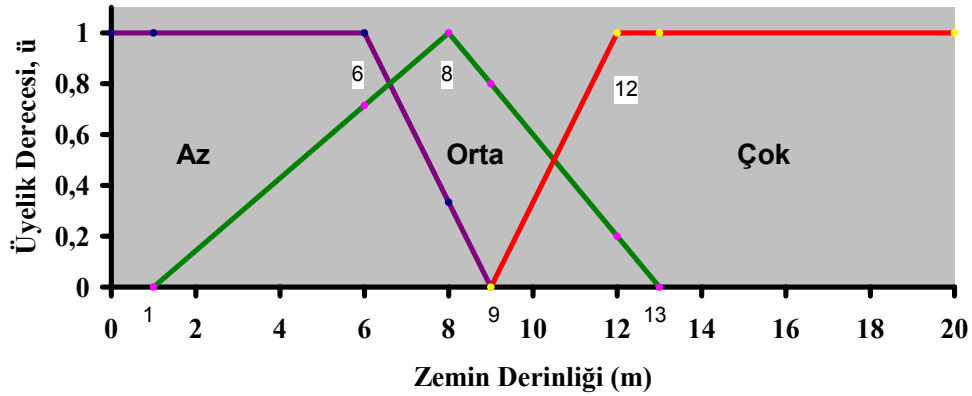


Şekil 4.6. SPT  $(N_1)_{60}$  için bulanık alt küme aralıkları

Şekil 4.4 ve 4.5 e göre sıvılaşmanın en çok görüldüğü kayma dalgası hızları,  $V_s \leq 200$  olup,  $V_s=200-300$  arasında sıvılaşma olma oranı azalırken olmama oranı artmaktadır. Özellikle  $V_s \geq 300$  için sıvılaşma olma riski hemen, hemen hiç yoktur. Kayma dalgası hızları “ $V_s$ ” için, bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.7 de verilmiştir. Zemin derinliği  $\leq 6.0$  m için ise; sıvılaşma oranı, olmamaya göre çok daha yüksek iken; 6.0 m den sonra 12.0 m ye kadar sıvılaşma olma ve olmama durumu birbirine yakın sayılabilir. Özellikle 12.0 m den sonra ise çoğunlukla sıvılaşma olmamaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde zemin derinliğine bağlı olarak bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.8 de gösterildiği tarz da belirlenmiştir.

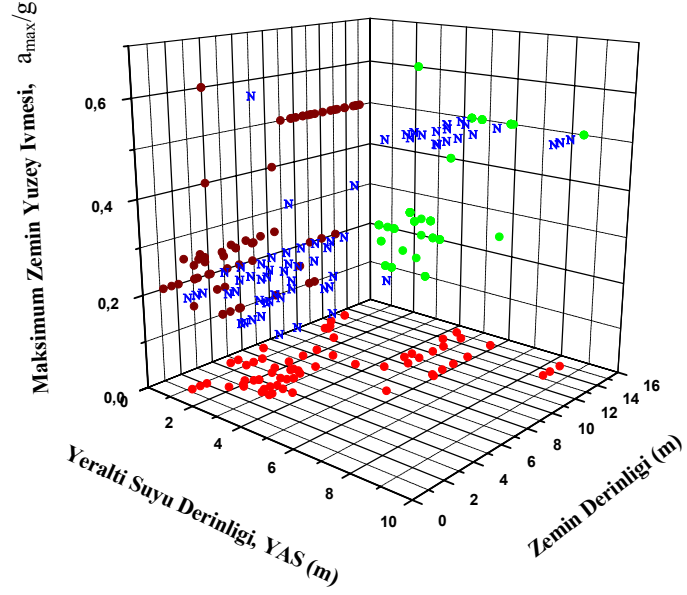


Şekil 4.7. Kayma dalgası hızı,  $V_s$  için bulanık alt küme aralıkları

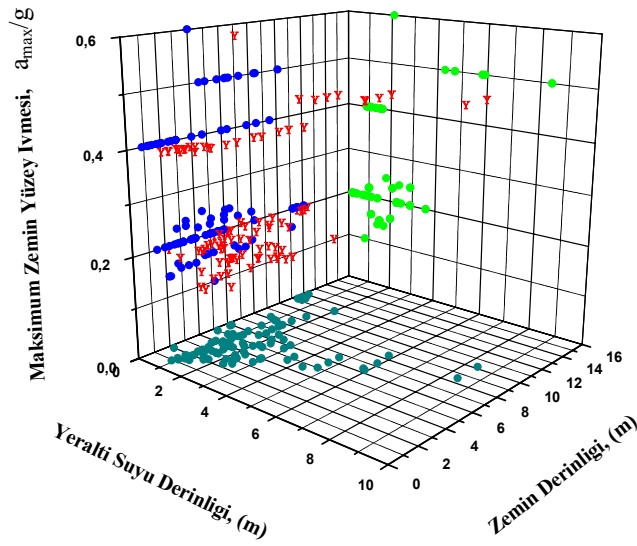


Şekil 4.8. Zemin derinliği için bulanık alt küme aralıkları

Şekil 4.9 ve 4.10 da yeraltı su seviyesi zemin derinliği ve deprem ivmesi arasındaki; sıvılaşma olma ve olmama durumuna göre, dağılım ilişkileri görülmektedir. Zemin derinliği için, Şekil 4.4 ve 4.5 ten tespit ettiğimiz bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.9 ve 4.10 da da aynen görülmektedir. Sıvılaşma olma datası çoğunlukla zemin derinliği 6 m ye kadar daha fazla iken, 6 m den sonra sıvılaşma riski azalmaktadır. Ayrıca yeraltı suyu derinliği de özellikle ilk 1.5 m için sıvılaşma açısından daha riskli olduğu yine Şekil 4.9 ve 4.10 daki datanın dağılımından görülmektedir. 1.5 m ile 3 m arasında ise sıvılaşma riski yine oldukça fazladır. Ancak 3 m den sonra bu risk azalmakta, özellikle 10 m den sonra sıvılaşma olduğuna dair bir veri görülmemektedir. Buna göre 10 m den sonra sıvılaşma riski çok az denilebilir. Yalnız bu ifadeden 10 m den sonra sıvılaşma hiç olmayacağı anlamı çıkarılmamalıdır.

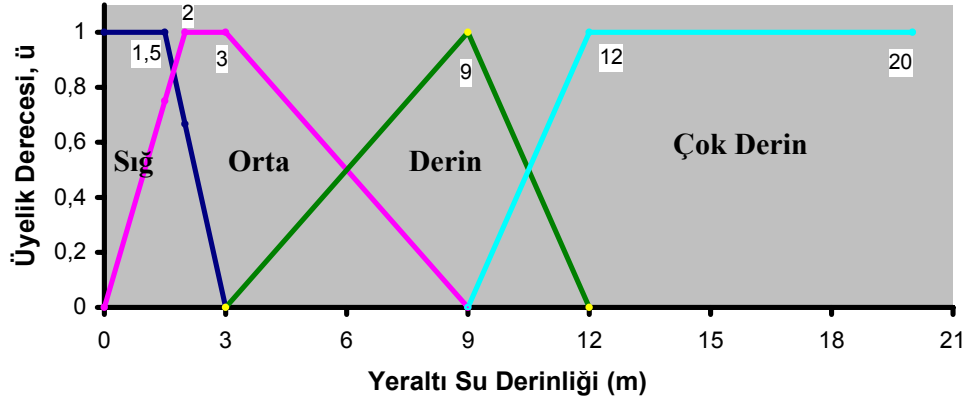


Şekil 4.9. Yer altı su seviyesi – zemin derinliği–ivme ilişkisi (N=Sıvılaşma yok)



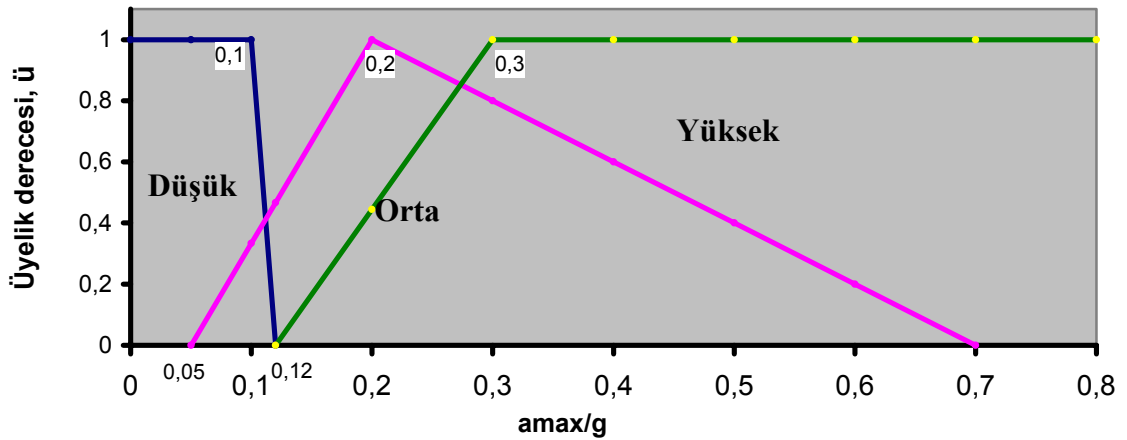
Şekil 4.10. Yeraltı suyu derinliği–zemin derinliği–ivme ilişkisi (Y=Sıvılaşma var)

Yer altı suyu bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.11 deki gibi tespit edilmiştir.



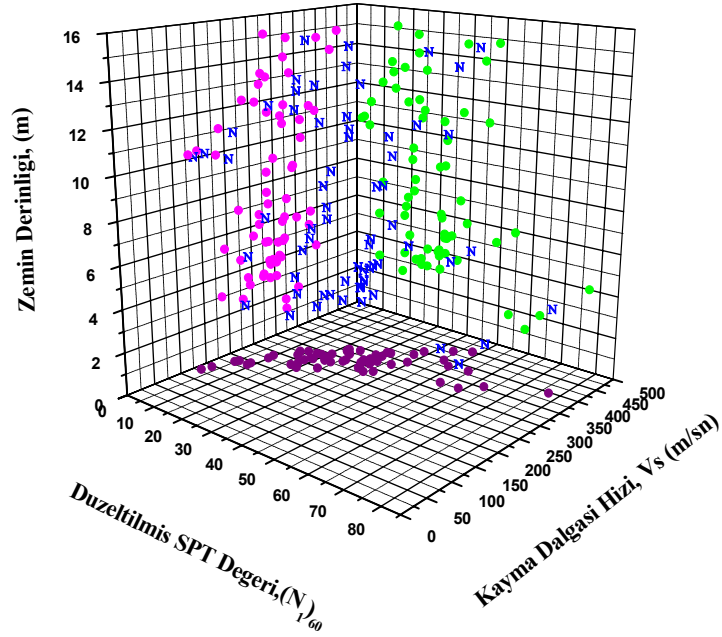
Şekil 4.11 Yer altı su derinliği bulanık alt küme aralıkları

Yine Şekil 4.9 ve 4.10 dan deprem ivmesi 0.1 g den küçük ise sınılaşma olmayacağı görülmektedir. Bu ise daha önceki bölümlerde “ Sınılaşma olması için en az 0.1g gibi bir deprem ivme büyüklüğü olması gerekir.” İfadesini teyit etmektedir.  $a_{max} = 0.2g$  sınılaşmaya sebep olabilecek yeterince yüksek bir değer olduğu bu şekillerden görülmektedir. Buna göre deprem ivmesi bulanık alt küme aralıkları ve üyelik dereceleri Şekil 4.12 deki gibi belirlenmiştir.

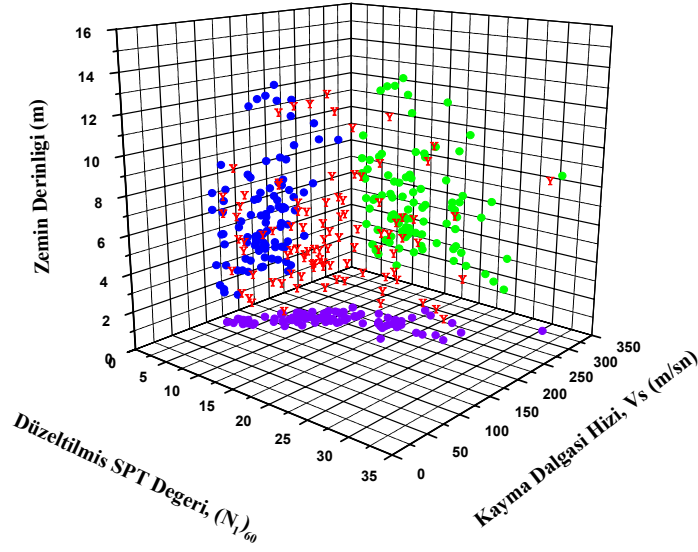


Şekil 4.12. Deprem ivmesi bulanık alt küme aralıkları

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14; SPT  $(N_1)_{60}$  değeri, kayma dalgası hızı ( $V_s=87 N_m^{0,36}$ ) ve zemin derinliği arasındaki sınırlama olan ve olmayan datanın dağılım korelasyonu verilmektedir. Buna göre SPT  $(N_1)_{60}$ ,  $V_s$  ve zemin derinliği bulanık alt kümeleri ve sınırları Şekil 4.4 ,4.5 ,4.9 ve 4.10 da gözlenen bulgularla yaklaşık aynıdır. Yalnız farklı olarak kayma dalgası hızı için Şekil 4.3 de verilen kayma dalgası hızı eğrilerinden en üstteki eğri olan ( $V_s=87 N_m^{0,36}$ ) kullanılmıştır. Buna göre, sınırlama görülebilecek maksimum kayma dalgası hızı  $V_s < 300$  m/s dir.  $V_s > 300$  m/s için sınırlama olmayacağı söylenebilir. O halde kayma dalgası bulanık alt küme aralıkları daha önce belirlendiği gibi uygundur.



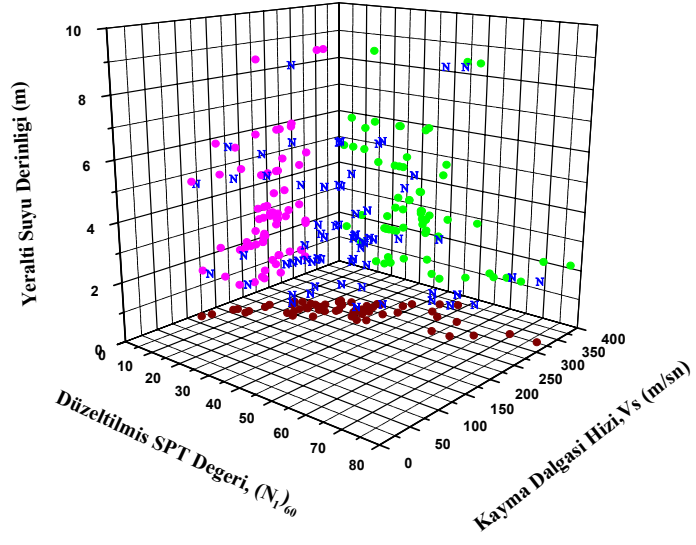
Şekil 4.13 Düzeltilmiş SPT değeri  $(N_1)_{60}$ -kayma dalgası hızı ( $V_s=87 N_m^{0,36}$ )- zemin derinliği ilişkisi (N= Sınırlama yok)



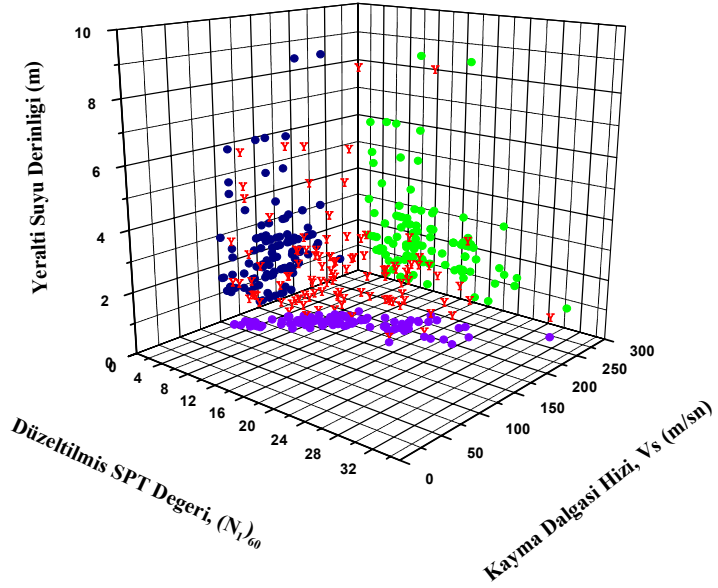
Şekil 4.14 Düzeltilmiş SPT değeri  $(N_1)_{60}$ -kayma dalgası hızı ( $V_s=87 N_m^{0,36}$ )- zemin derinliği ilişkisi (Y= Sıvılaşma var)

Şekil 4.15 de 4.16 da, SPT  $(N_1)_{60}$  değeri, kayma dalgası hızı ve yer altı suyu derinliği arasındaki sıvılaşma olan ve olmayan datanın dağılım ilişkisi verilmektedir. Yer altı su seviyesi 1.5 m den az ise sıvılaşma olan data sayısı, olmayana göre daha fazla olmaktadır. Yer altı suyu derinleştikçe sıvılaşma riski azalmaktadır. Ayrıca SPT  $(N_1)_{60} \leq 12$  için sıvılaşma riski çok fazla olmaktadır.  $V_s \leq 200$  için ise sıvılaşma riski çok fazladır.



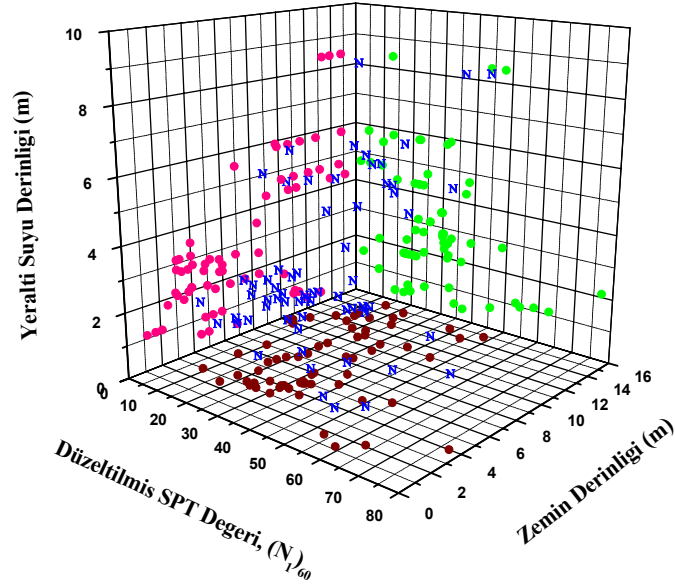


Şekil 4.15 Düzeltilmiş SPT değeri- kayma dalgası hızı- yer altı suyu derinliği ilişkisi  
(N= Sıvılaşma yok)

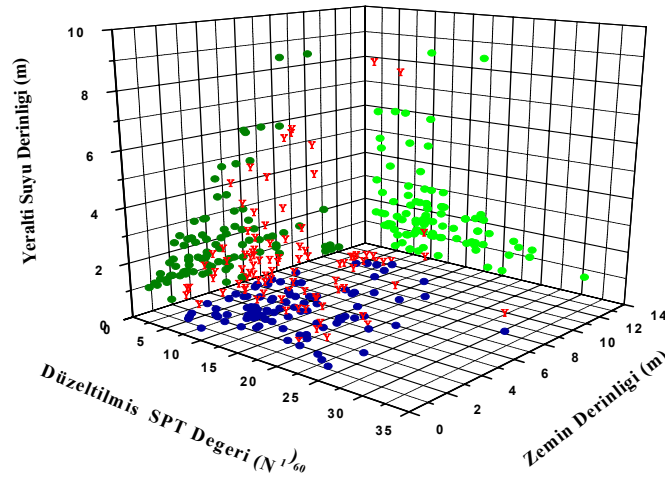


Şekil 4.16 Düzeltilmiş SPT değeri- kayma dalgası hızı- yer altı suyu derinliği ilişkisi  
(N= Sıvılaşma var)

Şekil 4.17 ve 4.18 de SPT ( $N_1$ )<sub>60</sub> zemin derinliği ve yer altı suyu derinliği arasındaki sınıvlaşma datasının dağılım ilişkisi görülmektedir. Zemin derinliği  $\leq 6.0$  m için sınıvlaşma riski fazla olmamaktadır. Zemin derinliği arttıkça, düşey gerilme ve buna bağlı çevre basıncı artacağından, taneler arası sıkışma artar ve sınıvlaşma riski azalır.



Şekil 4.17. SPT - zemin derinliği - yer altı suyu derinliği ilişkisi (N=Sınıvlaşma yok)



Şekil 4.18. SPT - zemin derinliği- yeraltı suyu derinliği ilişkisi (Y=Sınıvlaşma var)

#### 4.4 Bulanık Alt Küme Fonksiyonlarının Bulunması

Bölüm 4.34 de anlatılan bütün bu üçlü sıvılaşma datası dağılım korelasyonlarından sıvılaşmaya etki eden SPT  $(N_1)_{60}$ , yer altı suyu seviyesi, zemin derinliği, kayma dalgası hızı ve deprem ivmesi parametrelerinin bulanık alt küme sınırları ve üyelik dereceleri Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.11 ve 4.12 de verildiği üzere elde edildikten sonra her bir parametre için üçgen ve yamuklardan oluşan bulanık alt kümelerin üyelik fonksiyonları şu şekilde elde edilmiştir:

*SPT,  $(N_1)_{60}$ :*

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sol}} = 1.0; 0 \leq N \leq 12 \right\} \\
 \text{Düşük: } & \left\{ \bar{u}_{\text{sağ}} = \frac{17.5 - N}{5.50}; 12 \leq N \leq 17.5 \right\} \\
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sol}} = \frac{N}{17.5}; 0 \leq N \leq 17.5 \right\} \\
 \text{Orta: } & \left\{ \bar{u}_{\text{sağ}} = \frac{35 - N}{17.5}; 17.5 \leq N \leq 35 \right\} \\
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sol}} = \frac{N - 17.5}{7.5}; 17.5 \leq N \leq 25 \right\} \\
 \text{Yüksek: } & \left\{ \bar{u}_{\text{sağ}} = 1.0; 25 \leq N \leq 80 \right\}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

*Yer altı su seviyesi, YASS(m):*

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sol}} = 1.0; 0 \leq \text{YASS} \leq 1.5 \text{ m} \right\} \\
 \text{Sığ: } & \left\{ \bar{u}_{\text{Sağ}} = \frac{3 - \text{YASS}}{1.5}; 1.5 \leq \text{YASS} \leq 3 \text{ m} \right\} \\
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sol}} = \frac{\text{YASS}}{2}; 0 \leq \text{YASS} \leq 2 \text{ m} \right\} \\
 \text{Orta: } & \left\{ \bar{u}_{\text{Orta}} = 1.0; 2 \leq \text{YASS} \leq 3 \text{ m} \right\} \\
 & \left\{ \bar{u}_{\text{Sağ}} = \frac{9 - \text{YASS}}{6}; 3 \leq \text{YASS} \leq 9 \text{ m} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{\text{YASS} - 3}{6}; 3 \leq \text{YASS} \leq 9\text{m} \right\} \\
\text{Derin:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{12 - \text{YASS}}{3}; 9 \leq \text{YASS} \leq 12\text{m} \right\} \\
& \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{\text{YASS} - 9}{3}; 9 \leq \text{YASS} \leq 12\text{m} \right\} \\
\text{Çok Derin:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = 1.0; \text{YASS} \geq 12\text{m} \right\}
\end{aligned}$$

*Zemin Derinliği, D(m):*

$$\begin{aligned}
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = 1.0; 0 \leq D \leq 6\text{m} \right\} \\
\text{Az:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{9 - D}{3}; 6 \leq D \leq 9\text{m} \right\} \\
& \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{D - 1}{7}; 1 \leq D \leq 8\text{m} \right\} \\
\text{Orta:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{13 - D}{5}; 8 \leq D \leq 13\text{m} \right\} \\
& \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{D - 9}{3}; 9 \leq D \leq 12\text{m} \right\} \\
\text{Çok:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = 1.0; 12 \leq D \leq 20\text{m} \right\}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

*Kayma Dalgası Hızı, V<sub>s</sub>(m/s):*

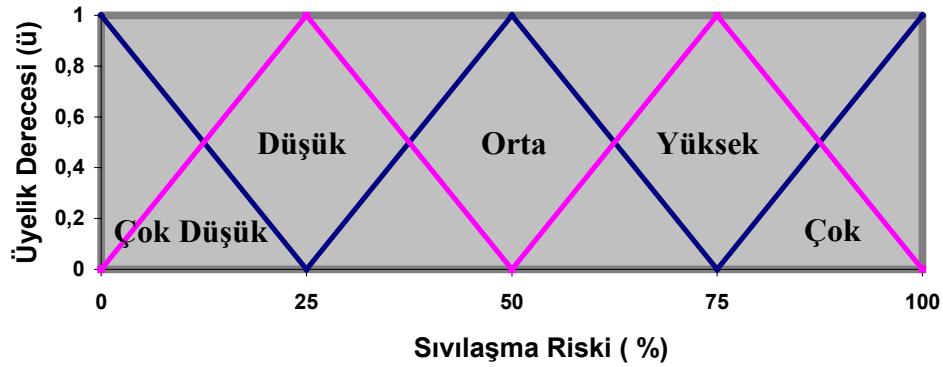
$$\begin{aligned}
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = 1.0; 75 \leq V_s \leq 200\text{m} \right\} \\
\text{Düşük:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{300 - V_s}{100}; 200 \leq V_s \leq 300\text{m} \right\} \\
& \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{V_s - 100}{200}; 100 \leq V_s \leq 300\text{m} \right\} \\
\text{Yüksek:} & \\
& \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = 1.0; 300 \leq V_s \leq 450\text{m} \right\}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Deprem İvmesi,  $a_{\max}/g$ :

$$\begin{aligned}
 & \{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = 1.0; 0 \leq a_{\max}/g \leq 0.1 \} \\
 \text{Düşük:} & \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{0.12 - a_{\max}/g}{0.2}; 0.1 \leq V_s \leq 0.12 \right\} \\
 & \{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{a_{\max}/g - 0.05}{0.15}; 0.05 \leq a_{\max}/g \leq 0.2 \} \\
 \text{Orta:} & \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = \frac{0.7 - a_{\max}/g}{0.5}; 0.2 \leq a_{\max}/g \leq 0.7 \right\} \\
 & \{ \ddot{u}_{\text{Sol}} = \frac{a_{\max}/g - 0.10}{0.20}; 0.10 \leq a_{\max}/g \leq 0.3 \} \\
 \text{Yüksek:} & \left\{ \ddot{u}_{\text{Sağ}} = 1.0; 0.3 \leq a_{\max}/g \leq 0.8 \right\}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

#### 4.5 Bulanık Çıktı Kümesinin Oluşturulması

Sıvılaşmaya etki eden bulanık parametreler bulanık modelin giriş değişkenlerini oluşturmaktadırlar. Bu bulanık girişler, bulanık dilsel kurallar ile ilişkilendirilerek, sıvılaşma riskini (%) çıkış değişkenlerini verecek olan “çok düşük”, “düşük”, “orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” gibi bulanık çıkış alt kümeleri Şekil 4.19’deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.19. Sıvılaşma riski fuzzy alt grupları

#### 4.6 Bulanık Sıvılaşma Kuralları

Çizelge 4.6. da bulanık giriş parametrelerinin dilsel alt kümeleri özetlenmiştir:

Çizelge 4.6. Bulanık girişlerin alt kümeleri

SPT ( $N_1$ ) <sub>60</sub>	$V_s$	YAS	Derinlik	$a_{max}$
Düşük	Düşük	Sığ	Az	Düşük
Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta
Yüksek		Derin	Çok	Yüksek
+	+	+Çok derin	+	+
3 Küme	2 Küme	4 Küme	3 Küme	3 Küme

Toplam Küme Sayısı  
=15 Küme

Çizelge 4.6. dan toplam alt küme sayısının 15 tane olduğu, bu 15 küme arasında yazılacak toplam kural sayısının ise;  $(3 \times 2 \times 4 \times 3 \times 3 = 216)$  olduğu görülmektedir. Bu 216 tane kural “kural tabanı” olarak ifade edilen bir çizelge içinde aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Bulanık sıvılaşma kuralları

Kural No	( $N_1$ ) <sub>60</sub>	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
1	Düşük	Düşük	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
2	Düşük	Düşük	Sığ	Az	Orta	Çok yüksek
3	Düşük	Düşük	Sığ	Az	Yüksek	Çok yüksek
4	Düşük	Düşük	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
5	Düşük	Düşük	Sığ	Orta	Orta	Yüksek
6	Düşük	Düşük	Sığ	Orta	Yüksek	Çok yüksek
7	Düşük	Düşük	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
8	Düşük	Düşük	Sığ	Çok	Orta	Orta
9	Düşük	Düşük	Sığ	Çok	Yüksek	Yüksek
10	Düşük	Düşük	Orta	Az	Düşük	Çok düşük
11	Düşük	Düşük	Orta	Az	Orta	Yüksek
12	Düşük	Düşük	Orta	Az	Yüksek	Çok yüksek
13	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Düşük	Çok düşük
14	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Orta	Yüksek
15	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
16	Düşük	Düşük	Orta	Çok	Düşük	Çok düşük
17	Düşük	Düşük	Orta	Çok	Orta	Düşük
18	Düşük	Düşük	Orta	Çok	Yüksek	Orta
19	Düşük	Düşük	Derin	Az	Düşük	Çok düşük
20	Düşük	Düşük	Derin	Az	Orta	Yüksek

Çizelge 4.7devam						
Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
21	Düşük	Düşük	Derin	Az	Yüksek	Yüksek
22	Düşük	Düşük	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
23	Düşük	Düşük	Derin	Orta	Orta	Orta
24	Düşük	Düşük	Derin	Orta	Yüksek	Yüksek
25	Düşük	Düşük	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
26	Düşük	Düşük	Derin	Çok	Orta	Düşük
27	Düşük	Düşük	Derin	Çok	Yüksek	Orta
28	Düşük	Düşük	Çok derin	Az	Düşük	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
29	Düşük	Düşük	Çok derin	Az	Orta	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
30	Düşük	Düşük	Çok derin	Az	Yüksek	YAS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
31	Düşük	Düşük	Çok derin	Orta	Düşük	Çok düşük
32	Düşük	Düşük	Çok derin	Orta	Orta	Düşük
33	Düşük	Düşük	Çok derin	Orta	Yüksek	Düşük
34	Düşük	Düşük	Çok derin	Çok	Düşük	Düşük
35	Düşük	Düşük	Çok derin	Çok	Orta	Düşük
36	Düşük	Düşük	Çok derin	Çok	Yüksek	Düşük
37	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
38	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Az	Orta	Çok yüksek
39	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Az	Yüksek	Çok yüksek
40	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
41	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Orta	Orta	Yüksek
42	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Orta	Yüksek	Çok yüksek
43	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
44	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Çok	Orta	Orta
45	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Sığ	Çok	Yüksek	Yüksek
46	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Az	Düşük	Çok düşük
47	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Az	Orta	Yüksek
48	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Az	Yüksek	Çok yüksek
49	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Orta	Düşük	Çok düşük
50	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Orta	Orta	Yüksek
51	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
52	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok	Çok	Düşük	Çok düşük
53	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok	Çok	Orta	Düşük
54	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok	Çok	Yüksek	Orta
55	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Az	Düşük	Çok düşük
56	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Az	Orta	Yüksek
57	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Az	Yüksek	Yüksek
58	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
59	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Orta	Orta	Orta
60	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Orta	Yüksek	Yüksek
61	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
62	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Çok	Orta	Düşük

Çizelge 4.7 devam						
Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
63	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Derin	Çok	Yüksek	Orta
64	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Az	Düşük	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
65	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Az	Orta	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
66	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Az	Yüksek	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
67	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Orta	Düşük	Çok düşük
68	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Orta	Orta	Düşük
69	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Orta	Yüksek	Düşük
70	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Çok	Düşük	Düşük
71	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Çok	Orta	Düşük
72	Düşük	Yüksek $V_s < 250$	Çok derin	Çok	Yüksek	Düşük
73	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
74	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Orta	Çok yüksek
75	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Yüksek	Çok yüksek
76	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
77	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Orta	Yüksek
78	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Yüksek	Yüksek
79	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
80	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Orta	Orta
81	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Yüksek	Orta
82	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Az $D > YAS$	Düşük	Çok düşük
83	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Az $D > YAS$	Orta	Yüksek
84	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Az $D > YAS$	Yüksek	Yüksek
85	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Orta $D > YAS$	Düşük	Çok düşük
86	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Orta $D > YAS$	Orta	Yüksek
87	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Orta $D > YAS$	Yüksek	Yüksek
88	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Çok $D > YAS$	Düşük	Çok düşük
89	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Çok $D > YAS$	Orta	Orta
90	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Orta	Çok $D > YAS$	Yüksek	Orta
91	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Az $D > YAS$	Düşük	Çok düşük
92	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Az $D > YAS$	Orta	Yüksek
93	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Az $D > YAS$	Yüksek	Yüksek
94	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
95	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Orta	Orta	Orta



Çizelge 4.7 devam

Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
96	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Orta	Yüksek	Yüksek
97	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
98	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Çok	Orta	Düşük
99	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Derin	Çok	Yüksek	Düşük
100	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Az	Düşük	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
101	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Az	Orta	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
102	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Az	Yüksek	YASS > 9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
103	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Orta > 9m	Düşük	Çok düşük
104	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Orta > 9m	Orta	Orta
105	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Orta > 9m	Yüksek	Orta
106	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Çok	Düşük	Çok düşük
107	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Çok	Orta	Düşük
108	Orta	Düşük $180 < V_s < 300$	Çok derin	Çok	Yüksek	Düşük
109	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
110	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Orta	Çok yüksek
111	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az	Yüksek	Çok yüksek
112	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
113	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Orta	Yüksek
114	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta	Yüksek	Yüksek
115	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
116	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Orta	Orta
117	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok	Yüksek	Orta
118	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az D > YAS	Düşük	Çok düşük
119	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az D > YAS	Orta	Yüksek
120	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Az D > YAS	Yüksek	Yüksek
121	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta D > YAS	Düşük	Çok düşük
122	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta D > YAS	Orta	Yüksek
123	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Orta D > YAS	Yüksek	Yüksek
124	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok D > YAS	Düşük	Çok düşük
125	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok D > YAS	Orta	Orta
126	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Sığ	Çok D > YAS	Yüksek	Orta
127	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Derin	Az D > YAS	Düşük	Çok düşük
128	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Derin	Az D > YAS	Orta	Yüksek
129	Orta	Yüksek $180 < V_s < 300$	Derin	Az D > YAS	Yüksek	Yüksek
130	Orta	Yüksek	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
131	Orta	Yüksek	Derin	Orta	Orta	Orta

Çizelge 4.7 devam						
Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
132	Orta	Yüksek	Derin	Orta	Yüksek	Yüksek
133	Orta	Yüksek	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
134	Orta	Yüksek	Derin	Çok	Orta	Düşük
135	Orta	Yüksek	Derin	Çok	Yüksek	Düşük
136	Orta	Yüksek	Çok derin	Az	Düşük	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
137	Orta	Yüksek	Çok derin	Az	Orta	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
138	Orta	Yüksek	Çok derin	Az	Yüksek	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
139	Orta	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Düşük	Çok düşük
140	Orta	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Orta	Orta
141	Orta	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Yüksek	Orta
142	Orta	Yüksek	Çok derin	Çok	Düşük	Çok düşük
143	Orta	Yüksek	Çok derin	Çok	Orta	Düşük
144	Orta	Yüksek	Çok derin	Çok	Yüksek	Düşük
145	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
146	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Az	Orta	Orta
147	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Az	Yüksek	Orta
148	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
149	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Orta	Orta	Orta
150	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Orta	Yüksek	Orta
151	Yüksek N>17.5	Düşük	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
152	Yüksek N>17.5	Düşük	Orta	Çok	Orta	Düşük
153	Yüksek N>17.5	Düşük	Orta	Çok	Yüksek	Düşük
154	Yüksek	Düşük	Orta	Az	Düşük	Çok düşük
155	Yüksek	Düşük	Orta	Az	Orta	Orta
156	Yüksek	Düşük	Orta	Az	Yüksek	Orta
157	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Düşük	Çok düşük
158	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Orta	Orta
159	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Orta
160	Yüksek	Düşük	Orta	Çok	Düşük	Çok düşük
161	Yüksek	Düşük	Orta	Çok	Orta	Düşük
162	Yüksek	Düşük	Orta	Çok	Yüksek	Düşük
163	Yüksek	Düşük	Derin	Az	Düşük	Çok düşük
164	Yüksek	Düşük	Derin	Az	Orta	Orta
165	Yüksek	Düşük	Derin	Az	Yüksek	Orta
166	Yüksek	Düşük	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
167	Yüksek	Düşük	Derin	Orta	Orta	Düşük
168	Yüksek	Düşük	Derin	Orta	Yüksek	Düşük
169	Yüksek	Düşük	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
170	Yüksek	Düşük	Derin	Çok	Orta	Düşük
171	Yüksek	Düşük	Derin	Çok	Yüksek	Düşük
172	Yüksek	Düşük	Çok derin	Az	Düşük	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz

Çizelge 4.7 devam

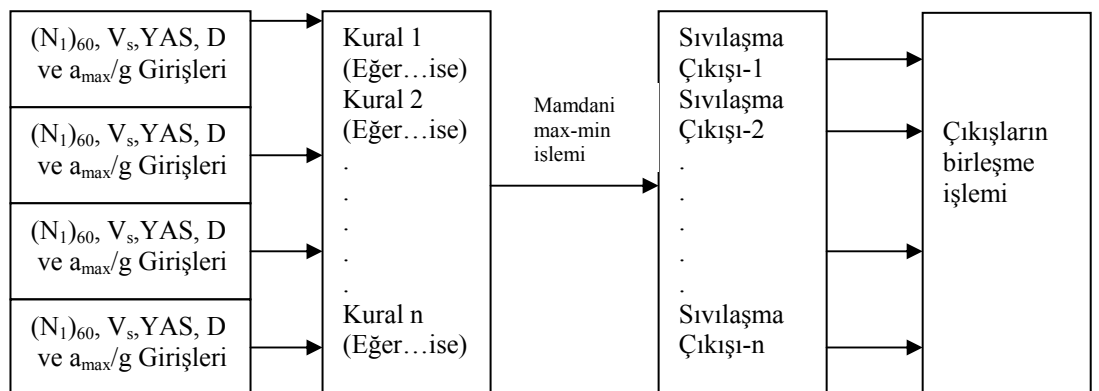
Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
173	Yüksek	Düşük	Çok derin	Az	Orta	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
174	Yüksek	Düşük	Çok derin	Az	Yüksek	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
175	Yüksek	Düşük	Çok derin	Orta >9m	Düşük	Çok düşük
176	Yüksek	Düşük	Çok derin	Orta >9m	Orta	Düşük
177	Yüksek	Düşük	Çok derin	Orta >9m	Yüksek	Düşük
178	Yüksek	Düşük	Çok derin	Çok	Düşük	Çok düşük
179	Yüksek	Düşük	Çok derin	Çok	Orta	Çok düşük
180	Yüksek	Düşük	Çok derin	Çok	Yüksek	Çok düşük
181	Yüksek	Yüksek	Sığ	Az	Düşük	Çok düşük
182	Yüksek	Yüksek	Sığ	Az	Orta	Düşük
183	Yüksek	Yüksek	Sığ	Az	Yüksek	Düşük
184	Yüksek	Yüksek	Sığ	Orta	Düşük	Çok düşük
185	Yüksek	Yüksek	Sığ	Orta	Orta	Düşük
186	Yüksek	Yüksek	Sığ	Orta	Yüksek	Düşük
187	Yüksek	Yüksek	Sığ	Çok	Düşük	Çok düşük
188	Yüksek	Yüksek	Sığ	Çok	Orta	Çok düşük
189	Yüksek	Yüksek	Sığ	Çok	Yüksek	Çok düşük
190	Yüksek	Yüksek	Orta	Az	Düşük	Çok düşük
191	Yüksek	Yüksek	Orta	Az	Orta	Çok düşük
192	Yüksek	Yüksek	Orta	Az	Yüksek	Çok düşük
193	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	Çok düşük
194	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Çok düşük
195	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek	Çok düşük
196	Yüksek	Yüksek	Orta	Çok	Düşük	Çok düşük
197	Yüksek	Yüksek	Orta	Çok	Orta	Çok düşük
198	Yüksek	Yüksek	Orta	Çok	Yüksek	Çok düşük
199	Yüksek	Yüksek	Derin	Az	Düşük	Çok düşük
200	Yüksek	Yüksek	Derin	Az	Orta	Çok düşük
201	Yüksek	Yüksek	Derin	Az	Yüksek	Çok düşük
202	Yüksek	Yüksek	Derin	Orta	Düşük	Çok düşük
203	Yüksek	Yüksek	Derin	Orta	Orta	Çok düşük
204	Yüksek	Yüksek	Derin	Orta	Yüksek	Çok düşük
205	Yüksek	Yüksek	Derin	Çok	Düşük	Çok düşük
206	Yüksek	Yüksek	Derin	Çok	Orta	Çok düşük
207	Yüksek	Yüksek	Derin	Çok	Yüksek	Çok düşük
208	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Az	Düşük	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
209	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Az	Orta	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
210	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Az	Yüksek	YASS>9.0 m olduğu için sıvılaşma olmaz
211	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Düşük	Çok düşük
212	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Orta	Çok düşük

Çizelge 4.7 devam						
Kural No	$(N_1)_{60}$	Kayma Dalgası Hızı ( $V_s$ ) (m/s)	YASS (m)	Derinlik, D (m)	Deprem İvmesi ( $a_{max}/g$ )	Sıvılaşma Alt Kümesi
213	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Orta >9m	Yüksek	Çok düşük
214	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Çok	Düşük	Çok düşük
215	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Çok	Orta	Çok düşük
216	Yüksek	Yüksek	Çok derin	Çok	Yüksek	Çok düşük

Çizelge 4.7 den, örnek olarak 5. kuralı ele alırsak bu kuralın açılımı şu şekildedir:

Kural 5: Eğer [ $(N_1)_{60}$  =Düşük veya  $V_s$  =Düşük ] ve YAS = Sığ ve D=Orta ve  $a_{max}$ =Orta ise, Sıvılaşma =Yüksek

“veya” işlemcisi (operatörü)  $(N_1)_{60}$  ve  $V_s$ 'nin en az ikisinden birisinin olmasını gerektirir. İkisinden birisi olmazsa kural yine çalışır, ikisi de olursa, ikisi içinde üyelik derecesi en küçük olan dikkate alınır. “Ve” operatörü (işlemcisi) bu operatörün önünde veya arkasında bulunan bulanık kümenin her ikisinin de mutlaka olmasını gerektirir. Şayet birisi olmazsa kural çalışmaz. “Ve” operatörü Mamdani bulanık işlemcisinde girdi parametrelerinin içinde en küçük üyelik derecesine sahip olanın alınmasını zorunlu kılar. Mamdani çıkarım algoritması Şekil 4.20’de verilmiştir. Mamdani çıkarım algoritması, en çok kullanılan çıkarım mekanizmalarındandır. Bu çalışmada bu sebeple “Mamdani” kullanılmıştır.



Şekil 4.20. Mamdani çıkarım algoritması

Girdilere uygulanan Mamdani çıkarım işlemi aşağıdaki şekildedir:

$$\alpha_i = \ddot{u}_i(N_1)_{60} \wedge \ddot{u}_i(V_s) \wedge \ddot{u}_i(YAS) \wedge \ddot{u}_i(D) \wedge \ddot{u}_i(a_{max}) \quad (4.13)$$

$\alpha_i$  : i ninci kuralın ağırlık faktörü veya ateşleme derecesi.

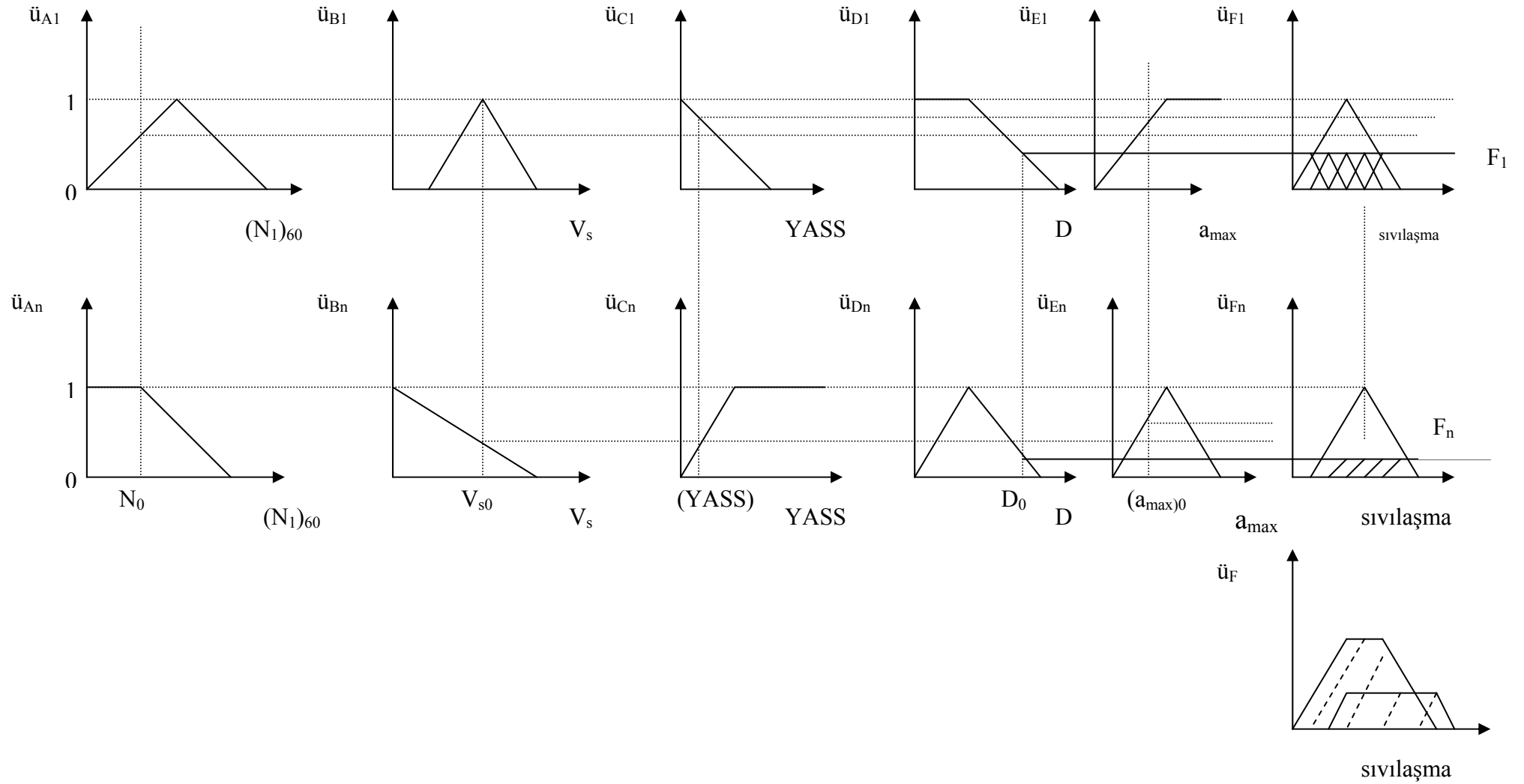
$\wedge$  : minimum işlemi (en küçük üyelik derecesi alınır )

Bulanık sıvılaşma çıkışı ise şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \ddot{u}'_i(\text{sıvılaşma}) &= \bigvee_{i=1}^n \alpha_i \wedge \ddot{u}_i(\text{sıvılaşma}) \\ [ \alpha_1 \wedge \ddot{u}_1(\text{sıvılaşma}) ] &\vee [ \alpha_2 \wedge \ddot{u}_2(\text{sıvılaşma}) ] \vee \dots \vee [ \alpha_n \wedge \ddot{u}_n(\text{sıvılaşma}) ] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$\vee$  : Birleştirme (maksimum) işlemi olup en büyük üyelik dereceleri dikkate alınır.

Mamdani çıkarım mekanizmasının şematik gösterimi şekil 4.21 de verilmiştir.



Şekil.4.21 Diyagramatik Mamdani tip çıkarım

Örneğin verilen herhangi bir  $(N_1)_{60}$ ,  $V_s$ , YASS, Derinlik (D) ve  $a_{max}$  değerleri için üyelik fonksiyonları aralıkları içine giren düşük, orta, az, çok, yüksek, sığ, gibi dilsel bulanık alt küme fonksiyonların üyelik dereceleri, her bir giriş parametresi için daha önce verilmiş olan formülasyonlardan hesaplanır. Sonra çalışan kural sayısı tespit edilir. Diyelim ki 216 kuralın içinde 36 tane kural verilen değerler için çalışıyorsa, bu 36 adet kuralın her birisine karşılık gelen “ağırlık ortalaması” minimum Mamdani işlemi ile bulunur. Bu 36 kuralın içinde örnek olarak 1, 5, 7, 11, 23, ve 36. kuralların bulanık çıktı kümeleri aynı, sıvılaşma potansiyeli “yüksek” olsun. Bu durumda sıvılaşma potansiyeli “yüksek” bulanık fonksiyonunu kesecek üyelik derecesi “ $\alpha_1, \alpha_5, \alpha_7, \alpha_{11}, \alpha_{23}$  ve  $\alpha_{36}$  ağırlık faktörleri” içinden hangisi daha büyük değere sahipse ona eşit olacaktır. Bu şekilde aynı bulanık çıkışa sahip olan kuralların içinde en büyük değere sahip olan “ağırlık faktörü” alınır. Diğer aynı bulanık çıkışa sahip olmayan ayrık kuralların her bir ağırlık faktörleri ise, kendilerine ait bulanık alt küme çıkışların üyelik dereceleridir. Bunların birleştirilmesi ile tek bir bulanık sıvılaşma çıkışı elde edilir.

### **Sayısal Örnek:**

$$\begin{aligned} (N_1)_{60} &= 15.70 \\ V_s &= 187.93 \text{ m/s} \\ \text{YASS} &= 1.10 \text{ m} \\ \text{Derinlik} &= 5.20 \text{ m} \\ a_{max} = a/g &= 0.16 \end{aligned}$$

$(N_1)_{60}=15.70$  değeri “düşük” bulanık alt kümesi’nin 12-17.5 aralığında bir değer olup buna ait fonksiyondan;

$$\ddot{u}_{sağ} = \frac{17.5 - N}{5.50} = \frac{17.5 - 15.70}{5.50} = 0.33 \text{ olarak üyelik derecesi elde edilir. Ayrıca,}$$

$(N_1)_{60}=15.70$  , “orta” bulanık alt kümeye ait 0-17.5 aralığında bir değerdir. Buna ait fonksiyondan ;

$$\ddot{u}_{sol} = \frac{N}{17.5} = \frac{15.70}{17.5} = 0.90 \text{ üyelik derecesi elde edilir.}$$

$V_s=187,93$  değeri “düşük” bulanık alt kümeye 75-200 arasına dahil olmaktadır. Üyelik derecesi,  $\ddot{u}_{sol}=1.0$  dir.

“yüksek” kümesine 100-300 aralığından

$$\ddot{u}_{sol} = \frac{V_s - 100}{200} = \frac{187.93 - 100}{200} = 0.44 \text{ üyelik derecesi ile dahildir.}$$

Aynı şekilde, YASS=1.10 “sığ” bulanık kümesine  $\ddot{u}_{sol} = 1.0$  ile “orta” bulanık

kümesine de  $\ddot{u}_{sol} = \frac{YASS}{2} = \frac{1.1}{2} = 0.55$  üyelik dereceleri ile dahildir.

Derinlik  $D=5.20$  m ise “az” bulanık alt kümesine  $\ddot{u}_{sol}=1.0$  ve “orta” bulanık alt

kümesine  $\ddot{u}_{sol} = \frac{D-1}{7} = \frac{5.20-1}{7} = 0.60$  üyelik dereceleri ile dahil olmaktadır.

$a_{max}=0.16g$  değeri ise “orta” bulanık alt kümesine

$$\ddot{u}_{sol} = \frac{a - 0.05}{0.15} = \frac{0.16 - 0.05}{0.15} = 0.73$$

değeriyle ve “yüksek” bulanık alt kümesine ise

$$\ddot{u}_{sol} = \frac{a - 0.10}{0.20} = \frac{0.16 - 0.10}{0.20} = 0.30$$

üyelik derecesi değeriyle dahil olmaktadır. Bu sonuçların özeti çizelge 4.8 de görülmektedir.

**Çizelge 4.8. Üyelik dereceleri hesap özeti**

	$(N_1)_{60}=15.70$		$V_s=187.93$		YASS=1.10 m		Derinlik =5.20m		$a_{max}=0.16g$	
	düşük	orta	düşük	yüksek	sığ	orta	az	orta	orta	yüksek
$\ddot{u}$	0.33	0.9	1.0	0.44	1.0	0.55	1.0	0.60	0.73	0.30

Çizelge 4.8 deki veriler için çalışan kurallar ve her bir kural için Mamdani minimum bulanık mantık işlemcisi kullanılarak elde edilen “ $\alpha$ ” ağırlık faktörü değerleri ve her bir kuralın sıvılaşma bulanık çıkışı Çizelge 4.9 da özetlenmiştir:



**Çizelge 4.9.  $\alpha$  Ağırlık faktörleri**

Çalışan Kural No	Her Kural İçin Ağırlık Faktörü $\alpha$	Her Kural İçin Sıvılaşma Potansiyeli Çıkışı
2	0.33	Çok Yüksek
3	0.30	Çok Yüksek
5	0.33	Çok Yüksek
6	0.30	Çok Yüksek
11	0.33	Çok Yüksek
12	0.30	Çok Yüksek
2	0.33	Çok Yüksek
3	0.30	Çok Yüksek
5	0.33	Çok Yüksek
6	0.30	Çok Yüksek
11	0.33	Yüksek
12	0.30	Çok Yüksek
14	0.33	Yüksek
15	0.30	Yüksek
38	0.33	Çok Yüksek
39	0.30	Çok Yüksek
41	0.33	Çok Yüksek
42	0.30	Çok Yüksek
47	0.33	Yüksek
48	0.30	Çok Yüksek
50	0.33	Yüksek
51	0.30	Yüksek
74	0.73	Çok Yüksek
75	0.30	Çok Yüksek
77	0.60	Yüksek
78	0.30	Yüksek
83	0.55	Yüksek
84	0.30	Yüksek
86	0.55	Yüksek
87	0.30	Yüksek
110	0.44	Çok Yüksek
111	0.30	Çok Yüksek
113	0.44	Yüksek
114	0.30	Yüksek
119	0.44	Yüksek
120	0.30	Yüksek
122	0.44	Yüksek
123	0.30	Yüksek

Örnek olarak Çizelge 4.7 deki 2. kuralı ele alırsak,

K2: [N= düşük Veya  $V_s = \text{düşük}$  ] ve YASS = sığ ve D= Az ve  $a_{\max} = \text{orta}$  ise sıvılaşma potansiyeli aynı “çok yüksek” çıkışlı olup, bu kural için ağırlık faktörü  $\alpha$  :

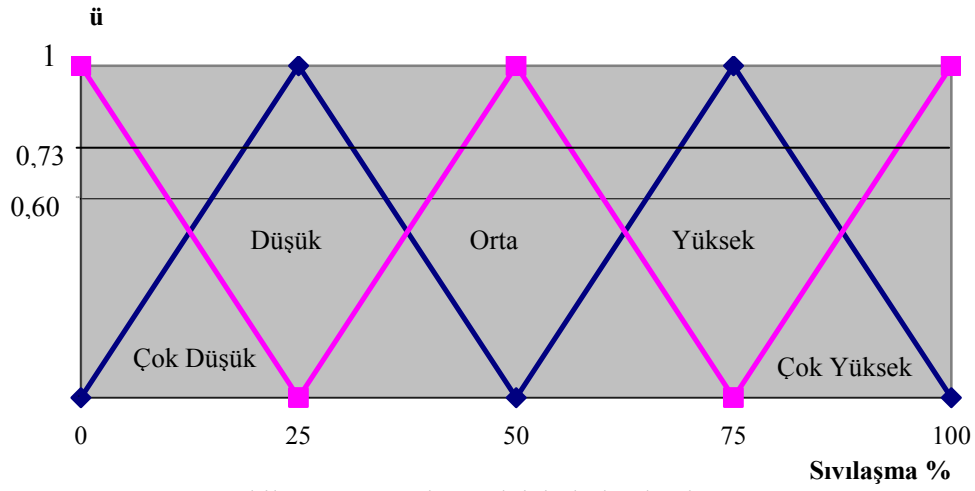
$$\begin{aligned}\alpha_2 &= [\bar{u}(N) \wedge \bar{u}(V_s)] \wedge \bar{u}(YASS) \wedge \bar{u}(D) \wedge \bar{u}(a_{\max}) \\ &= 0.33 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.73 \\ &= 0.33 \text{ elde edilir.}\end{aligned}$$

Buna göre 2. kuralda, sıvılaşma “çok yüksek” alt kümesi  $\alpha_2 = 0.33$  üyelik derecesinde kesilecektir. Çizelge 4.7 deki bütün kurallara ait çıkış verilerinin ‘agregasyonu’ yani “birleşim” işlemi yapılırken ise, çıkış dilsel kümeleri aynı olan kuralların  $\alpha$  ağırlık faktörleri içinde“ en büyük” olanı alınır (Çizelge 4.10 ).

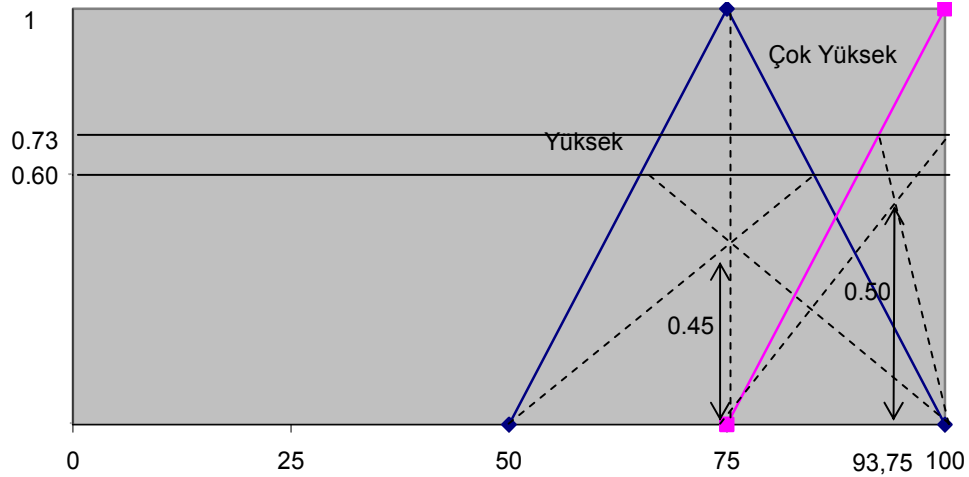
**Çizelge 4.10. Maksimum  $\alpha$  değerleri**

Sıvılaşma	Çok düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Çok yüksek
$\alpha_{\max}$	-	-	-	0,60	0,73

Buna göre 11, 14, 15, 47, 50, 51, 77, 78, 83, 84, 86, 87, 113, 114, 119, 120, 122 ve 123. kurallar “yüksek” dilsel küme çıkışlı olup, bunların içinde ağırlık faktörü,  $\alpha$  en büyük olan 74. kuralın ağırlık faktörü,  $\alpha_{\max} = 0.60$  “yüksek” kümesini kesen üyelik derecesidir. Ayrıca 2, 3, 5, 6, 12, 38, 39, 41, 42, 48, 74, 75, 110 ve 111. kurallar “çok yüksek” sıvılaşma kümesine dahil olup, bunların içinde maksimum ağırlık faktörü  $\alpha_{\max} = 0.73$  dür. Bu değer “çok yüksek” kümesini 0.73 üyelik derecesinde kesecektir. Sonuç olarak verilen bu sayısal örnek için bulanık çıkış Şekil 4.22 de verilmiştir. Şekil 4.23 te ise ağırlık merkezi durulaştırma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Sayısal örnek için bulanık çıkış



Şekil 4.23 Sayısal örnek için durulaştırma işlemi

Bu bulanık çıkışın durulaştırma işleminde “Ağırlık merkezi” durulaştırması kullanılırsa, aşağıda gösterildiği gibi sıvılaşma % si olarak tek bir nümerik sayı elde ederiz:

$$Y^* = \text{Sıvılaşma \%} = \frac{75 \times 0.45 + 93.75 \times 0.5}{0.45 + 0.5} = 84.9\%$$

Sonuç olarak, bu örnek için verilmiş olan bu parametrelere göre sıvılaşma yaklaşık %85 ihtimalle olacaktır diyebiliriz. Bu değer çalışma içerisinde verilmiş olan literatürde yer alan arazi gözlemi ile aynı olup gerçekte de sıvılaşma bu şartlar altında olmuştur.

Bulanık mantık metodu ile sıvılaşma risk modellemesi bu tez çalışması sırasında dikkate alınmış olan literatürde rapor edilmiş ve arazi gözlemlerine dayanan sıvılaşmaya ait sonuçlardan en kritik olanı ile karşılaştırılmıştır. Buna göre geliştirdiğimiz bu modelin suya doygun gevşek taneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde oldukça başarılı olduğu Çizelge 4.11 de verilen mukayese cetvelinden görülmektedir.

Çizelge 4.11 Geliştirilmiş bulanık model sonuçlarının arazi sıvılaşma datası ile mukayesesi

No	(N1) <sub>60</sub>	Vs (m/s)	YASS (m)	Derinlik (m)	a <sub>max</sub> /g	Arazi Sıvılaşma Durumu	Bulanık Model Sonucu	
							%	Var/Yok
1	15,70	187,93	1,10	5,20	0,16	Var	85	Var
2	14,74	207,55	2,00	11,10	0,16	Var	55	Var
3	19,61	194,69	0,50	4,50	0,16	Yok	69	Var
4	34,20	237,61	0,50	5,00	0,16	Yok	36	Yok
5	16,58	243,78	8,40	8,50	0,50	Var	68	Var
6	12,90	233,60	8,40	13,30	0,50	Yok	39	Yok
7	4,78	159,08	5,80	9,90	0,50	Yok	56	Var
8	31,06	299,15	5,80	10,70	0,50	Yok	29	Yok
9	22,42	270,78	5,80	11,60	0,50	Yok	40	Yok
10	13,38	230,57	5,80	12,80	0,50	Yok	39	Yok
11	20,64	252,28	4,30	9,10	0,50	Yok	51	Var
12	1,91	116,21	4,70	10,20	0,50	Yok	54	Var
13	5,27	164,58	4,70	11,10	0,50	Yok	49	Yok
14	2,87	129,62	1,50	10,30	0,15	Yok	58	Var
15	7,75	157,11	1,50	3,50	0,15	Var	84	Var
16	23,66	222,23	1,30	3,00	0,40	Var	52	Var
17	29,51	263,22	3,50	4,00	0,40	Yok	28	Yok
18	18,03	237,28	1,60	9,50	0,40	Var	70	Var
19	30,35	255,40	2,80	3,10	0,20	Yok	32	Yok
20	15,78	208,32	1,10	5,50	0,20	Var	92	Var
21	21,96	232,57	3,10	3,30	0,20	Yok	46	Yok
22	30,23	271,23	0,70	8,20	0,20	Var	33	Yok
23	6,40	151,55	0,80	5,20	0,10	Var	24	Yok
24	18,19	227,07	2,30	6,00	0,20	Yok	70	Var
25	14,23	222,98	0,40	12,00	0,20	Yok	57	Var
26	17,37	241,70	0,40	13,10	0,20	Yok	46	Yok
27	24,35	265,04	0,80	11,10	0,20	Yok	33	Yok
28	17,19	197,00	1,80	2,50	0,25	Yok	85	Var
29	9,84	193,25	5,50	7,00	0,24	Yok	76	Var
30	8,74	162,17	2,10	3,00	0,14	Yok	85	Var

## 5. SONUÇ

Çizelge 4.11 de sunulan ve tez çalışması sırasında kullanılmış olan veriler literatür sonuçlarının sadece bir kısmı olup sıvılaşma riski açısından en kritik olanlardır. Literatürdeki bütün veriler ile sıvılaşma değerlendirmesi yapılırsa, görülecektir ki geliştirilmiş olan bu bulanık model çok daha mükemmel sonuçlar vermektedir.

Bu modelin avantajı;

- Bulanık modellemede dikkate alınan parametrelerin optimum sayıda ve yalnızca beş adet olması ve işlem hacmini artıran çok fazla parametrenin kullanılmamış olması,
- Bulanık modelleme için seçilmiş olan bu beş adet parametrenin sıvılaşmaya etki eden temel parametreler olarak dünyada kabul görmüş olması,
- Kayma dalgası hızının diğer yöntemlerden farklı olarak (istatistiki ve yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi) bu tezde dikkate alınmış olması. Kayma dalgası hızının kullanılması ile sıvılaşma parametrelerinden olan boşluk oranı, jeolojik yük geçmişi ve çevre basıncı etkilerinde dolaylı olarak ifade edilmiş olması,
- Pahalı ve kompleks deney sistemlerine dayanan (dinamik kayma gerilmesi gibi) parametrelerin kullanılmasına ihtiyaç olmaması,
- Az sayıda bulanık giriş değişkeni kullanılması sebebiyle yazılmış bulanık kural sayısının fazla olmaması (216 adet) ve bu sayede bilgisayar kullanılarak hesaplamaya gerek kalmadan bilgisayarsız hesaplama yapabilme imkanının olması, en fazla 30-40 adet kuralla sonuçta gidilebilmesi,
- Gerçek arazi verilerine dayanan üç boyutlu dağılım grafiklerinden bulanık küme aralıklarının literatürde verilmiş olan çalışmalardan farklı olarak daha kesin olarak belirlenmesi,
- Sıvılaşma potansiyelinin bulanık modellemede % olarak ifade edilmiş olması ve tek bir sıvılaşma (var/yok) sonucu verilmemiş olması,
- SPT veya kayma dalgası hız değerlerinden sadece birisinin mevcut olması halinde dahi, bulanık modelin çalışabilme esnekliğinde olması,

- Literatürde verilmiş ve sıvılaşma potansiyeli araştırmasında kullanılmış SPT sonuçlarından kayma dalgası hızlarının ve eğrilerinin sıvılaşma açısından elde edilmiş olmasıdır.
- Bu yöntem ile yörelerin deprem etkisi ile sıvılaşma haritalarının daha az bir efor sarf edilerek, düşük maliyetle daha doğru olarak çıkarılmasının mümkün olması,
- Karmaşık teorik hesaplar gerektirmemesi nedeniyle gerek tatbikat gerekse proje mühendislerinin kolayca başvurabileceği bir yöntem olması,
- Geoteknik, Jeoloji ve Jeofizik mühendisliği ana bilim dallarına ait kendisine has sıvılaşma potansiyeli değerlendirme yöntemlerinin kesişim kümesini oluşturması,
- Geliştirilmiş yöntemin kendisinden önce var olan diğer analitik yöntemlerde yer alan bulgularla uyumlu olması (SPT, YASS, derinlik ve Vs aralıklarının uygunluğu gibi),
- Modelin yeni sıvılaşma datalarının literatüre girmesiyle, kolayca bulanık küme aralıklarının güncellenebilmesi ve yaşayan bir model olmasıdır.

**ALINMAYACAK****ÖZET**

Bir deprem anında, suya doymun gevşek kum ve siltli kum zeminlerde boşluk suyu basınçları ani artış gösterir. Kum taneleri arasındaki kayma mukavemetini sağlayan efektif gerilme sıfır oluncaya kadar boşluk suyu basınçları artarsa, kum depozitte büyük hacim değişiklikleri meydana gelir. Sıvılaşma dediğimiz bu hadise bu tür zeminlerin üzerine oturtulmuş olan yapıların yıkılmasına, devrilmesine ve zemine gömülmesine sebep olduğundan büyük can ve mal kayıpları oluşturur. Bu nedenle suya doymun gevşek bir kum zeminin sıvılaşma riskinin bilinmesi çok önem arz etmektedir.

Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli üzerinde yoğun olarak yapılan çalışmalar otuz kırk sene öncesine kadar gitmektedir. Bu son kırk yıl içerisinde birçok yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerin çoğu, zaman alıcı, teknik zorlukları olan çokta pratik olmayan yoğun arazi ve laboratuvar çalışmalarını gerektirmektedir. Özellikle tekrarlı gerilmeler altında gevşek kum zeminlerin laboratuvar testini yapmak hem arazi şartlarını birebir laboratuvarında sağlamak (mesela, aynı yoğunluğu sağlamak, varsa tanelerin arasındaki çimentolaşmayı aynen muhafaza etmek, arazideki aynı tane yerleşimini (packing) korumak vs.) oldukça zordur ve pahalı yöntemleri gerektirmektedir. Ayrıca şimdiye kadar geliştirilen bu yöntemlerin hepsinde sıvılaşma potansiyelini tam tespit etmek noktasında bazı eksiklikleri ve sınırlamaları vardır.

İşte bu tez çalışmasında gevşek kum depozitlerin sıvılaşma potansiyeli zor pahalı ve kompleks olan laboratuvar ve arazi çalışmalarına gerek duymadan birkaç sıvılaşmaya etken olan arazi verisine dayanarak kısa zamanda tespit etmek için, yine son 30-40 sene öncesinde temelleri atılan ve zamanla birçok mühendislik alanında başarı ile uygulanmış olan ve geoteknik problemlerin çözümünde de yeni olarak uygulanmaya başlayan bulanık mantık metodu ile modellenerek basit olarak yapılmıştır. Bulanık mantık teoremi, belirsizliklerin hakim olduğu birçok parametrenin farklı şekillerde etki ettiği problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

Bu maksatla bütün dünyada deprem etkisiyle sıvılaşma olan yerlere ait arazi verileri literatür taraması yapılarak elde edilmiştir.

Bu datalardan da kayma dalgası hızları arazi SPT değerlerinden bazı korelasyonlar vasıtası ile elde edilmiştir. Sıvılaşma olan veya olmayan yerlere ait SPT değerlerinden birkaç farklı sadece kum ve çakıl depozitler için verilen bağıntılardan hesaplanan zemin kayma dalgası hızlarına ait eğriler elde edilmiş olup bu eğriler içinde yine literatür değerlendirmesi de yapılarak genel olarak gevşek kum ve çakıl depozitleri temsil eden bir aralık oluşturan iki korelasyon seçilmiştir. Bundan sonra Microsoft Excel'de sıvılaşmada etken olan önemli parametrelerden düzeltilmiş SPT değeri, Kayma Dalgası hızı, yeraltı su derinliği, zemin derinliği ve Deprem zemin yüzey ivmesi değerleri çizelge halinde özetlenerek sıvılaşma olan ve olmayan datalar ayrılmış ve bunlar yukarıda bahsedilen her bir parametrenin bulanık alt küme aralıklarının gerçeğe çok yakın bulunabilmesi için üçlü ilişkileri grafikler halinde elde edilmiştir. Sıvılaşmaya etki eden parametreler literatürde genelde ikili korelasyonlar halinde verilmektedir. Halbuki üç boyutta yani üçlü ilişkiler sıvılaşmaya etki eden parametrelerin aralıkları hakkında daha doğru bir fikir vermektedir. Bundan sonra elde edilen üçlü grafikler değerlendirilerek bulanık alt kümeler ve bu kümelerin fonksiyonları elde edilmiş sonrada bulanık kurallar yazılarak sıvılaşma yüzdeleri bulanık olarak elde edilmiştir. Bundan sonra durulaştırma işlemi yapılarak sıvılaşma yüzdeleri elde edilmiştir.

Sonuçlar arazi verileri ile karşılaştırıldığında bu tezde yapılan modellemenin çok uygun ve makul sonuçları verdiği görülmektedir.

## **ABSTRACT**

## **ÖNSÖZ**



**KAYNAKLAR**

- Alba, P. D., Seed, H. B., Chan, C.K., 1976. Sand liquefaction in large-scale simple shear tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol 102 No GT9, 910-927 p.
- Alhas, E., 1994. Siltli ve killi kumlarda sıvılaşma, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 87 s.
- Andrus, R.D., Piratheepan, P., Juang, C. H., 1995. Shear wave velocity- penetration resistance correlation for ground shaking and liquefaction hazards assessment, USGS Grant 01HQGR0007
- Arango, I., 1996. Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 929-936 p.
- Andrus, R.D., Stokoe, K. H., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 126 No:11, 1015-1025 p.
- Boulanger, R. W., Mejia, L. H., İdriss, İ. M., 1997. Liquefaction at moss landing during loma prieta earthquake, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 123, No. 5, 453-467 p.
- Christian, J. T., Swiger, W. F., 1975. Statics of liquefaction and SPT results, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1135- 1150 p .
- Castro, G., Christian, J. T., 1976. Shear strength of soils and cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 887-894 p.
- Castro, G., Poulos, S. J., 1977. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 501- 515 p.
- Clough, G.W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., Kuppusamy, T., 1989, Influence of cementation on liquefaction of sands, *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol 115, 1102-1115 p.
- Chien, L. K., Lin, M. C., Oh, Y. N., 2000. Shear wave velocity and SPT-N Values of in-situ reclaimed soil in West Taiwan, *Geotechnical Engineering Journal*, Vol 31 No. 1, 63-77 p.
- Chern, S.G., Hu., R. F., Chang, Y. J., Tsai, I. F., 2002, Fuzzy-art neural networks for predicting Chi- Chi earthquake induced liquefaction in yuan-lin area, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol 10, No 1, 21- 32 p.
- Çavuş, U. Ş., 2000. Kumlu zeminlerde uygulamalı örnekleriyle sıvılaşma riski, Doktora Semineri, 18 s.

- Çimen, Ö., 2002. Killi zeminlerin şişme ve emme özelliklerinin belirlenmesinde bulanık model (Fuzzy Logic) yaklaşımı, Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği A.B.Dalı Isparta.
- Delgado, J., Casado, C. L., Alfaro, P., Giner, J.J., Esteves, A., 1998. Liquefaction potential in the lower segura river basin (South- East Spain), *Engineering Geology* 49, 61-79 p.
- Elton, D. J., Juang, H., Sukumaran, B., 1995. Liquefaction susceptibilty evaluation using fuzzy sets, soils and Foundations, Vol. 35, No. 2, 49-60 p.
- Ertunç, A., 2001. Burdur belediyesi kent merkezi ve yakın çevresinin depremselliği ve yerleşime uygunluk açısından incelenmesi, TC Burdur Belediye Başkanlığı, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi yayını 202 s.
- Fiegel, G.L., Kutter, B.L., 1994, Liquefaction mechanism for layered soils, *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol 120, No 4, 737-753 p.
- Finn, W.D.L., 2000. State of the art of geotechnical earthquake engineering practice, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20, 1-15 p.
- Fear, C. E., McRoberts, E. C., 1995, Reconsideration of initiation of Liquefaction in sandy soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 121, No: 3, 249-261 p.
- Ferritto, J. M, 1997. Seismic design driteria for soil liquefaction, technical report TR-2077 Naval Facilities Engineering Service Center, California, 51 p.
- Goh, A. T. C., 1994. Seismic liquefaction potential assessed by neural network, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 120 No: 9, 1467-1481 p.
- Goh, A. T. C., 1996. Neural-network modelling of CPT seismic liquefaction data, *Journal of Geotechnical Engineering* ,70-73 p.
- Guo, T., Prakash, S., 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 125, No.8, 706-710 p.
- Haldar, A. A., Tang, W. H.,1978. Probabilistic evaluation of liquefaction potential , *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 145-163 p.
- Hines, J. W., 1997. Fuzzy and neural approaches in engineering, *MATLAB Supp.*, 224p.
- Holzer, T. L., Bennett, M. J., Ponti, D. J., Tinsley, J. C., 1999. Liquefaction and soil failure during 1994 northridge earthquake, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 125 No:6, 438-452 p.
- Hong-Feng, N., Shu- Juan, D. Ji, Xuan, L, Hai, H., 2001. The application of remote sensing technique and ahp- fuzzy method in comprehensive analysis and assessment for regional stability of Chongqing City, China, 22nd Assian Conference on Remote Sensing.

- Hwang, H., Wang, L., Yuan, Z., 2001. Comparison of liquefaction potential of loess in Lanzhou, China, and Memphis, USA, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20, 389-395 p.
- Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes, *Proceedings 11 th Int. Conference on soil Mech. and Found. Eng. Vol 1* ,321-376 p.
- Juang, C. H., Lee, D. H., Sheu, C., 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 3.
- Juang, C. H., Huang, X. H., Holtz, R. D., 1996. Determining relative density of sands from CPT using fuzzy sets, *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Juang, C. H., JHI, Y. Y., Lee, D. H., 1998. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty, *Elsevier Engineering Geology*, 49, 111- 122 p.
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D. H., Ku, C. S., 2002. Assessing CPT –based methods for liquefaction evaluation with emphasis on the cases from the Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 00, 1-18 p.
- Jafari, M. K., Ali, Shaflee, Razmkhah, A., 2002. Dynamics properties of fine grained soils in South of Tehran, *JSEE Spring 2002*, Vol. 4 No.1, 25 – 34 p.
- Jacob, C., 2003. Fuzzy systems in knowledge engineering, “Artificial Intelligence” course notes, Chapter 4.
- Kagawa, T., Kraft, L., M., 1981. Modeling the liquefaction process, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1593-1607 p.
- Kayabali, K., 1996. Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity, *Engineering Geology*, 121-127 p.
- Kayen, R.E., Mitchell, J. K., 1997. Assessment of liquefaction potential during earthquakes by arias intensity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 123 No:12, 1162-1173 p.
- Kelson, K.I., Hitchcock, C.S., Randolph, C. E., 1999. Liquefaction susceptibility in the inner Rio Grande Valley Near Albuquerque, New Mexico, Final Technical Report, U.S Geological Survey National Earthquake Hazards Reduction Program, award number 98-HQ-GR-1009.
- Kostadinov, M. V., Yamazaki, F.2001. Detection of soil liquefaction from strong motion records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 173-193 p.
- Knudsen, K. L., Sowers, J. M., Witter, R. C., Wentworth, C. M., Helley, E. J., 2000. Description of mapping of quaternary deposits and liquefaction susceptibility, Nine-country san Francisco bay region, California, U.S. Department of the Interior U. S. Geological Survey.

- Ladd, R. S., 1977. Specimen preparation and cyclic stability of sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 535-547 p.
- Liou, C. P., Streeter, V. L., Richart, F. E., 1977. Numerical model for liquefaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 589-605 p.
- Lewis, M. R., Arango, I., Kimball, J. K., Ross, T. E., 1999. Liquefaction resistance of old sand deposits, XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguassu, Brazil, August 1999.
- Liu, A. H., Stewart, J.P., Abrahamson, N. A., Yoshi, Moriwaki, 2001, equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 127 No:12, 1017-1026 p.
- Martin, G. R., Finn, W. D. L., Seed, H. B., 1975. Fundamental of liquefaction under cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 423- 438 p.
- Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., Arulanandan, K., 1977. Effects of sample preparation on sand liquefaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol 103, No. GT2, 91-107 p.
- Monge, O., Chassagneux, Mouroux, P., 1998. Methodology for liquefaction hazard studies: new tool and recent applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17, 415-425 p.
- Obermeier, S. F., 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis- an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of holocene paleo-earthquakes, *Engineering Geology*, 44, 1-76 p.
- Özçimen, N., 2000. Yerel zemin koşullarının yer hareketine etkisi üzerine bir çalışma, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Prakash, S., Puri, V. K., 1981. Dynamic properties of soils from in situ tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 943-962 p.
- Prakash, S., 1982. *Soil Dynamics*.
- Power, M. S., Holzer, T.L., 1996, *Liquefaction maps*, Applied Technology Council.
- Polito, C.P., Martin, J. R., 2001. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 127 No:5, 408-414 p.
- Rahman, M.S., Zahaby, K. M. E., 1996. Probabilistic liquefaction risk analysis including fuzzy variables, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16, 63-79 p.

- Rourke, T. D. O., Pease, J.W., 1997. Mapping liquefible layer thickness for seismic hazard assessment, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 123 No.1, 46-56 p.
- Rahman, M. S., 2002. Fuzzy neural network models for liquefaction prediction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 685-694 p.
- Seed, B.H., Alba, P., 1974. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 281-301 p.
- Seed, H. B., Ugas, C., Lysmer, J., 1976. Site-dependent spectra for earthquake-resistant design, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 66, No 1, 221-243 p.
- Seed, H. B., 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 201-255 p.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1982, *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute, 127 p.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., Tokimatsu, K., 1985. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, *Geotechnical Testing Journal* Vol. (No.3 ), 1016-1031 p.
- Sowers, J. M., Knudsen, K.L., 1989. Relation of soil series to quaternary units, *Open File Report 00-444*. U.S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey.
- Stark, T. D., Olson, S. M., 1995. Liquefaction resistance using CPT and field case histories, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 121 No:12, 856-869 p.
- Sancar, T., 1995. İnce taneli zeminlerin dinamik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sharp, M. K., Dobry, R., 1995. Determination of liquefaction triggering from CPT.
- Seed, R. B., Çetin, K.O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J.M., Reimer, M. F., 1998 *Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation*, NCEER Working Group.
- Şen, Z., 1998. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration, *Solar Energy*, Vol 63, No 1, 39-49 p.
- Şaka, S., 1999. Bulanık kontrol ve uygulamaları, Y. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bil. Enst.
- Şen, Z., 1999. Mühendislikte bulanık (fuzzy) modelleme ilkeleri, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 103 s.
- Uzundurukan, S., 2001. İnce taneli zeminlerin bazı geoteknik özelliklerinin SPT ve DPT verilerine bağlı ampirik ifadeler ile tespitine yönelik bir çalışma, Yüksek lisans tezi, İnşaat Müh. Anabilim Dalı Isparta .

- Wang, J., Rahman, M. S., 1999, A neural model for liquefaction-induced horizontal ground displacement, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 555- 568 p.
- Wang, Z., Graham, G. B., Madin, I. P., 2001. Earthquake hazard and risk Assessment and water-induced landslide hazard in benton county, Oregon, Oregon Department of Geology and Mineral Industries 800 NE Oregon Street, 1-46 p.
- Valera, J. E., Donovan, N. C., 1977. Soil liquefaction procedures, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 607-625 p.
- Vaid, Y. P., Byrne, P. M., Hughes, J. M. O., 1981. Dilation angles and liquefaction potential, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol 107 No GT7, 1003-1009 p.
- Youd, T. L., Perkins, D. M., 1978. Mapping liquefaction ground failure potential, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 433- 446 p.
- Youd, T. L., Hoose, S. N., 1979. Liquefaction during 1906 San Francisco Earthquake, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 425- 439 p.
- Yoshida, N., Finn, W. D. L., 2000. Simulation of liquefaction beneath an impermeable surface layer, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 333- 338 p.
- Youd, T. L., Garris, C. T., 1995. Liquefaction induced ground surface disruption, *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol 121 No 11, 805-809 p.
- Yamamuro, J. A., Covert, K. M., 2001, Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 127 No:4, 314-324 p.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., 2001. Liquefaction resistance of soil: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 127, No:4, 297-313 p.
- Zeghal, M., Elgamal, A. W., 1993, Analysis of the liquefaction Using Earthquake records, *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol 120, No 23, 996-1343 p.
- Zhang, L., 1998. Assessment of liquefaction potential using optimum seeking method *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol 124, No:8, 739-748 p.
- Zhang, Z., Tumay, M. T., 1999. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 125 No 3, 179-186 p.

**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Uğur Şafak ÇAVUŞ  
Doğum Yeri :Ankara  
Doğum Yılı :1964  
Medeni Hali :Evli

**Eğitim ve Akademik Durumu:**

Lise :1979-1982 Demiryolu Meslek Lisesi Eskişehir.  
Lisans :1983-1987 Çukurova Üniv. Müh. Mim. Fak.İnşaat Müh. Böl.  
Yüksek Lisans :1989-1992 University of Wisconsin, Madison- USA, Department of Civil Engineering, Geotechnical Engineering Division

Yabancı Dil :İngilizce

**İş Deneyimi:**

1987-1989 :TCDD Genel Müdürlüğü, Yol Dairesi Başkanlığı, Köprüler Şubesi, Ankara, İnşaat Mühendisi  
1992-1997 :DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar Hes Dairesi Başkanlığı, Ankara  
1997-2004 :DSİ 18. Bölge Müdürlüğü Proje ve İnşaat Şube Müdürlüğü, Isparta

**EKLER**



**EK-1.** Arazi SPT,  $N_m$  Değerlerinden Granüler Zeminler İçin Kayma Dalgası Hızlarının,  
 $V_s$  Hesaplanması

**EK-2** Sıvılaşmaya Etki Eden Arazi Parametreleri (Magnitüd, İvme, YASS, Derinlik,  $(N_1)_{60}$ , F % Ve  $D_{50}$ ) Listesi

**EK-1. Arazi SPT,  $N_m$  değerlerinden granüler zeminler için kayma dalgası hızlarının,  $V_s$  hesaplanması**

$(N_1)_{60}$	$\sigma'_0$	$P_0$	$C_N$	$(N_m)$	$a_{maz}$	$V_s=80N_m^{0,3333}$	$V_s=56N_m^{0,5}$	$V_s=88N_m^{0,34}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	F%	$D_{50}$ (mm)	Sivilaşma
20	96,1	101,325	1,027	21,464	0,32	222,31	259,45	249,61	262,38	0	0,46	Y
10	81,4	101,325	1,116	9,877	0,32	171,63	176,00	191,72	198,42	5	0,28	Y
17	71,6	101,325	1,190	15,748	0,28	200,51	222,23	224,67	234,70	3	0,8	Y
13	67,7	101,325	1,223	11,710	0,28	181,65	191,63	203,14	210,96	4	0,6	Y
10	93,2	101,325	1,043	10,569	0,2	175,55	182,06	196,18	203,32	10	0,25	Y
1	102	101,325	0,997	1,106	0,2	82,72	58,88	91,06	90,20	14	0,25	Y
2,2	69,7	101,325	1,206	2,011	0,2	100,97	79,41	111,59	111,87	22	0,18	Y
16,5	80,4	101,325	1,123	16,197	0,2	202,39	225,37	226,82	237,09	1	0,28	Y
11,9	63,8	101,325	1,260	10,406	0,2	174,64	180,65	195,15	202,18	5	0,3	Y
5,7	73,6	101,325	1,173	5,353	0,2	139,94	129,57	155,68	159,16	20	0,2	N
2	100,1	101,325	1,006	2,191	0,2	103,90	82,88	114,89	115,38	33	0,15	N
8	59,8	101,325	1,302	6,773	0,2	151,35	145,74	168,63	173,22	10	0,4	Y
1	35,3	101,325	1,694	0,650	0,2	69,32	45,16	76,03	74,52	27	0,2	Y
2	45,1	101,325	1,499	1,470	0,2	90,97	67,91	100,33	99,95	30	0,15	Y
10	81,4	101,325	1,116	9,877	0,16	171,63	176,00	191,72	198,42	5	0,28	Y
7	35,3	101,325	1,694	4,553	0,35	132,59	119,49	147,34	150,14	35	0,13	N
29	70,6	101,325	1,198	26,676	0,35	239,01	289,23	268,76	283,74	2	0,8	N
19	91,2	101,325	1,054	19,864	0,35	216,64	249,59	243,12	255,17	4	0,65	Y
8	47,1	101,325	1,467	6,011	0,4	145,45	137,29	161,93	165,93	0	0,45	Y
8	51	101,325	1,410	6,255	0,4	147,39	140,05	164,13	168,33	21	0,1	N
20	63,8	101,325	1,260	17,489	0,4	207,64	234,19	232,82	243,73	0	0,45	N
8	71,6	101,325	1,190	7,411	0,16	155,96	152,45	173,88	178,93	2	0,3	Y
12	71,6	101,325	1,190	11,116	0,16	178,53	186,71	199,58	207,05	2	0,3	N
18	79,5	101,325	1,129	17,570	0,16	207,96	234,73	233,19	244,14	2	0,3	N
10	98,1	101,325	1,016	10,843	0,16	177,05	184,40	197,90	205,20	2	0,3	Y
16	98,1	101,325	1,016	17,349	0,16	207,08	233,25	232,19	243,03	2	0,3	N
20	105,9	101,325	0,978	22,532	0,16	225,93	265,82	253,77	267,01	2	0,3	N
4	38,3	101,325	1,627	2,710	0,16	111,53	92,19	123,51	124,56	10	0,4	Y
27	65,7	101,325	1,242	23,959	0,16	230,60	274,11	259,12	272,98	0	0,3	N
12	68,7	101,325	1,214	10,889	0,16	177,30	184,79	198,18	205,51	0	0,36	N
6	46,1	101,325	1,483	4,460	0,16	131,68	118,26	146,30	149,03	0	0,4	Y
5	45,1	101,325	1,499	3,676	0,2	123,46	107,37	137,00	139,01	20	0,12	Y

## EK 1(devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	σ' <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	C <sub>N</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	V <sub>s</sub> =80N <sub>m</sub> <sup>0,3333</sup>	V <sub>s</sub> =56N <sub>m</sub> <sup>0,5</sup>	V <sub>s</sub> =88N <sub>m</sub> <sup>0,34</sup>	V <sub>s</sub> =87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	F%	D <sub>50</sub> (mm)	Sıvılaşma
28	72,6	101,325	1,181	26,119	0,23	237,33	286,20	266,84	281,59	5	0,25	N
6	41,2	101,325	1,568	4,216	0,23	129,23	114,99	143,53	146,05	5	0,25	Y
16	45,1	101,325	1,499	11,763	0,23	181,93	192,07	203,45	211,31	5	0,25	N
10	66,7	101,325	1,233	8,941	0,1	166,03	167,45	185,33	191,43	0	0,6	N
5	34,3	101,325	1,719	3,206	0,12	117,96	100,27	130,77	132,33	5	0,7	Y
7	41,2	101,325	1,568	4,919	0,12	136,05	124,20	151,26	154,38	4	0,28	N
11	47,1	101,325	1,467	8,265	0,12	161,73	160,99	180,44	186,09	0	0,4	N
4	54,9	101,325	1,359	3,245	0,12	118,43	100,87	131,30	132,90	10	0,4	N
13	41,2	101,325	1,568	9,135	0,12	167,22	169,26	186,69	192,92	7	1,6	N
9	41,2	101,325	1,568	6,324	0,12	147,93	140,83	164,75	169,00	12	1,2	N
9	83,4	101,325	1,102	8,998	0,14	166,38	167,98	185,73	191,87	5	0,34	N
8	70,6	101,325	1,198	7,359	0,14	155,60	151,91	173,46	178,47	4	0,36	N
11	56,9	101,325	1,334	9,084	0,14	166,91	168,78	186,34	192,53	5	0,53	N
6	59,8	101,325	1,302	5,080	0,14	137,51	126,21	152,92	156,18	10	0,25	N
9	68,7	101,325	1,214	8,167	0,14	161,09	160,03	179,71	185,29	20	0,15	N
12	77,5	101,325	1,143	11,565	0,14	180,90	190,44	202,28	210,02	3	0,35	N
4	49,1	101,325	1,437	3,068	0,12	116,25	98,10	128,84	130,26	10	0,15	N
10	66,7	101,325	1,233	8,941	0,2	166,03	167,45	185,33	191,43	0	0,6	Y
19	38,3	101,325	1,627	12,873	0,32	187,48	200,92	209,78	218,27	4	0,28	N
5	34,3	101,325	1,719	3,206	0,32	117,96	100,27	130,77	132,33	5	0,7	Y
7	41,2	101,325	1,568	4,919	0,32	136,05	124,20	151,26	154,38	4	0,28	Y
11	47,1	101,325	1,467	8,265	0,24	161,73	160,99	180,44	186,09	0	0,4	Y
20	66,7	101,325	1,233	17,882	0,24	209,18	236,81	234,59	245,69	0	0,6	N
4	54,9	101,325	1,359	3,245	0,24	118,43	100,87	131,30	132,90	10	0,4	Y
13	41,2	101,325	1,568	9,135	0,24	167,22	169,26	186,69	192,92	7	1,6	Y
8	41,2	101,325	1,568	5,622	0,24	142,24	132,78	158,28	161,98	12	1,2	Y
17	77,5	101,325	1,143	16,384	0,24	203,17	226,67	227,71	238,07	17	0,35	N
9	83,4	101,325	1,102	8,998	0,24	166,38	167,98	185,73	191,87	5	0,34	Y
8	70,6	101,325	1,198	7,359	0,24	155,60	151,91	173,46	178,47	4	0,36	Y
11	56,9	101,325	1,334	9,084	0,28	166,91	168,78	186,34	192,53	5	0,53	Y
23	80,4	101,325	1,123	22,578	0,28	226,08	266,09	253,94	267,20	0	0,41	N
10	77,5	101,325	1,143	9,638	0,24	170,23	173,85	190,12	196,68	10	0,3	N
6	59,8	101,325	1,302	5,080	0,24	137,51	126,21	152,92	156,18	10	0,25	Y

## EK 1(devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	$\sigma'_0$	P <sub>0</sub>	C <sub>N</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	V <sub>s</sub> =80N <sub>m</sub> <sup>0,3333</sup>	V <sub>s</sub> =56N <sub>m</sub> <sup>0,5</sup>	V <sub>s</sub> =88N <sub>m</sub> <sup>0,34</sup>	V <sub>s</sub> =87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	F%	D <sub>50</sub> (mm)	Sıvılaşma
21	86,3	101,325	1,084	21,357	0,24	221,94	258,80	249,19	261,91	5	0,35	N
9	68,7	101,325	1,214	8,167	0,24	161,09	160,03	179,71	185,29	20	0,15	N
10	63,8	101,325	1,260	8,744	0,24	164,80	165,60	183,94	189,91	26	0,12	N
12	77,5	101,325	1,143	11,565	0,24	180,90	190,44	202,28	210,02	3	0,35	Y
15	70,6	101,325	1,198	13,798	0,24	191,86	208,02	214,79	223,80	11	0,3	N
17	90,2	101,325	1,060	17,676	0,24	208,37	235,44	233,66	244,67	12	0,3	N
4	49,1	101,325	1,437	3,068	0,2	116,25	98,10	128,84	130,26	10	0,15	Y
15	66,7	101,325	1,233	13,412	0,2	190,05	205,08	212,73	221,52	10	0,18	N
6	48,1	101,325	1,451	5,511	0,19	141,30	131,46	157,21	160,82	3	0,2	Y
10	53	101,325	1,383	9,641	0,16	170,25	173,88	190,14	196,70	10	0,2	Y
9	86,3	101,325	1,084	11,072	0,45	178,29	186,34	199,30	206,75	20	0,1	Y
31	51	101,325	1,410	29,317	0,6	246,65	303,21	277,53	293,55	11	0,12	N
4	51	101,325	1,410	3,783	0,6	124,65	108,92	138,34	140,45	25	0,12	Y
11	51	101,325	1,410	10,403	0,6	174,62	180,62	195,13	202,16	19	0,1	N
7	46,1	101,325	1,483	6,294	0,2	147,70	140,49	164,48	168,71	34	0,09	Y
8	28,4	101,325	1,889	5,646	0,14	142,44	133,06	158,51	162,23	3	1	Y
8	34,3	101,325	1,719	6,205	0,14	146,99	139,49	163,68	167,84	3	1	N
14	62,8	101,325	1,270	14,692	0,14	195,92	214,65	219,43	228,91	3	1	N

**EK-2 Sıvılaşmaya etki eden arazi parametreleri (Magnitüd, ivme, YASS, Derinlik,  $(N_1)_{60}$ , F % ve  $D_{50}$ ) listesi**

$(N_1)_{60}$	$(N_m)$	$a_{max}$	$V_s=80N_m^{0,333}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	Sıvılaşma	F%	$D_{50}$ (mm)	YASS	Derinlik (m)
8,87	5,77	0,16	143,46	163,48	Y	5,00	0,33	1,10	2,80
3,69	2,88	0,16	113,86	127,38	Y	5,00	0,33	1,10	4,60
15,70	12,97	0,16	187,93	218,85	Y	5,00	0,33	1,10	5,20
10,21	10,08	0,16	172,82	199,90	Y	5,00	0,33	1,10	8,00
11,40	9,81	0,16	171,23	197,92	Y	5,00	0,33	2,00	4,80
14,77	14,33	0,16	194,28	226,84	Y	5,00	0,33	2,00	6,70
14,74	17,47	0,16	207,55	243,62	Y	5,00	0,33	2,00	11,10
19,61	14,42	0,16	194,69	227,36	N	5,00	0,30	0,50	4,50
34,20	26,21	0,16	237,61	281,94	N	5,00	0,30	0,50	5,00
16,58	28,30	0,50	243,78	289,86	Y	62,00	0,06	8,40	8,50
9,58	17,15	0,50	206,29	242,03	Y	50,00	0,07	8,40	10,20
12,90	24,90	0,50	233,60	276,81	N	18,00	0,40	8,40	13,30
43,85	85,85	0,50	352,86	432,17	N	52,00	0,07	8,40	13,90
47,98	95,84	0,50	366,05	449,66	N	68,00	0,04	8,40	14,80
9,63	13,95	0,50	192,57	224,69	Y	64,00	0,05	5,80	6,40
1,96	3,07	0,50	116,21	130,22	Y	71,00	0,05	5,80	8,40
4,78	7,86	0,50	159,08	182,80	N	49,00	0,07	5,80	9,90
31,06	52,31	0,50	299,15	361,58	N	38,00	0,16	5,80	10,70
22,42	38,79	0,50	270,78	324,68	N	49,00	0,05	5,80	11,60
13,38	23,95	0,50	230,57	272,94	N	56,00	0,06	5,80	12,80
22,00	41,41	0,50	276,74	332,42	N	51,00	0,07	5,80	14,80
2,48	3,07	0,50	116,21	130,22	Y	74,00	0,04	4,30	4,60
20,64	31,37	0,50	252,28	300,79	N	61,00	0,05	4,30	9,10
23,60	37,85	0,50	268,57	321,83	N	46,00	0,10	4,30	10,70
37,28	61,01	0,50	314,89	382,17	N	52,00	0,07	4,30	11,30
22,19	39,23	0,50	271,81	326,02	N	56,00	0,06	4,30	13,90
14,73	26,90	0,50	239,66	284,58	N	47,00	0,08	4,30	15,10
6,72	8,71	0,50	164,58	189,63	Y	52,00	0,07	4,70	5,00
2,28	3,07	0,50	116,21	130,22	Y	65,00	0,06	4,70	5,80

## EK-2 (devam)

$(N_1)_{60}$	$(N_m)$	$a_{max}$	$V_s=80N_m^{0,333}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	Sıvılaşma	F%	$D_{50}$ (mm)	YASS	Derinlik (m)
9,37	13,06	0,50	188,40	219,43	Y	83,00	0,04	4,70	6,60
1,91	3,07	0,50	116,21	130,22	N	52,00	0,07	4,70	10,20
5,27	8,71	0,50	164,58	189,63	N	55,00	0,59	4,70	11,10
9,56	16,33	0,50	202,94	237,79	N	38,00	0,13	4,70	12,20
24,87	43,59	0,50	281,51	338,61	N	54,00	0,06	4,70	13,10
38,17	69,72	0,50	329,21	400,98	N	64,00	0,05	4,70	14,60
6,01	8,71	0,50	164,58	189,63	Y	61,00	0,05	5,90	6,30
4,55	6,88	0,50	152,11	174,16	Y	43,00	0,10	5,90	7,30
32,11	52,81	0,50	300,10	362,82	N	25,00	0,24	5,90	9,80
3,08	3,16	0,15	117,35	131,60	Y	72,00	0,07	1,50	4,00
2,52	2,34	0,15	106,21	118,15	Y	42,00	0,08	1,50	3,00
1,75	2,21	0,15	104,27	115,83	Y	83,00	0,02	1,50	7,00
7,75	7,58	0,15	157,11	180,35	Y	90,00	0,02	1,50	3,50
2,87	4,25	0,15	129,62	146,52	N	92,00	0,02	1,50	10,30
4,97	6,48	0,15	149,10	170,44	Y	61,00	0,04	1,50	7,50
8,73	8,11	0,40	160,72	184,83	Y	yok	0,06	1,50	3,00
21,28	25,35	0,40	234,97	278,57	Y	yok	0,25	1,50	6,00
11,63	15,37	0,40	198,88	232,64	Y	yok	0,25	1,50	7,80
13,16	18,09	0,40	209,99	246,72	Y	yok	0,30	1,50	8,50
7,54	4,46	0,40	131,70	149,06	Y	yok	0,17	0,90	0,90
4,53	2,97	0,40	115,05	128,81	Y	yok	0,17	0,90	1,30
20,76	14,87	0,40	196,72	229,93	Y	yok	0,17	0,90	1,80
10,18	8,50	0,40	163,25	187,97	Y	yok	0,14	1,60	2,00
16,46	15,48	0,40	199,36	233,26	Y	yok	0,14	1,60	3,00
9,62	9,95	0,40	172,03	198,91	Y	yok	0,16	1,60	4,00
16,51	18,02	0,40	209,73	246,38	Y	yok	0,16	1,60	4,70
8,81	10,86	0,40	177,17	205,34	Y	yok	0,16	1,60	6,40
18,03	26,10	0,40	237,28	281,52	Y	yok	0,16	1,60	9,50
7,89	6,08	0,40	146,03	166,65	Y	yok	0,12	1,10	2,00

## EK-2 (devam)

$(N_1)_{60}$	$(N_m)$	$a_{max}$	$V_s=80N_m^{0,333}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	Sıvılaşma	F%	$D_{50}(mm)$	YASS	Derinlik (m)
16,20	12,49	0,40	185,62	215,94	Y	yok	0,12	1,10	2,10
17,27	14,64	0,40	195,70	228,64	Y	yok	0,12	1,10	2,70
21,96	16,36	0,40	203,07	237,95	Y	yok	0,17	1,30	1,50
23,66	21,44	0,40	222,23	262,29	Y	yok	0,32	1,30	3,00
23,41	15,38	0,40	198,92	232,70	Y	yok	0,48	1,00	1,20
3,56	2,60	0,40	110,00	122,72	Y	yok	0,48	1,00	1,80
11,32	9,32	0,40	168,37	194,35	Y	yok	0,48	1,00	2,50
29,51	35,63	0,40	263,22	314,91	N	yok	0,16	3,50	4,00
29,83	45,05	0,40	284,62	342,65	N	yok	0,20	3,50	8,40
30,35	32,55	0,20	255,40	304,81	N	yok	0,21	2,80	3,10
29,99	34,65	0,20	260,77	311,75	N	yok	0,21	2,80	4,10
48,70	60,43	0,20	313,89	380,87	N	yok	0,14	2,80	5,20
3,88	4,92	0,20	136,03	154,36	Y	yok	0,17	3,60	4,70
8,32	10,87	0,20	177,18	205,36	Y	yok	0,17	3,60	5,20
4,11	2,94	0,20	114,64	128,32	Y	yok	0,19	1,10	1,50
13,64	11,90	0,20	182,62	212,18	Y	yok	0,30	1,10	2,90
8,62	8,47	0,20	163,09	187,78	Y	yok	0,18	1,10	4,00
15,78	17,66	0,20	208,32	244,60	Y	yok	0,18	1,10	5,50
58,57	39,40	0,20	272,19	326,51	N	yok	0,17	1,10	1,20
53,20	38,88	0,20	270,99	324,96	N	yok	0,17	1,10	1,70
62,93	49,39	0,20	293,47	354,17	N	yok	0,17	1,10	2,10
25,93	28,56	0,20	244,52	290,81	N	yok	0,26	3,10	3,10
21,96	24,58	0,20	232,57	275,49	N	yok	0,26	3,10	3,30
25,94	30,43	0,20	249,74	297,52	N	yok	0,26	3,10	4,00
6,56	6,02	0,20	145,51	166,01	Y	yok	0,16	0,80	3,70
16,33	15,52	0,20	199,53	233,48	Y	yok	0,16	0,80	4,00
7,77	7,63	0,20	157,50	180,83	Y	yok	0,14	1,40	3,70
8,98	9,02	0,20	166,51	192,04	Y	yok	0,14	1,40	3,90
16,10	13,65	0,20	191,18	222,94	Y	yok	0,16	1,00	2,80
10,41	9,31	0,20	168,30	194,26	Y	yok	0,16	1,00	3,20



## EK-2 (devam)

$(N_1)_{60}$	$(N_m)$	$a_{max}$	$V_s=80N_m^{0,333}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	Sıvılaşma	F%	$D_{50}(mm)$	YASS	Derinlik (m)
30,23	38,99	0,20	271,23	325,27	Y	yok	0,08	0,70	8,20
6,40	6,80	0,10	151,55	173,46	Y	yok	0,14	0,80	5,20
5,07	5,25	0,20	138,99	157,99	Y	yok	0,07	0,70	5,00
45,49	67,11	0,10	325,06	395,52	N	yok	0,08	0,70	11,00
18,71	28,12	0,10	243,26	289,19	N	yok	0,08	0,70	11,40
32,44	33,86	0,10	258,77	309,16	N	yok	0,10	1,00	4,80
8,60	9,39	0,10	168,79	194,87	N	yok	0,10	1,00	5,30
54,52	62,04	0,10	316,65	384,48	N	yok	0,10	1,00	5,90
31,74	37,52	0,10	267,78	320,81	N	yok	0,25	2,50	4,80
30,45	38,81	0,10	270,81	324,73	N	yok	0,25	2,50	6,00
31,68	45,86	0,10	286,31	344,85	N	yok	0,28	2,50	8,50
11,50	10,93	0,20	177,51	205,77	Y	yok	0,16	2,30	2,30
8,29	8,49	0,20	163,18	187,89	Y	yok	0,16	2,30	3,10
9,29	9,41	0,20	168,90	195,01	Y	yok	0,21	2,30	3,00
11,39	11,77	0,20	181,97	211,36	Y	yok	0,21	2,30	3,20
7,75	8,39	0,20	162,56	187,12	Y	yok	0,21	2,30	3,80
9,21	9,52	0,20	169,53	195,80	Y	yok	0,15	2,30	3,20
11,79	13,94	0,20	192,51	224,61	Y	yok	0,32	2,30	5,00
16,82	21,44	0,20	222,23	262,29	Y	yok	0,32	2,30	5,60
6,58	6,54	0,20	149,59	171,04	Y	yok	0,13	2,50	2,60
6,62	7,59	0,20	157,20	180,46	Y	yok	0,17	2,90	3,90
11,59	13,39	0,20	189,93	221,37	Y	yok	0,17	2,90	4,00
9,94	12,63	0,20	186,28	216,77	Y	yok	0,17	2,90	5,60
18,19	22,87	0,20	227,07	268,47	N	yok	0,22	2,30	6,00
36,87	40,36	0,20	274,38	329,35	N	yok	0,06	0,40	6,90
14,23	21,66	0,20	222,98	263,25	N	yok	0,07	0,40	12,00
17,37	27,59	0,20	241,70	287,19	N	yok	0,07	0,40	13,10
11,06	11,80	0,20	182,12	211,55	Y	yok	0,06	0,20	5,90
6,95	7,48	0,20	156,44	179,52	Y	yok	0,06	0,20	6,00
4,72	6,90	0,20	152,27	174,35	Y	yok	0,07	0,20	11,20

## EK-2 (devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	Vs=80N <sub>m</sub> <sup>0,333</sup>	Vs=87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	Sıvılaşma	F%	D <sub>50</sub> (mm)	YASS	Derinlik (m)
6,92	10,25	0,20	173,75	201,07	Y	yok	0,07	0,20	11,60
8,17	12,38	0,20	185,07	215,26	Y	yok	0,07	0,20	12,10
8,91	13,02	0,20	188,17	219,14	Y	yok	0,07	0,40	11,20
5,74	8,50	0,20	163,25	187,97	Y	yok	0,07	0,40	11,50
24,35	36,38	0,20	265,04	317,26	N	yok	0,07	0,80	11,10
15,02	13,65	0,22	191,17	222,93	Y	yok	0,20	1,00	4,20
10,04	9,76	0,22	170,94	197,55	Y	yok	0,20	1,00	5,00
7,75	8,13	0,22	160,86	185,00	Y	yok	0,20	1,00	6,00
3,07	3,44	0,22	120,75	135,72	Y	yok	0,20	1,00	7,00
11,50	13,65	0,22	191,17	222,93	Y	yok	0,20	1,00	8,00
77,00	68,02	0,60	326,51	397,43	N	15-20	0,11	2,10	4,00
6,96	6,15	0,60	146,58	167,33	Y	15-20	0,11	2,10	4,00
32,01	28,28	0,60	243,69	289,75	N	40,00	0,08	2,10	4,00
18,00	8,89	0,20	165,69	191,01	Y	50,00	0,07	0,20	2,00
19,94	14,84	0,20	196,60	229,77	Y	20,00	0,15	0,20	5,00
23,98	18,02	0,23	209,71	246,36	N	yok	0,32	2,00	3,10
36,16	28,82	0,23	245,24	291,74	N	yok	0,32	2,00	3,80
31,70	27,70	0,23	242,02	287,60	N	yok	0,32	2,00	5,00
4,40	3,23	0,23	118,28	132,73	Y	yok	0,32	2,10	2,80
9,44	7,38	0,23	155,77	178,69	Y	yok	0,32	2,10	3,40
16,14	14,33	0,23	194,28	226,84	Y	yok	0,32	2,10	5,10
17,22	16,16	0,23	202,25	236,91	Y	yok	0,32	2,10	6,00
17,19	14,94	0,25	197,03	230,32	N	15,00	0,10	1,80	2,50
17,85	17,22	0,25	206,58	242,40	N	15,00	0,10	1,80	3,50
9,21	9,68	0,25	170,49	197,00	Y	15,00	0,10	1,80	4,50
17,73	20,03	0,25	217,24	255,93	N	15,00	0,10	1,80	5,50
18,97	22,84	0,25	226,94	268,30	N	15,00	0,10	1,80	6,50
21,41	27,26	0,25	240,73	285,95	N	15,00	0,10	1,80	7,50
20,36	27,26	0,25	240,73	285,95	N	15,00	0,10	1,80	8,50
30,66	37,21	0,24	267,06	319,87	N	5,00	0,30	2,30	5,80

## EK-2 (devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	V <sub>s</sub> =80N <sub>m</sub> <sup>0,333</sup>	V <sub>s</sub> =87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	Sıvılaşma	F%	D <sub>50</sub>	YASS	Derinlik (m)
23,78	24,99	0,24	233,88	277,17	N	3,00	0,24	2,70	3,40
39,10	48,71	0,24	292,12	352,41	N	2,00	0,25	2,70	5,80
30,03	32,60	0,24	255,53	304,98	N	4,00	0,28	2,70	3,80
32,90	38,70	0,24	270,57	324,41	N	3,00	0,36	2,70	4,90
21,10	27,95	0,24	242,76	288,55	N	4,00	0,35	2,70	6,90
8,95	9,11	0,24	167,09	192,75	Y	5,00	0,18	2,90	3,40
1,79	2,17	0,24	103,62	115,05	Y	21,00	0,16	2,90	6,10
2,67	3,20	0,24	117,87	132,23	Y	3,00	0,20	2,40	6,40
9,84	14,10	0,24	193,25	225,54	N	6,00	0,24	5,50	7,00
5,71	4,56	0,14	132,66	150,23	Y	20-25	0,10	1,40	2,30
6,32	5,26	0,14	139,14	158,17	Y	20-25	0,10	1,70	2,20
8,74	8,33	0,14	162,17	186,63	N	20-25	0,12	2,10	3,00
7,01	7,55	0,16	156,96	180,16	Y	57,00	0,07	2,50	5-7
7,84	8,44	0,16	162,88	187,52	Y	57,00	0,07	2,50	5-7
6,19	6,67	0,16	150,54	172,22	Y	57,00	0,07	2,50	5-7
8,89	10,99	0,29	177,86	206,20	Y	7,00	0,27	2,00	5-7,5
17,61	23,39	0,29	228,75	270,61	Y	12,00	0,26	2,00	6-9
15,85	21,05	0,29	220,86	260,54	Y	yok	0,25	2,00	6-8
8,80	11,69	0,29	181,56	210,85	Y	yok	0,25	2,00	6-8
16,55	21,98	0,29	224,08	264,65	Y	yok	0,25	2,00	6-8
21,64	27,36	0,29	241,04	286,35	Y	0-5	0,25	3,00	5-8
16,08	19,33	0,29	214,67	252,67	Y	3,00	0,30	3,00	5-7
11,86	14,44	0,29	194,80	227,50	Y	5,00	0,30	3,00	4-7
14,72	13,85	0,27	192,12	224,12	Y	10,00	0,22	2,00	2-5
16,94	15,94	0,30	201,33	235,75	Y	10,00	0,22	2,00	2-5
69,26	67,96	0,30	326,42	397,30	N	20,00	0,22	2,00	3-5
20		0,32	222,31	262,38	Y	0	0,46		
10		0,32	171,63	198,42	Y	5	0,28		
17		0,28	200,51	234,70	Y	3	0,8		
13		0,28	181,65	210,96	Y	4	0,6		

## EK-2 (devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	V <sub>s</sub> =80N <sub>m</sub> <sup>0,333</sup>	V <sub>s</sub> =87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	Sıvılaşma	F%	D <sub>50</sub> (mm)	YASS	Derinlik (m)
10		0,2	175,55	203,32	Y	10	0,25		
1		0,2	82,72	90,20	Y	14	0,25		
2,2		0,2	100,97	111,87	Y	22	0,18		
16,5		0,2	202,39	237,09	Y	1	0,28		
11,9		0,2	174,64	202,18	Y	5	0,3		
5,7		0,2	139,94	159,16	N	20	0,2		
2		0,2	103,90	115,38	N	33	0,15		
8		0,2	151,35	173,22	Y	10	0,4		
1		0,2	69,32	74,52	Y	27	0,2		
2		0,2	90,97	99,95	Y	30	0,15		
10		0,16	171,63	198,42	Y	5	0,28		
7		0,35	132,59	150,14	N	35	0,13		
29		0,35	239,01	283,74	N	2	0,8		
19		0,35	216,64	255,17	Y	4	0,65		
8		0,4	145,45	165,93	Y	0	0,45		
8		0,4	147,39	168,33	N	21	0,1		
20		0,4	207,64	243,73	N	0	0,45		
8		0,16	155,96	178,93	Y	2	0,3		
12		0,16	178,53	207,05	N	2	0,3		
18		0,16	207,96	244,14	N	2	0,3		
10		0,16	177,05	205,20	Y	2	0,3		
16		0,16	207,08	243,03	N	2	0,3		
20		0,16	225,93	267,01	N	2	0,3		
4		0,16	111,53	124,56	Y	10	0,4		
27		0,16	230,60	272,98	N	0	0,3		
12		0,16	177,30	205,51	N	0	0,36		
6		0,16	131,68	149,03	Y	0	0,4		
5		0,2	123,46	139,01	Y	20	0,12		
28		0,23	237,33	281,59	N	5	0,25		
6		0,23	129,23	146,05	Y	5	0,25		

## EK-2 (devam)

(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>m</sub> )	a <sub>max</sub>	Vs=80N <sub>m</sub> <sup>0,333</sup>	Vs=87N <sub>m</sub> <sup>0,36</sup>	Sıvılaşma	F%	D <sub>50</sub> (mm)	YASS	Derinlik (m)
16		0,23	181,93	211,31	N	5	0,25		
10		0,1	166,03	191,43	N	0	0,6		
5		0,12	117,96	132,33	Y	5	0,7		
7		0,12	136,05	154,38	N	4	0,28		
11		0,12	161,73	186,09	N	0	0,4		
4		0,12	118,43	132,90	N	10	0,4		
13		0,12	167,22	192,92	N	7	1,6		
9		0,12	147,93	169,00	N	12	1,2		
9		0,14	166,38	191,87	N	5	0,34		
8		0,14	155,60	178,47	N	4	0,36		
11		0,14	166,91	192,53	N	5	0,53		
6		0,14	137,51	156,18	N	10	0,25		
9		0,14	161,09	185,29	N	20	0,15		
12		0,14	180,90	210,02	N	3	0,35		
4		0,12	116,25	130,26	N	10	0,15		
10		0,2	166,03	191,43	Y	0	0,6		
19		0,32	187,48	218,27	N	4	0,28		
5		0,32	117,96	132,33	Y	5	0,7		
7		0,32	136,05	154,38	Y	4	0,28		
11		0,24	161,73	186,09	Y	0	0,4		
20		0,24	209,18	245,69	N	0	0,6		
4		0,24	118,43	132,90	Y	10	0,4		
13		0,24	167,22	192,92	Y	7	1,6		
8		0,24	142,24	161,98	Y	12	1,2		
17		0,24	203,17	238,07	N	17	0,35		
9		0,24	166,38	191,87	Y	5	0,34		
8		0,24	155,60	178,47	Y	4	0,36		
11		0,28	166,91	192,53	Y	5	0,53		
23		0,28	226,08	267,20	N	0	0,41		
10		0,24	170,23	196,68	N	10	0,3		

## EK-2 (devam)

$(N_1)_{60}$	$(N_m)$	$a_{max}$	$V_s=80N_m^{0,333}$	$V_s=87N_m^{0,36}$	Sıvılaşma	F%	$D_{50}$ (mm)	YASS	Derinlik (m)
6		0,24	137,51	156,18	Y	10	0,25		
21		0,24	221,94	261,91	N	5	0,35		
9		0,24	161,09	185,29	N	20	0,15		
10		0,24	164,80	189,91	N	26	0,12		
12		0,24	180,90	210,02	Y	3	0,35		
15		0,24	191,86	223,80	N	11	0,3		
17		0,24	208,37	244,67	N	12	0,3		
4		0,2	116,25	130,26	Y	10	0,15		
15		0,2	190,05	221,52	N	10	0,18		
6		0,19	141,30	160,82	Y	3	0,2		
10		0,16	170,25	196,70	Y	10	0,2		
9		0,45	178,29	206,75	Y	20	0,1		
31		0,6	246,65	293,55	N	11	0,12		
4		0,6	124,65	140,45	Y	25	0,12		
11		0,6	174,62	202,16	N	19	0,1		
7		0,2	147,70	168,71	Y	34	0,09		
8		0,14	142,44	162,23	Y	3	1		
8		0,14	146,99	167,84	N	3	1		
14		0,14	195,92	228,91	N	3	1		